

УДК 666.7

А.С. Беспалов¹, Н.И. Неведов², И.С. Деев¹, Е.В. Куршев¹,
С.Л. Лонский¹, В.М. Бузник³

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ФТОРОЛИГОМЕРОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-41-51

Проанализированы свойства гидрофобизированных образцов высокопористого керамического материала типа ТЗМК (теплозащитные материалы кварцевые) на основе кварцевых волокон и проведена оценка влияния способа нанесения гидрофобных покрытий на краевой угол смачивания и профилометрию их поверхности. Проведены исследования структурных особенностей и показана равномерность нанесения гидрофобного покрытия на основе низкомолекулярных фторолигомеров марки ППУ-90. Доказана высокая эффективность применения фторированных парафинов для защиты высокопористых систем от губительного воздействия повышенной влажности.

Ключевые слова: теплозащитный материал, фторпарафин, гидрофобность, краевой угол смачивания, влагопоглощение, арктический климат.

A.S. Bespalov¹, N.I. Nefedov², I.S. Deev¹, E.V. Kurshev¹,
S.L. Lonsky¹, V.M. Bouznik³

FEATURES OF HYDROPHOBIZATION OF HIGH-POROUS CERAMIC MATERIALS USING FLUOROLIGOMERS

The properties of hydrophobized samples of high-porous ceramic material of the type TZMK based on quartz fibers are analyzed, and the influence of the method of applying hydrophobic coatings on the contact angle and their surface profilometry is evaluated. Structural features have been studied and the uniformity of hydrophobic coating application based on low molecular weight fluoroligomer brand PPU-90 has been shown. Proved high efficiency of fluorinated paraffins to protect high-porous systems from the damaging effects of high humidity.

Keywords: heat-proof material, fluoroparaffin, hydrophobicity, contact angle, moisture absorption, arctic climate.

¹Федеральное 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

²Общество с ограниченной ответственностью «БАСФ-Хеметалл» [«BASF-Chemetall» GmbH]; e-mail: presse.kontakt@basf.com

³Национальный Исследовательский Томский Государственный Университет [National Research Tomsk State University]; e-mail: rector@tsu.ru

Введение

Развитие фундаментальной и прикладной наук, научно-производственных отраслей, в том числе авиационно-космической, связано с материаловедением. Важную часть в данной области занимает получение высокотемпературных теплозащитных материалов и разработка способов их защиты от воздействия негативных факторов окружающей среды – например, от влаги и воды. Значительную часть ранее проведенных исследований, связанных с разработкой гидрофобных и антиобледенительных покрытий,

занимали кремнийорганические соединения. В последние десятилетия для данных целей больше внимания стало уделяться фторополимерам [1–6], которые представляют собой отдельный кластер высокомолекулярных соединений и используются в промышленности в качестве протекторных, триботехнических, электроизоляционных и биосовместимых материалов. Имеется опыт получения покрытий на поверхностях различной природы – как металлической, так и неметаллической, их добавляют в лакокрасочные материалы в качестве модификатора для управления свойствами изделий. Недостатками большинства фторополимеров являются их нерастворимость в промышленно используемых растворителях, высокие значения температур плавления и вязкости расплавов, плохая адгезия к твердым поверхностям, что приводит к ряду технологических проблем при создании из них покрытий. Поэтому внимание исследователей привлекают фторолигомеры с длиной цепи несколько десятков звеньев, к ним, например, относятся фторпарафины и теломерные растворы тетрафторэтилена (ТФЭ). Эти материалы пластичны, легко наносятся на твердые шероховатые поверхности, их возможно наносить жидкофазным способом через растворы и расплавы фторпарафинов с низкой вязкостью при относительно низких температурах.

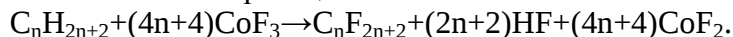
Ранее проводились исследования по модификации лакокрасочных покрытий, в частности разработанного во ФГУП «ВИАМ» фторопластового лака, и поверхности подложки, на которую наносили данный гидрофобный лак [7]. Повышение гидрофобности системы происходило путем введения дополнительного гидрофобного вещества (теломеров ТФЭ) и изменения морфологии поверхности введением ультрадисперсных порошков. Данная гидрофобная система позволила повысить краевой угол смачивания поверхности подложки из алюминиевого сплава марки Д16-АТ каплей воды с 92,5 до 100,4 градуса.

