

УДК 66.045.3

В.Г. Бабашов¹, Н.М. Варрик¹, Т.А. Карасева¹

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОГЕЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-32-42

В последние годы появилось много сообщений о разработке и использовании нового класса материалов – аэрогелей различного состава. Аэрогели представляют собой твердое вещество с очень низкой плотностью и большим количеством пор, заполненных воздухом или газом. Аэрогель имеет низкие теплопроводность, коэффициент преломления света, диэлектрическую проницаемость и скорость распространения звука. Современные технологии позволили начать серийное производство аэрогелей диоксида кремния, которые находят все более широкое применение при изготовлении теплоизоляции для промышленного и строительного использования. Данная статья представляет собой обзор теплоизоляционных материалов, предназначенных для защиты как от высоких, так и от низких температур, с использованием аэрогелей.

Ключевые слова: аэрогель, диоксид кремния, теплоизоляция, композиционный материал, оксидные волокна, высокотемпературная теплозащита.

V.G. Babashov¹, N.M. Varrik¹, T.A. Karaseva¹

APPLICATION OF AEROGELS FOR THE HEAT INSULATION MATERIALS (review)

In recent years there were many messages about development and use of a new class of materials – aero gels of various structure. Aero gels represent solid substance with very low density and a large number of the time filled with air or gas. Aero gel has low heat conductivity, index of refraction of light, dielectric permeability and speed of distribution of a sound. Modern technologies allowed to begin mass production of aero gels of dioxide of silicon which find more and more broad application at production of thermal insulation for industrial and construction use. This article submits the review of the heat-insulating materials intended for protection both from high, and from low temperatures, with use of aero gels.

Keywords: aerogel, silicon dioxide, heat insulation, composite material, oxide fibers, high temperature heat insulation.

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

Введение

Создание теплоизоляционных материалов для высокотемпературного использования – например, в скоростных летательных аппаратах, горячих цехах, высокомоощных энергетических установках – является одной из приоритетных задач материаловедения [1–3]. Волокнистые материалы на основе тугоплавких волокон оксидов металлов составляют основу теплозащитных систем (ТЗС), используемых в настоящее время в самых разных отраслях промышленности. Как правило, такая система содержит несколько различных функциональных зон, состоящих из разных материалов. Низкоплотные материалы с хорошими теплоизоляционными свойствами,

но низкой прочностью упрочняют слоями более плотной армированной керамики; склонные к окислению материалы защищают покрытиями; в слои пористых материалов вводят наполнители, которые способны снижать теплопроводность ТЗС или увеличивать работоспособность ТЗС при максимальных температурах [4–7].

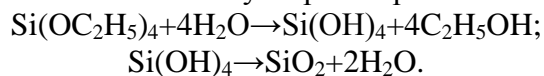
В последние годы в научно-технической литературе появилось большое количество сообщений об использовании аэрогелей различного состава в качестве высокопористых компонентов композиционных материалов.

Аэрогелями называют класс материалов, имеющих структуру с открытой пористостью микро- и нанодиапазона и большими площадями поверхности ($900 \text{ м}^2/\text{г}$ или более). Пористость аэрогеля превышает 90%. Аэрогель образован жестко связанными частицами органического или неорганического вещества, образующими высокопористый каркас, заполненный воздухом или газом.

Индивидуальные частицы размером в несколько нанометров образуют сложную трехмерную структуру с большим количеством пор. Благодаря такой структуре материал имеет низкие теплопроводность, коэффициент преломления света, диэлектрическую проницаемость и скорость распространения звука. Аэрогели известны с начала прошлого века, однако из-за отсутствия отработанной технологии их получения практическое применение материалов на их основе было невозможно. В конце двадцатого века методы получения различных видов аэрогелей были усовершенствованы, что дало новый импульс для их использования.

Процесс получения аэрогелей включает две основных стадии: формирование геля в среде соответствующего растворителя посредством золь-гель процесса, а затем его сушку в специальных условиях. По типу исходного вещества аэрогели можно разделить на органические, неорганические и гибридные. Из неорганических аэрогелей известны оксиды ряда химических элементов, а также их смеси. Наибольшее распространение получили аэрогели из оксида кремния.

