

Научная статья

УДК 661.183.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-69-78

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Ю.Е. Лебедева¹, Н.Е. Щеголева¹, М.В. Турченко¹, Т.М. Волобуева¹

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

Аннотация. Выявлено влияние углеродсодержащих компонентов на синтез боросиликатной системы золь-гель методом. Исследованы влияние природы (уголь, крахмал, сахар) и количества углеродсодержащего компонента на время гелеобразования, поведение геля при термообработке и сохранение в нем углерода. Время гелеобразования составило 20; 312 и 2 ч для золь системы $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ с крахмалом, сахаром и углем с крахмалом соответственно. Максимальное количество углерода содержал гель, в исходный раствор которого добавляли тонкоизмельченный уголь, а затем растворенный в воде и кислоте крахмал (24 %).

Ключевые слова: боросиликатная система, золь-гель технология, углерод, крахмал, сахар, модифицирование

Для цитирования: Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Турченко М.В., Волобуева Т.М. Влияние модифицирующих добавок на свойства материалов системы $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, полученных золь-гель методом // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-69-78.

Scientific article

MODIFYING ADDITIVES INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ SYSTEM MATERIALS PRODUCED BY SOL-GEL METHOD

Yu.E. Lebedeva¹, N.E. Shchegoleva¹, M.V. Turchenko¹, T.M. Volobueva¹

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

Abstract. The work revealed the features of the influence of carbon-containing components on the synthesis of the borosilicate system by the sol-gel method. The influence of the nature (coal, starch, sugar) and the amount of the carbon-containing component on the gelation time, the behavior of the gel during the drying process and the retention of carbon in it were studied. The gelation time was 20; 312 and 2 hours for the sols of the $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system with starch, sugar and coal with starch, respectively. The gel with finely divided coal and dissolved in water and acid starch contained a maximal amount of carbon (24 %).

Keywords: borosilicate system, sol-gel technology, carbon, starch, sugar, modification

For citation: Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Turchenko M.V., Volobueva T.M. Modifying additives influence on the properties of $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system materials produced by sol-gel method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-69-78.

Введение

Приоритетной задачей современного материаловедения, обеспечивающей достижение прогнозных показателей технологического развития российской экономики в сфере создания новых поколений изделий перспективной техники, является разработка композиционных материалов с широким диапазоном свойств, отвечающих требованиям конкретного потребителя. Функциональные композиционные структуры на основе силикатных, оксидных, карбидных систем, керамики, стеклокерамики относятся к наиболее перспективным материалам, обладающим необходимыми свойствами и отличающимися высокой технологичностью и экономичностью [1–12]. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к увеличению объемов и расширению областей применения этих материалов путем создания новых видов с повышенными функциональными характеристиками (механическая прочность и трещиностойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость, пирозлектрические характеристики) на основе новых технологий (золь-гель технология, наноструктурирование, топохимический синтез и т. д.).

При золь-гель процессе твердые материалы переходят в коллоидное состояние, занимающее промежуточное положение между истинными растворами и макроскопическими смесями. Золь представляет собой коллоидное состояние твердого вещества в избытке жидкости, его можно рассматривать как нанодисперсную систему с частицами размером от 1 до 100 нм. Гель – это коллоидное состояние жидкости, диспергированной в большом количестве твердого вещества. На всех этапах золь-гель технологии основным химическим процессом является жидкостная поликонденсация, в результате которой образуется зародышевый золь, происходит рост его частиц. Кинетика поликонденсации описывает образование межфазной поверхности при переходе истинных растворов в золи, тем самым определяя влияние начальных условий на свойства гелей и структуру конечных материалов. При получении кремнеземсодержащих золь-гелей поликонденсация обусловлена присутствием силанольных групп, которые при определенных условиях переходят в силоксановые. Характерная особенность гидрозолей кремнезема – это способность к гелеобразованию, т. е. переходу от свободнодисперсной системы к связнодисперсной.

При золь-гель технологии гелеобразование происходит в оптимальных условиях, позволяющих эффективно управлять свойствами конечного продукта, энергетическими затратами и производительностью процесса. Такой подход в сочетании с последующей термообработкой продуктов реакции лежит в основе многих современных технологий производства волокнистых материалов, световодов, стекол, покрытий, керамических мембран, пленок, изоляционных материалов, катализаторов и адсорбентов, термо- и звукоизоляционных материалов, керамики, композиционных и лакокрасочных материалов [13, 14].