В данной статье приводятся результаты исследования по нанесению фторированных парафинов марки ППУ-90 на подложку пористого керамического материала типа ТЗМК (теплозащитный материал кварцевый) с целью придания высокогидрофобных свойств.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 14.3. «Многофункциональные теплозащитные и теплоизоляционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Фторпарафины – это фторуглероды, полученные замещением водорода на фтор в углеводородных парафинах с применением в качестве фторирующего агента трифторида кобальта, что можно описать реакцией



Реакция проводится при температуре 350°C. В первой части процесса CoF_2 переходит в CoF_3 , присоединяя фтор, а на второй – CoF_3 фторирует углеводороды. Таким образом в непрерывном цикле замещаются все атомы водорода на фтор. Чередувание этих стадий делает процесс, по существу, непрерывным. Точно так же как и фторид кобальта ведут себя и другие соли, в частности – CeF_4 , AgF_2 , MnF_3 .

По причине своих особенностей фторпарафины высокоэффективны при создании гидрофобных покрытий, получаемых простым втиранием, – например, в качестве основы для лыжных мазей. Фторпарафины относятся к низкомолекулярным фторуглеродным системам, которые способны растворяться в сверхкритических флюидах – в частности, диоксиде углерода ($СК-CO_2$) [8], что позволяет получать фторуглеродные

покрытия толщиной от 10 нм. В то же время строение фторпарафинов и их свойства недостаточно изучены, можно отметить лишь проведение первоначальных исследований.

Фторпарафины, промышленно выпускаемые в АО «Галополимер», контролируют по внешнему виду и температуре плавления, именно эта температура определяет нумерацию марки товарных продуктов – ППУ-90, ППУ-110, ППУ-180, фотографии которых в поляризованном свете представлены на рис. 1.



Рис. 1. Микрофотографии фторпарафинов, полученные с помощью оптического микроскопа (поляризованный свет)

Исследованиями ядерного магнитного резонанса ранее определена степень фторирования образцов, которая составляла 99,8%. Длина цепей данных фторуглеродов зависит от технологических параметров производства и может регулироваться, а на основании данных ядерного магнитного резонанса возможно оценить длину фторуглеродной цепи макромолекулы образцов. Так, для фторпарафина марки ППУ-120 длина составила 12 звеньев, а для ППУ-180: 23 звена [9]. Однако исследования не проводили на фторпарафинах марок ППУ-90 и ППУ-110.

Из результатов проведенных ранее термогравиметрического анализа (рис. 2) и масс-спектрометрии фторуглеродов, проводимых на синхронном термоанализаторе STA449F1 и квадрупольном масс-спектрометре QMS 403D, по термическим кривым видно, что заметная потеря массы парафинов марок ППУ-90, ППУ-110 и ППУ-180 начинается после плавления, и они фактически в полной мере переходят в газовую фазу при температурах 190, 230 и 340°C соответственно, что возможно связать с увеличением доли термически более стойких фторполимеров в ряду ППУ-90→ППУ-110→ППУ-180. По виду кривых можно утверждать об одностадийном разложении фторпарафинов при воздействии температур, несмотря на фракционность образцов (наличие олигомерного и полимерного компонентов). По-видимому, полимерная составляющая незначительна и не оказывает очевидного влияния на процесс термического разложения [10].

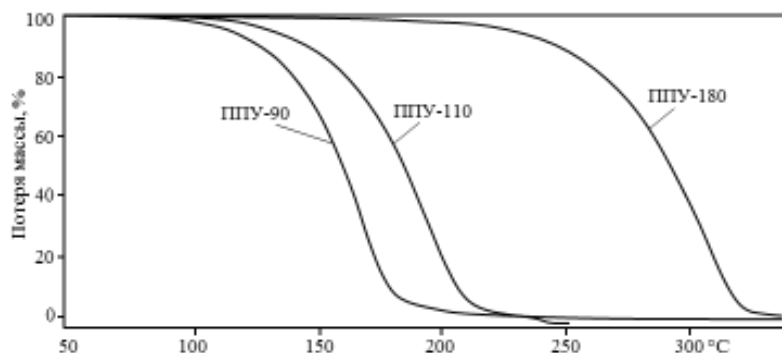


Рис. 2. ТГА-кривые при нагревании фторпарафинов марок ППУ-90, ППУ-110 и ППУ-180 в динамической атмосфере азота

На дифрактограмме исходного углеводородного парафина П-2 (рис. 3) наблюдался набор узких (кристаллических) рефлексов. Такой вид дифрактограммы свидетельствует о слоистом строении парафинов, образованных из коротких углеводородных цепей. У фторированных парафинов помимо пиков при малых значениях углов, характерных для углеводородных аналогов, появляются специфические особенности [11].