Для получения механически устойчивого аэрогеля важно в процессе образования кластера получить прочный каркас. Наноструктурированная решетка кремниевых аэрогелей образуется в результате процессов гидролиза и конденсации молекул кремнийсодержащего прекурсора, в результате чего образуются силоксановые связи Si-O-Si . Первоначально гели получали гидролизом силиката натрия, однако в настоящее время в качестве исходного компонента для приготовления золя используют различные производные алкоксисиланов, чаще всего – доступный и недорогой тетраэтоксисилан (ТЭОС). Поскольку вода не смешивается с такими прекурсорами, для обеспечения гомогенности смеси используют растворители – чаще всего спирты:



Эти реакции, как правило, проводят в среде этанола или метанола. Скорость этих реакций довольно низкая, особенно при комнатной температуре. Важная стадия получения аэрогелей – это процесс сушки в сверхкритических условиях. В ходе сушки осуществляется удаление растворителя из пористой структуры геля. Его удаление должно происходить таким образом, чтобы избежать структурных изменений исходного геля и сохранить его нанопористую структуру (рис. 1). Поскольку в аэрогеле присутствует большое количество микропор, молекулы жидкости создают там высокое давление. Если проводить сушку на воздухе или в вакууме, внутренние напряжения, возникающие в каркасе, могут привести к его разрушению. Высушенный таким образом гель, хотя и сохраняет пористость структуры, но ее доля существенно ниже, чем у аэрогеля. Такую структуру называют ксерогель [8].

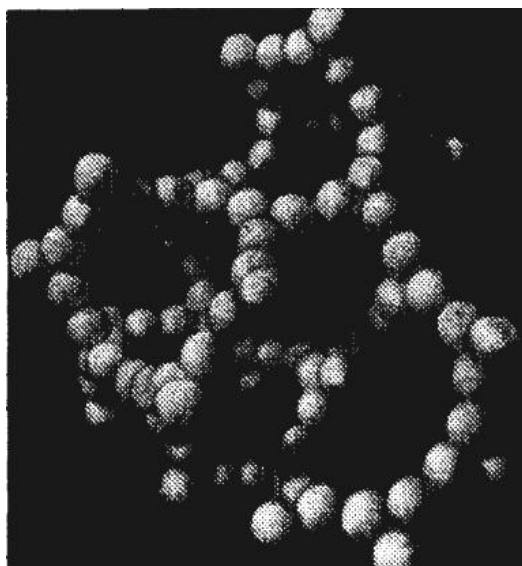


Рис. 1. Структура аэрогеля диоксида кремния [8]

В 1931 г. американский ученый С. Кистлер предложил метод сверхкритической сушки, позволивший получать относительно прочные аэрогели, и эта технология дала новый импульс для разработок аэрогелей и материалов с их использованием. Этим методом проводили сушку геля в автоклаве, обеспечивающем сверхкритические температуру и давление в порах геля.

Процесс сушки гелей в сверхкритических условиях является самым технологически сложным и затратным этапом получения аэрогелей. Различают высокотемпературную и низкотемпературную сушку.

Низкотемпературная сушка (лиогельная) – процесс, популярный при получении фармацевтических препаратов, проводится при отрицательных температурах. Высушиваемый продукт подвергают заморозке, удаление влаги происходит при сублимации, т.е. фазовом переходе из кристаллического состояния сразу в парообразное. В результате такой сушки структура геля частично сохраняется, но разрушение все-таки имеет место, поэтому получаемые криогели имеют вид мелкодисперсного порошка.

При высокотемпературной сушке в реакторе создают температуру и давление выше критических для спирта, содержащегося внутри высушиваемого геля. Затем осуществляют медленный сброс давления. Когда спирт достигает критических показателей температуры и давления, он начинает проявлять свойства одновременно и жидкости, и газа и называется сверхкритическим флюидом. При снижении давления флюид начинает выходить из вещества.

Однако после высушивания часть спирта остается внутри геля, из-за чего возникает его некоторая усадка. Для устранения границы раздела фаз внутри пор высушиваемого геля вводят дополнительный растворитель, критические параметры которого приведены далее. Важно, чтобы этот растворитель создавал гомогенную смесь со спиртом, содержащимся внутри высушиваемого геля. Как правило, используют диоксид углерода. В результате происходит диффузионное замещение растворителя внутри геля на сверхкритический диоксид углерода, после чего давление снижают, диоксид углерода переходит в газообразное состояние, а исходная структура геля остается без изменений [8].

Применение технологии сверхкритических флюидов позволило получать аэрогели различных соединений, что значительно расширяло потенциальные области их применения. Высокопористую структуру аэрогеля можно использовать в качестве емкости для различных веществ и применять аэрогели в качестве матриц-носителей различных активных компонентов: лекарственных соединений, биополимеров, клеток, соединений металлов.