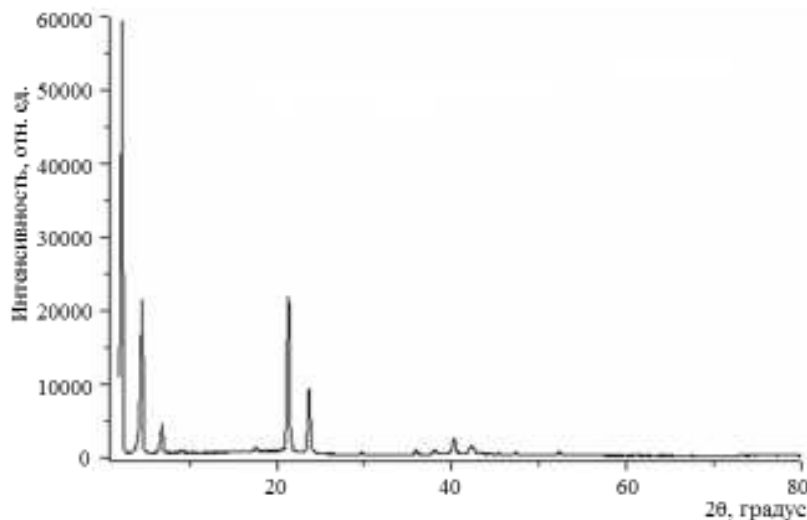


Рис. 3. Дифрактограмма исходного углеводородного парафина П-2

Дифрактометрия образцов фторпарафинов марок ППУ-90, ППУ-110 и ППУ-180 проводилась на установке ДРОН-3М при комнатной температуре в диапазоне брэгговских углов $2\theta=2-80$ градусов с шагом 0,05 при экспозиции в течение 2 с.

Высокотемпературные керамические материалы на основе оксидных волокон [12–22], выполняющие роль теплозащиты, тепло- и звукоизоляции, ввиду химического состава (поверхность оксидов кремния, алюминия и др. крайне гидрофильна) и высокой пористости (до 95%) активно сорбируют воду, что приводит к нивелированию их основных характеристик и способствует разрушению материала. Исследования по модификации пористого керамического материала типа ТЗМК на основе кварцевых волокон (99,9% SiO_2) фторпарафином марки ППУ-90, растворенным в сверхкритическом диоксиде углерода, доказали эффективность применения данного гидрофобного покрытия и технологии его нанесения, когда краевой угол смачивания достигал 155 градусов [8]. Главным недостатком данного способа является ограниченность габаритов модифицируемых образцов объемом автоклава, в котором происходит весь технологический процесс.

Исследовано влияние нанесенных гидрофобных покрытий на профилометрию и краевой угол смачивания поверхности пористого керамического материала. Для модификации подготовили образцы материала типа ТЗМК размером $20 \times 20 \times 10$ мм.

Профилометрию поверхности образцов проводили на 3D-профилометр-конфокальном микроскопе PluNeox, относительная погрешность измерений линейных размеров при которой составляет не более 0,25%.

Определение краевого угла смачивания поверхности модифицированных образцов пористого керамического материала типа ТЗМК проводили на автоматизированном оптическом анализаторе ОСА 15 Pro фирмы DataPhysics. Изучали две стороны массивного образца в пяти различных точках каждой из сторон и по ним вычисляли среднее значение краевого угла смачивания. Для каждого положения капли воды средний угол определяли по трем последовательным изображениям спустя 20, 40 и 60 с после нанесения капли.

Исследование микроструктуры высокопористого материала и энергодисперсионный рентгеноспектральный анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 XMU.

Результаты и обсуждение

На дифрактограммах образцов ППУ-90 и ППУ-110 наблюдается слабый, но достаточно узкий пик при значении угла 18 градусов, в то время как пик у образца ППУ-180 имеет значительно большую интенсивность, а также два широких гало в области углов 30–50 и 70–80 градусов, наблюдаемые у всех образцов (рис. 4).