В 1990-е годы к аэрогелю проявили интерес специалисты NASA, в результате чего была образована компания Aspen Aerogels, Inc., продукция которой начала применяться при реализации проектов по исследованию космоса. Так, аэрогель Aspen стал наполнителем для ловушек для сбора проб, установленных на зонде Stardust. Множество аэрогелевых параллелепипедов уловили значительное количество частиц и послужили контейнерами, позволившими доставить звездную пыль на Землю. В 2006 г. зонд Stardust вернулся на Землю, и ученые получили образцы для анализа космического вещества из окружения кометы.

В настоящее время аэрогели получают для использования в различных отраслях промышленности – от медицины до строительства. В России аэрогели используются пока в основном для исследовательских целей. В Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (г. Новосибирск) и в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) получены такие аэрогели. Новосибирские ученые впервые в мире создали многослойный аэрогель, который позволит с рекордной точностью измерять скорости элементарных частиц – например, в экспериментах на большом адронном коллайдере. Оборудование с использованием аэрогелей работает в ускорителях и на борту станции «Мир»; в Антарктиде оборудование с радиатором из аэрогеля поднимали на стратостате в верхние слои атмосферы, чтобы регистрировать заряженные частицы из космоса [9].

Российские разработки по получению аэрогелей и материалов с их использованием отмечены в Институте физиологически активных веществ РАН (г. Черноголовка), Институте общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН (г. Москва), а также в ряде национальных университетов: РХТУ им. Менделеева, МГУ им. Ломоносова, Томском государственном университете [10–14].

Особо следует отметить стремительное расширение областей применения аэрогелей в качестве теплозащитных материалов. В частности, было разработано и появилось на рынке теплоизоляции большое количество композиционных материалов с использованием аэрогелей. Данная статья представляет собой обзор теплоизоляционных материалов, предназначенных для защиты как от высоких, так и от низких температур, с использованием аэрогелей.

Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов

Разрабатывать методы получения функциональных материалов с использованием аэрогелей материаловеды начали практически сразу после разработки метода получения аэрогелей различного состава. В настоящее время разработано большое количество композиционных материалов, содержащих аэрогели в сочетании с другими компонентами, придающими требуемые свойства композиту. Для теплоизоляционных и теплозащитных материалов это, как правило, неорганические тугоплавкие компоненты из числа уже используемых в качестве теплоизоляции, а именно керамические, стеклянные, минеральные волокна. В качестве аэрогелевого компонента используют как органические, так и неорганические материалы, однако, если необходима высокотемпературная теплозащита, то предпочтительно применять

неорганические аэрогели. Из неорганических аэрогелей практическое использование пока нашли только аэрогели диоксида кремния.

Методы соединения компонентов композиционного материала с использованием аэрогеля условно можно разделить на два варианта: введение вещества в аэрогель до сушки либо после нее. До сушки в сверхкритических условиях введение осуществляется либо на стадии формирования геля, либо в гель, заполненный соответствующим растворителем. После сушки в сверхкритических условиях введение армирующих компонентов осуществляется в готовый аэрогель, получаемый чаще всего с применением технологии сверхкритических флюидов.

В патенте US 5306555 (Battelle Memorial Institute, США) описан аэрогелевый матричный композит, а также способ его получения. Композит получают путем пропитки волокнистых как тканых, так и нетканых заготовок прекурсором геля, с последующей сушкой влажного геля в сверхкритических условиях. Полученный таким образом продукт имеет высокий модуль упругости, что придает ему достаточно высокую жесткость и относительно высокую теплопроводность – от 18 до 21 мВт/(м·К) [15].

Подобным образом получают композит, предложенный немецкой компанией Hoechst Actiengesellschaft в патенте US 5789075. Способ включает приготовление золя, добавление в золь неорганических или органических волокон, гелирование золя, получение в нем трещин путем деформации, сушку в сверхкритических условиях с получением аэрогеля [16]. В композите специально создают трещины управляемым образом. По утверждению авторов контролируемое образование трещин придает дополнительную гибкость композиту.

Компания Aspen Aerogels имеет ряд патентов на способы получения аэрогелей и материалов с их использованием. В частности, в патенте US 6068882 теплоизоляционный композиционный материал получают путем пропитки волокнистой матрицы раствором прекурсора аэрогеля, затем без старения золя и перехода его в гель проводят сушку в сверхкритических условиях, в результате чего получают материал, в котором аэрогель равномерно распределен внутри волокнистой матрицы [17]. Для того чтобы получить гибкий композит, волокнистая матрица должна также быть гибкой. Данная технология используется при получении серийно выпускаемых теплоизоляционных материалов, однако аэрогель в продукте скорее представляет собой аэрогелевый порошок, а не аэрогелевый монолит, поэтому изгиб изделия приводит к осыпанию существенного количества частиц порошка. Тепловые же параметры этого продукта существенно ниже по сравнению с аэрогелевым монолитом.

В патенте компании Aspen Aerogels (США) US 7078359 предложен аэрогелевый композиционный материал, который имеет упрочнение в виде волокнистого ватина из коротких волокон, получаемых распылением раствора или расплава, в сочетании с микроволокнами диаметром от 0,1 до 100 мкм извитой формы с отношением длины волокна к его диаметру от 5 до 100. По мнению авторов, такая структура волокнистой матрицы повышает теплоизоляционные свойства композита. Материалами для формирования неорганических аэрогелей являются оксиды металлов, таких как кремний, алюминий, титан, цирконий, гафний, иттрий, ванадий и т. п. [18]. Микроволокна вводят в композит путем их диспергации в прекурсор аэрогеля 1 с последующей пропиткой волокнистого ватина 3 полученной смесью в форме 2 (рис. 2). После превращения золя в гель заготовку подвергают сушке в сверхкритических условиях, получая в результате композит на основе аэрогеля с волокнистым упрочнением. Согласно данному патенту, теплоизоляционный материал может содержать несколько слоев – например, слои аэрогелевого волокнистого композита, слои волокнистого тканого или нетканого материала, металлическую сетку.

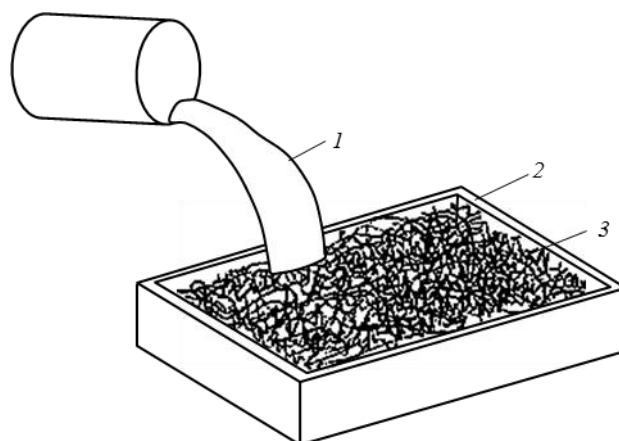


Рис. 2. Получение аэрогелевого волокнистого композита по технологии, предложенной в патенте US 7078359 [18]

В патенте компании Aspen Aerogels (США) US 7780890 предложен метод получения непрерывного полотна из аэрогеля или композиционного материала из волокна, пропитанного аэрогелем [19]. Процесс включает три основных этапа. На первом этапе происходит смешивание исходных компонентов (прекурсоры, добавки) для получения низковязкого золя, способного к непрерывной подаче на конвейер. Второй этап включает подачу золя в форму на движущемся конвейере и воздействие тепла или излучения в определенных зонах для изменения свойств золя либо для его гелирования. На третьем этапе происходит резка геля либо намотка гибкого волокнистого композиционного материала и доставка его для дальнейшей обработки.