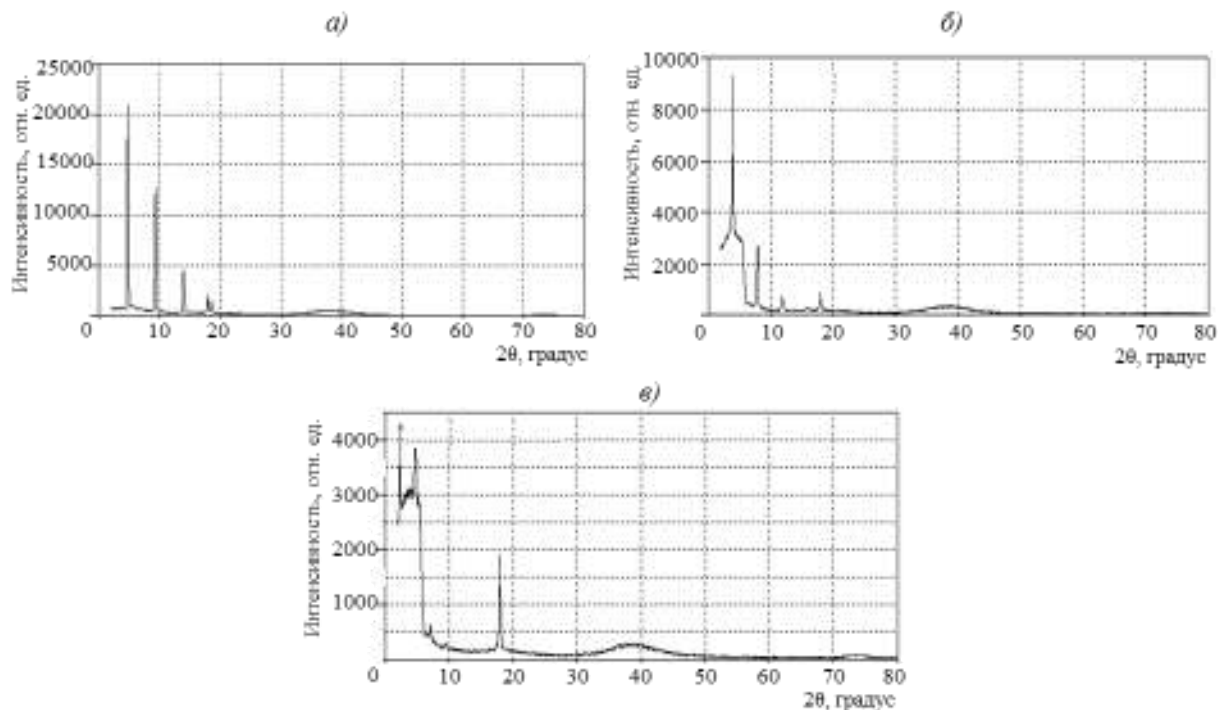


Рис. 4. Дифрактограммы фторпарафинов ППУ-90 (а), ППУ-110 (б) и ППУ-180 (в)

Эти рефлексы характерны для дифрактограмм политетрафторэтилена, однако с другим отношением интенсивности данных рефлексов [23]. Появление диффузных рефлексов можно связать с наличием частично разупорядоченных мезофазных структур [24], что касается кристаллической фазы фторполимеров, то ее доля в образцах ППУ-90 и ППУ-110 мала в отличие от образца ППУ-180. Поэтому для исследования по гидрофобизации выбраны фторолигомеры с меньшим содержанием фторполимерной составляющей и, соответственно, более низкими значениями температуры плавления.

Исследования по гидрофобизации подложки из неанодированного алюминиевого сплава марки Д16-АТ растворами фторпарафинов марок ППУ-90 и ППУ-110 во фторорганических растворителях и расплавом фторпарафина марки ППУ-180 показали, что данные гидрофобные покрытия позволяют повысить гидрофобность поверхности подложки значительно эффективнее фторопластового лака, модифицированного теломерами ТФЭ. Поэтому в качестве гидрофобных составов для модификации образцов материала типа ТЗМК выбраны: раствор фторпарафина марки ППУ-90, теломеры ТФЭ и гидрофобная система на основе фторполимерного лака и теломеров ТФЭ. Результаты по определению значения краевого угла смачивания поверхности модифицированных образцов материала типа ТЗМК представлены в табл. 1.

Таблица 1

Краевой угол смачивания поверхности модифицированного материала типа ТЗМК

Гидрофобное покрытие	Краевой угол смачивания, градус*	Фотографии капли на поверхности образца
Раствор фторированного парафина марки ППУ-90	$\frac{108-138}{128}$	
Теломерный раствор тетрафторэтилена	$\frac{0-148}{132}$	
Фторполимерный лак+ +теломерный раствор тетрафторэтилена	$\frac{126-147}{135}$	

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Видно, что наиболее эффективным оказалась гидрофобная система на основе фторполимерного лака, модифицированного теломерами ТФЭ. Это можно объяснить сплошностью покрытия поверхности пористого керамического материала, что, в свою очередь, подтверждается из 3D-профилограммы его поверхности (рис. 5, в). Недостатком такого покрытия является малое значение глубины проникновения гидрофобного состава ввиду его высокой вязкости, что не позволит модифицировать пористый материал во всем его объеме. Значительный разброс значений краевого угла смачивания поверхности модифицированной подложки при помощи растворов фторпарафина ППУ-90 свидетельствует о неравномерности и несплошности (рис. 5, а) покрытия волокон пористого материала. Использование теломеров ТФЭ для придания высокогидрофобных свойств пористому керамическому материалу не привело к желаемому эффекту, что может быть связано с «островным» типом гидрофобного покрытия на поверхности материала, как это видно из 3D-профилограммы (рис. 5, б).