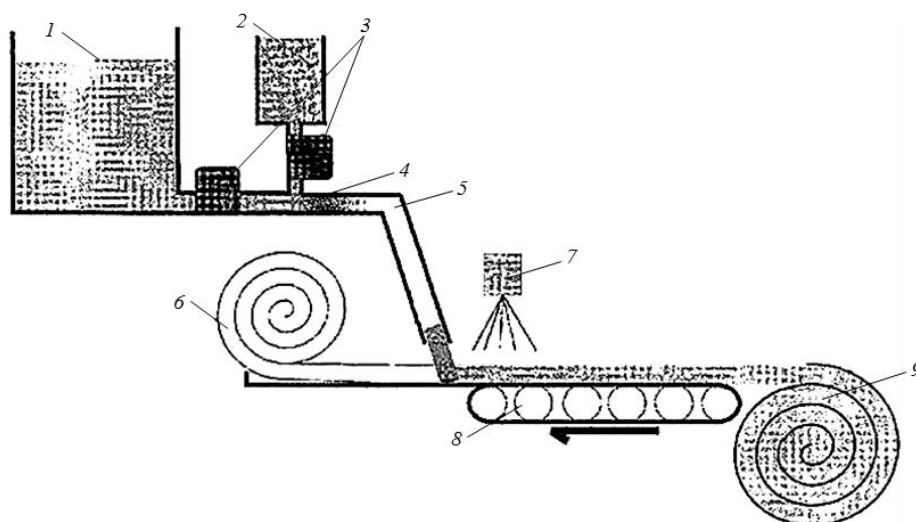


Рис. 3. Способ получения гелированных волокнистых заготовок на конвейере [19]

Стабильный золь раствора прекурсора *1* и катализатор для ускорения гелирования *2*, регулируемые клапанами *3*, через миксер *4* подают через зону *5*, где в потоке золь смешивается с катализатором (рис. 3). Волокнистый материал *6*, который может представлять собой отдельные листы или непрерывный рулон, поступает на конвейер. Устройство *7* нагревает или облучает золь или гель для изменения его свойств (например, для образования межмолекулярных связей – сшивки). Через участок конвейера *8*, обеспечивающий длину прохождения гелирования, полученная заготовка накапливается на валках *9*. Сушку гелированных листов осуществляют

с использованием сверхкритических флюидов при необходимых условиях для образования аэрогеля. Получаемый аэрогель может быть органическим или неорганическим. Неорганический аэрогель может содержать оксиды Zr, Y, Hf, Al, Ti, Ce, Si, Mg, Ca или их комбинации.

Для того чтобы аэрогели не поглощали влагу, компания Aspen Aerogels предложила вводить в состав материала гидрофобизирующие агенты. В частности, в прекурсор аэрогеля диоксида кремния предложено дополнительно вводить сопрекурсоры гелей, содержащих гидрофобные группы, такие как алкилсиланы или арилсиланы, для придания гидрофобности готовому продукту. Гидрофобная обработка может проводиться на разных стадиях получения аэрогеля введением прекурсора гидрофобизирующего агента в золь, во влажный гель или в аэрогель после извлечения жидкой фазы. В последнем случае схема получения аэрогеля включает приготовление раствора, содержащего прекурсор силикагеля и растворитель, введение в него армирующего наполнителя в виде волокон, гелирование заготовки, первую стадию сверхкритической сушки с удалением части растворителя из геля, введение гидрофобизирующего агента в полуфабрикат и вторую стадию сверхкритической сушки с получением армированного волокнами аэрогелевого композита с гидрофобными свойствами [20].

Разработав в 1990-х годах метод недорогого получения аэрогелей, компания Aspen Systems начала поставлять его на рынок. Кроме того, были получены гибридные материалы с использованием аэрогеля в композиции с другими материалами – например, аэрогель вводили в ткань или иную волокнистую структуру. В 2001 г. от компании Aspen Systems отделилась дочерняя компания Aspen Aerogels и начала производство теплоизоляции с аэрогелем для подводных нефтепроводов [21].

Американская компания Aspen Aerogels производит серийно теплоизоляцию марок: Pyrogel[®]XT на основе аэрогеля SiO₂, армированного стекловолокном с температурой эксплуатации до 650°C, и Cryogel[®]Z на основе аэрогеля SiO₂, армированного стеклянным холстом с температурами эксплуатации от -260 до +90°C (рис. 4), а также марок Spaceloft[®] и Spaceloft Subsea[®] на основе нетканого холста из стекловолокна с частицами аэрогеля SiO₂ с температурами эксплуатации от -100 до +200°C. На территории Российской Федерации официальным представителем производителя теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля компании Aspen Aerogels с 2011 г. является ООО «Объединенная промышленная инициатива». Как указывают производители, теплоизоляционные материалы обладают гидрофобными свойствами (рис. 5).

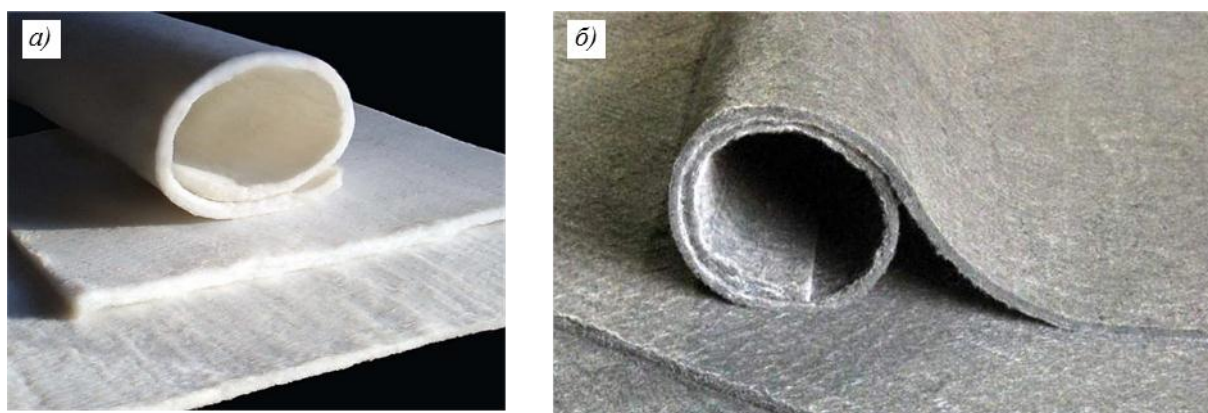


Рис. 4. Теплоизоляция марок Pyrogel[®]XT (а) и Cryogel[®]Z (б) производства компании Aspen Aerogels [21]



Рис. 5. Гидрофобный аэрогелевый композит, не смачиваемый водой [21]

Теплоизоляционные аэрогелевые материалы, поступившие в серийное производство, востребованы и у разработчиков теплоизоляции для летательных аппаратов. Компания Боинг (США) в патенте US 8357258 предложила использовать пропитанные аэрогелем волокнистые слои для изготовления теплоизоляционной керамической плитки из оксид-оксидного керамического композиционного материала для снижения ее теплопроводности [22].

Корпорация MRA Systems предложила слоистую теплоизоляцию для самолетов, содержащую аэрогелевый теплоизоляционный материал, заключенный между слоями композиционного материала, содержащего волокна в эпоксидной матрице [23].

Китайские разработчики запатентовали ряд теплоизоляционных материалов, включающих слои аэрогеля, армированного тугоплавкими волокнами в различных соотношениях и комбинациях [24–29].

Китайская компания Alison Aerogel также разработала и продает материалы на основе аэрогелей SiO_2 в виде гибкой рулонной и жесткой плиточной теплоизоляции, аналогичные производимым американским материалам [27–29]. В России официальным представителем этой фирмы является ООО «ТИМ» (Санкт-Петербург) [30].

На сайте компании указаны свойства гибкой теплоизоляции Alison Aerogel DRT 0610 (см. таблицу).

Свойства гибкой теплоизоляции Alison Aerogel DRT 0610 [30]

Плотность, кг/м ³	Максимальная температура применения, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С		Водо- поглощение, кг/м ²	Коэффициент паропроницаемости μ	Группа горючести
		10	300			
200	650	0,019	0,039	0,14	0,088	Негорючая

Теплоизоляцию с использованием аэрогелей SiO_2 также производит и поставляет, в том числе на российский рынок, Чжэнчжоуская техническая компания Joda (КНР). Материалы изготовлены на основе керамического волокна, стекловолкна и углеродного волокна; температуры их использования составляют ≤ 650 , 1000 и 650°С соответственно. Материалы применяются в основном в строительстве для теплового оборудования и труб [31].

На рынке также представлена американская корпорация Cabot с штаб-квартирой в США, у которой имеются производства в разных странах, она – мировой лидер в области специальной химии и материалов, в том числе аэрогелей. Несколько лет назад компания представила на рынок новый продукт для усиления естественного освещения светопрозрачных конструкций – аэрогель Lumira, который представляет собой полупрозрачную разновидность диоксида кремния. Производство аэрогеля налажено на современном заводе, расположенном недалеко от Франкфурта (Германия), открытом

в 2003 г. На основе этого аэрогеля компания Daylighting в ближайшее время будет поставлять на рынок систему структурного остекления AeroGlass ThermaDivide с применением аэрогеля Lumira. Система представляет собой панели из закаленного стекла с аэрогелем Lumira между ними. Это даст возможность создавать красивое, практически бесшовное фасадное остекление, с тепло- и звукоизоляцией как у сплошной стены, но с полным спектром дневного света в помещении.