В дальнейшем для повышения эффективности гидрофобизации пористого керамического материала рассматривали способ нанесения покрытия фторпарафинов расплавленным методом. На поверхность образцов материала типа ТЗМК размером 20×20×10 мм наносили фторпарафин марки ППУ-90 и при определенных технологических режимах осуществляли наплавление на поверхность оксидных волокон фторолигомеров, при этом перешедшие в газовую фазу более легкоплавкие фракции фторпарафинов проникали в объем материала и в дальнейшем при остывании конденсировались на поверхности

оксидных волокон в объеме пористой подложки. Это подтверждают полученные данные карты распределения по элементам методом энергодисперсионного рентгено-спектрального анализа торца подложки (рис. 6).

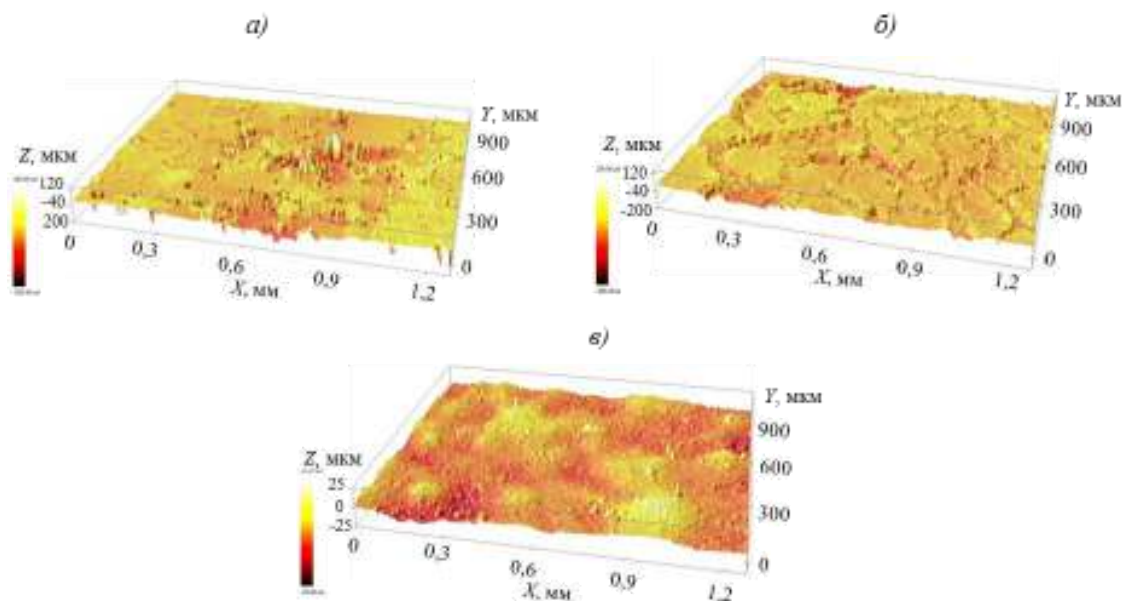


Рис. 5. Профилометрия поверхности модифицированного материала типа ТЗМК растворами ППУ-90 (а) и ТФЭ (б), а также системой лака ФП-5182М и теломера ТФЭ (в)