Работы по совершенствованию технологий получения аэрогелей и улучшению их свойств активно ведутся во многих научных центрах. Так, в работах РХТУ (Россия) предложено получать гидрофобный аэрогель SiO_2 из ТЭОС с применением атмосферной сушки без использования сверхкритического диоксида углерода. Исходный золь готовили из ТЭОС с добавлением этанола, воды и соляной кислоты. Для повышения гидрофобности получаемого аэрогеля в золь также добавляли в качестве сопрекурсора октилтриэтоксисилан (ОТЭОС). Затем в полученный золь добавляли N,N-диметилформамид (ДМФ) и аммиак и проводили старение геля в два этапа. Сушку проводили без создания сверхкритических условий. Сравнение свойств аэрогеля, полученного с помощью тепловой сушки при атмосферном давлении, со свойствами аэрогелей, полученных в условиях сверхкритической сушки, показало, что полученный аэрогель обладает хорошими сорбционными свойствами, при этом упрощенная технология позволяет достигать низкой себестоимости [14].

Отмечены также публикации о разработке методов получения аэрогелей и ксерогелей диоксида циркония и оксида алюминия [11, 24, 32–34]. Однако сообщения об их серийном производстве не обнаружены.

Заключения

В результате проведенного изучения научно-технической литературы выяснилось, что в настоящее время в разработках развитых стран все активнее используется наноструктурированный инновационный материал – аэрогель. К широкому понятию аэрогели относят также такие его разновидности, как ксерогели и криогели, содержащие также воздух в порах, однако более плотные и имеющие порошковую структуру. Разработаны аэрогели органические, неорганические и гибридные. Аэрогели находят все более широкое применение при изготовлении тепло- и звукоизоляционных материалов в строительстве, транспортной, химической и энергетической отраслях; в качестве сорбционного материала при изготовлении фильтров; перспективны для использования в фармацевтике в качестве носителя активных веществ, а также для научных и исследовательских целей. Аэрогели выпускают в виде гранул или пластин (блоков).

На рынок теплоизоляции также поступили материалы с использованием аэрогеля. Единственный вид аэрогеля, выпускаемый серийно, – это аэрогель диоксида кремния. В качестве теплоизоляции производители предлагают волокнистые маты из стеклянных, углеродных и керамических волокон, содержащие аэрогели, а также стеклохолст с аэрогелевой пропиткой. Производство аэрогелей в основном сосредоточено в США, Европе и Китае. Безусловными преимуществами аэрогелей являются сверхлегкость, низкая теплопроводность, звукоизоляционные свойства, прозрачность для световых и радиоволн, гидрофобность и негорючесть.

Следует отметить, что промышленно производимый в настоящее время аэрогель на основе диоксида кремния способен работать до относительно невысоких температур – не более 1000°C , что связано с относительно низкой температурой плавления SiO_2 . Кроме того, использование аэрогелей в теплоизоляционных материалах ограничено высокой стоимостью их производства.

Для работы при более высоких температурах потенциально пригодны аэрогели оксидов алюминия или циркония, имеющие более высокую температуру плавления, однако технологии получения таких аэрогелей промышленно пока не отработаны. Хотя в научно-технической литературе отмечены сообщения о получении аэрогелей тугоплавких оксидов, их серийное производство пока отсутствует.

В научно-технической литературе также отмечен интерес к аэрогелям у компаний, занимающихся разработкой передовых летательных аппаратов – Boeing, NASA, MRA Systems (США), Aerospace Research Institute of Special Materials and Special Technologies (КНР) и др., которые разрабатывают теплоизоляционные материалы высокотемпературного назначения с использованием аэрогелей.