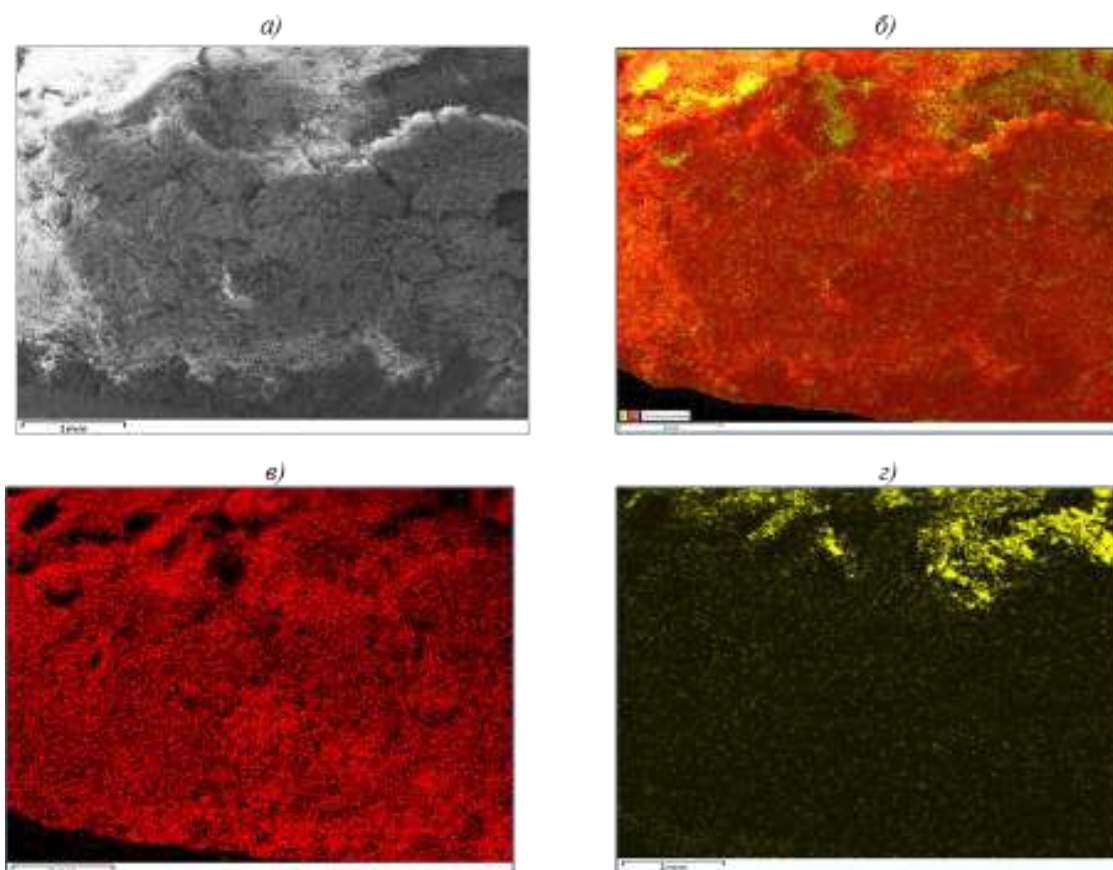


Рис. 6. Карта рентгеноспектрального микроанализа торца образца типа ТЗМК с фторпарафиновым покрытием:

а – исследуемая область; б – многослойная карта распределения элементов по цвету: Si (красный цвет) и F (желтый цвет); в – распределение Si; г – распределение F

Исходя из полученных результатов при исследовании модифицированных образцов, можно установить, что в верхней части подложки высока концентрация фторпарафинов, а глубина проникновения расплава невелика и в среднем составляет ~2 мм, в то же время наблюдается незначительное содержание фторолигомеров в объеме пористой подложки, причем распределены фторпарафины равномерно по всему объему. Таким образом, можно утверждать, что происходит модифицирование не только поверхности пористого материала, но и всего его объема. Проведенные исследования по определению краевого угла смачивания гидрофобизированного расплавом фторпарафинов пористого керамического материала типа ТЗМК показали, что материал находится в высокогидрофобном состоянии, когда краевой угол смачивания водой его поверхности достигал значений 145 градусов. Исследование характера поверхности подложки при помощи профилометрии показало, что гидрофобное покрытие носит сплошной характер – без разрывов и трещин (рис. 7), а фотографии образца, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 8), показывают сплошность покрытия элементарного волокна пористого материала.

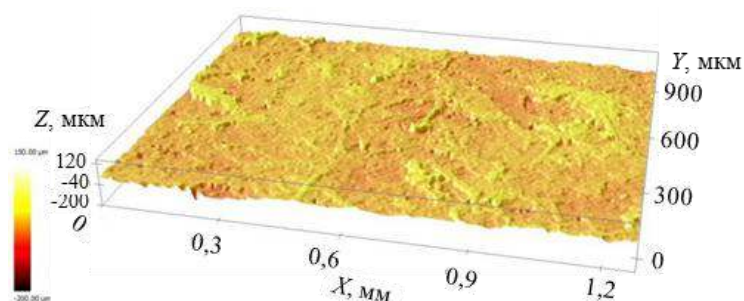


Рис. 7. Профилометрия модифицированного расплавом фторпарафина ППУ-90 поверхности образца типа ТЗМК

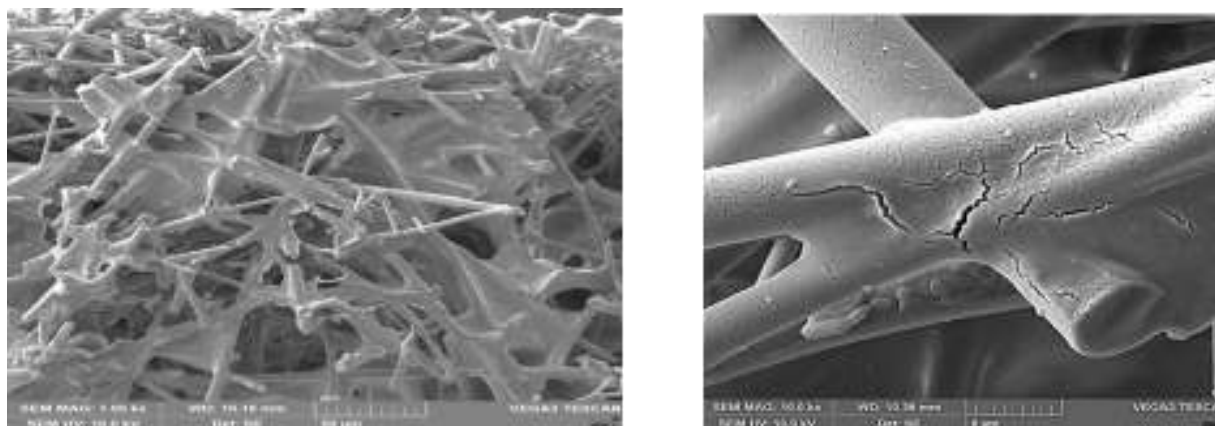


Рис. 8. Микроструктура поверхности образца типа ТЗМК с фторпарафиновым покрытием

Следует отметить, что немаловажной характеристикой высокопористых материалов является влагопоглощение – способность материала сорбировать влагу из окружающей среды. Исследования проводили в эксикаторе над зеркалом воды при относительной влажности 98% и температуре $22 \pm 3^\circ\text{C}$ в течение 24 ч. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влагопоглощение при $\phi=98\%$ в течение 24 ч исходного и модифицированного материала типа ТЗМК

Тип образца	Влагопоглощение, %	Среднее значение влагопоглощения, %
ТЗМК	1,9	1,7
	1,7	
	1,4	
ТЗМК+ППУ-90	0,5	0,7
	0,8	
	0,8	

Как видно из результатов исследований, с помощью технологии гидрофобизации образцов материала типа ТЗМК фторпарафином марки ППУ-90 удалось снизить значение влагопоглощения в 2,4 раза.

Данную технологию опробовали и на листе алюминиевого сплава марки Д16-АТ. Краевой угол смачивания водой его поверхности с гидрофобным покрытием на основе расплава ППУ-180 составил 124,2 градусов, а проведенные на стенде искусственного обледенения испытания [25–26] показали, что адгезия льда к модифицированной расплавом фторпарафина поверхности имела значение практически в 2 раза меньшее по сравнению с поверхностью, покрытой фторопластовым лаком.

Заключения

Таким образом, предложен технологически простой и эффективный способ гидрофобизации высокопористых керамических материалов с применением фторпарафинов, основанный на конденсации низкомолекулярных фторолигомеров на поверхности оксидных волокон в объеме материала, обеспечивающий получение краевого угла смачивания его поверхности водой до 145 градусов, позволяющий снизить более чем в 2 раза значение влагопоглощения, что расширяет возможности применения данного типа материалов, включая зону арктического и субарктического климата, характеризующегося повышенным значением влажности.

Технология наплавления фторпарафинов позволяет повысить антиобледенительные свойства лакокрасочных покрытий на подложках из алюминиевых сплавов, а также значение краевого угла смачивания до 124,4 градуса, т. е. придать им высокогидрофобное состояние.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» С.Г. Колышеву, С.С. Лешко, И.А. Волкову за проведенные исследования.