Разработка относительно недорогих технологий получения аэрогелей тугоплавких оксидов и их применение для создания новых видов высокотемпературной теплоизоляции является актуальной задачей для материаловедов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
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. Без новых материалов – нет будущего // Металлург. 2013. №12. С. 4–8.
4. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.04.2019).
5. 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: 03.04.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-3-3.
6. Бучилин Н.В., Люлюкина Г.Ю. Особенности спекания высокопористых керамических материалов на основе оксида алюминия // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-40-46.
7. Истомин А.В., Беспалов А.С., Бабашов В.Г. Придание повышенной огнестойкости теплозвукоизоляционному материалу на основе смеси неорганических и растительных волокон // Авиационные материалы и технологии. 2018. №4 (53). С. 74–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-74-78.
8. Смирнов Б.М. Аэрогели // Успехи физических наук. 1987. Т. 152. Вып. 1. С. 133–157.
9. Данилюк А.Ф., Кононов С.А., Кравченко Е.А., Онучин А.П. Аэрогелевые черенковские детекторы в экспериментах на встречных пучках // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. №5. С. 540–548.
10. Лермонтов С.А., Малкова А.Н., Сипягина Н.А. и др. Управление гидрофобностью/гидрофильностью аэрогелей на основе SiO₂: роль сверхкритического растворителя // Журнал неорганической химии. 2015. Т. 60. №10. С. 1283–1286.
11. Ковалько Н.Ю., Калинина М.В., Малкова А.Н. и др. Синтез и сравнительное исследование ксерогелей, аэрогелей и порошков на основе системы ZrO₂–Y₂O₃–CeO₂ // Физика и химия стекла. 2017. Т. 43. №4. С. 415–424.
12. Шиндряев А.В., Кожевников Ю.Ю., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В. Исследование процесса получения теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. №6. С. 130–132.
13. Лебедев А.Е. Моделирование и масштабирование процессов получения аэрогелей и функциональных материалов на их основе: дис. ... канд. техн. наук. М., 156 с.

14. Иванов С.И., Цыганков П.Ю., Худеев И.И., Меньшутина Н.В. Получение гидрофобных аэрогелей // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. 29. №4. С. 112–114.
15. Aerogel matrix composites: pat. US 5306555, No. 904777; filed 26.06.92; publ. 26.04.94.
16. Aerogel composites, process for producing the same and their use: pat. US 5789075, No. 793178; filed 17.08.95; publ. 04.08.98.
17. Flexible aerogel superinsulation and its manufacture: pat. US 6068882, No. 09/056413; filed 07.04.98; publ. 30.05.00.
18. Aerogel composite with fibrous batting: pat. US 7078359, No. 10/034296; filed 21.12.01; publ. 18.07.06.
19. Advanced gel sheet production: pat. US 7780890, No. 11/762654; filed 13.06.07, publ. 24.08.10.
20. Hydrophobic Aerogel Materials: pat. US 9868843, No. 14/873753; filed 02.10.15; publ. 16.01.18.
21. Теплоизоляция с аэрогелями // Компания Aspen Aerogels Inc.: офиц. сайт. URL: www.aerogel.com (дата обращения: 27.03.2019).
22. Thermal insulation assemblies and methods the fabrication the same: pat. US 8357258, №12/983918; filed 04.01.11; publ. 22.01.13.
23. Laminate Thermal Insulation Blanket for Aircraft Applications and Process thereof: pat. 20120308369, No. 13/118867; filed 31.05.11; publ. 06.12.12.
24. Preparation method of fiber-reinforced Al₂O₃-SiO₂ aerogel material with wave transmission and heat insulation integrated function: pat. CH 106630931, No. 20161885973; filed 10.10.16; publ. 10.05.17.
25. Ceramic composite material of high temperature insulation sandwich structure and method for preparing ceramic composite material: pat. CH 10264235, No. 20121120442; filed 24.04.12; publ. 22.08.12.
26. External thermal insulation material and preparation method thereof: pat. CH 106584942, No. 201611114754; filed 07.12.16; publ. 24.06.17.
27. Silicon dioxide aerogel with high specific surface area and fast preparation method thereof: pat. US 106672985, No. 20171005206; filed 04. 01.17; publ. 17.05.17.
28. Preparation system and preparation method of gel composites: pat. CH 108381949, No. 201810130441; filed 08. 02.18; publ.10.08.18.
29. Packaging method for aerogel felts, and aerogel felt packaged product: pat. CH 108910112, No. 201810901381; filed 09.08.18; publ. 30.11.18.
30. Теплоизоляция с аэрогелями (Россия) // ООО «ТИМ»: офиц. сайт. URL: www.tim-firm.ru (дата обращения: 04.04.2019).
31. Теплоизоляция с аэрогелями (КНР) // Компания Joda: офиц. сайт. URL: www.joda-tech.ru (дата обращения: 04.04.2019).
32. Preparation method of high-zirconia aerogel: pat. CH 108483493, No. 201810522250; filed 28.05.18; publ. 04.09.18.
33. Method for preparing alumina aerogel: pat. CH 108328635, No. 201810234361; filed 21.03.18; publ. 27.07.18.
34. Preparation of a metastable tetragonal zirconia aerogel: pat. US 20190023581, No. 15/518599; filed 13.10.15; publ. 24.01.19.