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-29-05334).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Севастьянов В.Г., Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Гращенков Д.В., Солнцев С.С., Ермакова Г.В., Прокопченко Г.М., Каблов Е.Н., Кузнецов Н.Т. Получение нитевидных кристаллов карбида кремния с применением золь-гель метода в объеме SiC-керамики // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. №4. С. 198–211.
3. Каблов Е.Н., Жестков Б.Е., Гращенков Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Исследование окислительной стойкости высокотемпературного покрытия на SiC-материале под воздействием высокоэнтальпийного потока // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №6. С. 704–711.
4. Падгурскас Ю., Рукуйза Р., Цезюлис Х. и др. Триботехнические характеристики системы сталь (железо)–фолеокс // Трение и износ. 2006. Т. 27. №3. С. 299–303.
5. Шелестова В.А., Жандаров С.Ф., Данченко С.Г., Гракович П.Н. Модифицирование поверхности углеродных волокон фторполимером в низкотемпературной плазме // Физика и химия обработки материалов. 2014. №4. С. 12–19.
6. Кирюхин Д.П., Беспалов А.С., Бузник В.М., Гращенков Д.В. и др. Применение низкотемпературной пострадикационной прививочной полимеризации политетрафторэтилена для гидрофобизации пористых керамических материалов на основе оксидных волокон // Перспективные материалы. 2018. №10. С. 54–62.
7. 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.
8. Беспалов А.С., Бузник В.М., Гращенков Д.В. и др. Гидрофобизация пористых керамических материалов с применением технологии сверхкритического диоксида углерода // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. №4. С. 431–437.
9. Смирнов М.А. Исследование порошков политетрафторэтилена и композитов на его основе методом ЯМР твердого тела: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черноголовка, 2014. С. 56–71.
10. Нефедов Н.И., Хасков М.А., Петрова А.П., Бузник В.М. Исследование термических свойств фторпарафинов и гидрофобных покрытий на их основе // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №2 (50). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-11-11.
11. Китайгородский А.И. Молекулярные кристаллы. М.: Наука, 1971. 424 с.
12. Бабашов В.Г. Некоторые применения теплоизоляционных материалов в машиностроении // Глобальный научный потенциал. 2015. №1. С. 67–70.
13. Балинова Ю.А., Бучилин Н.В., Бабашов В.Г., Колышев С.Г. Получение и сравнительный анализ диссипативных свойств волокнистых композиционных материалов составов ZrO_2-SiO_2 и $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$ // Огнеупоры и техническая керамика. 2018. №6. С. 9–16.
14. Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Высокотемпературный гибкий волокнистый теплоизоляционный материал // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №1. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-3-3.
15. Бабашов В.Г., Басаргин О.В., Луговой А.А., Бутаков В.В. Особенности макроструктуры теплоизоляционных материалов на основе муллитокорундового состава // Стекло и керамика. 2017. №7. С. 22–28.
16. Бучилин Н.В., Люлюкина Г.Ю., Варрик Н.М. Влияние режима обжига на структуру и свойства высокопористых керамических материалов на основе муллита // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №5 (53). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-4-4.
17. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2005. №2. С. 3–5.
18. Папилин Н.М., Капитанов А.Ф., Волков В.А., Гладышев А.Ю., Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Обоснование рецептуры волокнистой суспензии // Химические волокна. 2009. №5. С. 31.
19. Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г. Теплозащитные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 25.

20. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Басаргин О.В., Бутаков В.В. Модель поведения волокнистого материала при изгибе // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №12. С. 12–15.
21. Бабашов В.Г., Луговой А.А., Карпов Ю.В. Влияние плотности на теплоизолирующие свойства волокнистых теплоизоляционных высокотемпературных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 08. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 11.03.2019).
22. Басаргин О.В., Щеглова Т.М., Колышев С.Г., Никитина В.Ю., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Определение высокотемпературных прочностных характеристик материалов из оксидной керамики // Стекло и керамика. 2013. №2. С. 6–9.
23. Bouznik V.M., Kirik S.D., Solovyov L.A., Tsvetnikov A.K. A crystal structure of ultra-dispersed form of polytetrafluoroethylene based on X-ray powder diffraction data // Powder Diffraction. 2004. Vol. 19. No. 2. P. 135–141.
24. Лебедев Ю.А., Королев Ю.М., Поликарпов В.М. и др. Рентгенографический фазовый анализ политетрафторэтилена // Кристаллография. 2010. Т. 55. №4. С. 651–656.
25. Бойнович Л.Б., Домантовский А.Г., Емельяненко А.М. и др. Противообледенительные свойства супергидрофобных покрытий на алюминии и нержавеющей стали // Известия Академии наук. Сер.: Химическая. 2013. №2. С. 383–390.
26. Кашеваров А.В., Левченко В.С., Миллер А.Б. и др. К гидротермодинамике обледенения профиля в воздушно-кристаллическом потоке // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. №6. С. 808–814.