Наиболее распространены следующие методы золь-гель технологии:

- гидролиз соли металла при повышенных температурах;
- частичная нейтрализация соли металла с образованием стабильного гидрозоля;
- полная нейтрализация соли металла с последующим промыванием и пептизацией осадка с образованием стабильного гидрозоля;
- гидролиз металлоорганических соединений (в частности, алкоксидов).

Синтез нанодисперсных частиц в жидкой дисперсионной среде основан на смешивании растворов солей или алкоксидов, обладающих достаточно высокой растворимостью, и образовании малорастворимых соединений в ходе химической реакции. Такими реакциями могут быть реакции обмена, восстановления, окисления, гидролиза и т. д. В основе синтеза лежит процесс гидролитической поликонденсации ионов

с образованием полиядерных гидроксокомплексов. Их дальнейшая агрегация в рамках нуклеационного процесса фазообразования приводит к формированию зародышей и появлению первичных частиц чрезвычайно малых размеров и с несовершенной (как правило, аморфной) структурой, являющейся метастабильной. В результате процессов старения в нанодисперсной системе образуется золь, гель или осадок. Изменение условий осаждения (температуры, уровня pH среды, соотношения и концентрации компонентов и т. д.) позволяет в широких пределах эффективно регулировать фазовый состав, размер и форму образующихся наночастиц [15].

Гели кремнезема можно получать из водных растворов кремниевых кислот или на основе золь с предварительно выращенными частицами, имеющими достаточно плотную (конденсированную) структуру твердой фазы. Золь-гель технология позволяет производить как монолитные материалы (например, стекла), так и высокодисперсные порошки, обладающие пористой структурой.

Для некоторых материалов на рис. 1 указаны основные технологические стадии и их параметры.



Рис. 1. Технологическая схема получения стекла, стекловолокна и стеклопокрытия

Получение синтетических продуктов по алкокситехнологии основано на свойстве алкоксидов некоторых металлов подвергаться частичному или полному гидролизу с последующей конденсацией и образованием пространственных структур в виде гелей. Алкоксиды металлов имеют различный состав, выраженный формулой $Me(OR)_n$, где R – алкильная группа, например CH_3- , C_2H_5- и C_3H_7- . Необходимым условием получения однородного материала является полная растворимость алкоксидов в смеси спирта (или другого растворителя) и воды.

При получении золь в системе $SiO_2-B_2O_3$ традиционно в качестве исходного кремнийсодержащего компонента используют тетраэтоксисилан (ТЭОС). Это обусловлено тем, что система $Si(OC_2H_5)_4-C_2H_5OH-H_2O$ имеет большую зону нерастворимости по сравнению с системой $Si(OCH_3)_4-CH_3OH-H_2O$. В результате гидролиз в первой системе проходит менее интенсивно.

Особое внимание следует уделять выбору борсодержащего компонента и растворителей. Бор можно вводить в виде борной кислоты, а также алкоксидов – триметилбора $B(OCH_3)_3$ или триэтоксидора $B(OC_2H_5)_3$. Однако алкоксиды бора обладают большой гидролитической способностью, они быстро гидролизуются даже при взаимодействии с влагой воздуха. Так, высокая склонность трибутилбората к гидролизу не позволяет получать устойчивый раствор. В связи с этим во многих работах, посвященных синтезу продуктов в системе $SiO_2-B_2O_3$ [16–18], содержащий бор алкоксид добавляют через 3–4 ч после приготовления кремнийсодержащей части раствора и прохождения в ней реакции гидролиза. После добавления алкоксида бора для гомогенизации раствора требуется тщательное и достаточно продолжительное перемешивание. При использовании борной кислоты следует учитывать ее низкую растворимость в воде при комнатной температуре.

Одним из важных параметров приготовления растворов является выбор отношения воды к алкоксидам. Экспериментально установлено, что при получении волокна и пленок отношение должно быть <4 , в этом случае исходный гель будет иметь линейную малоразветвленную структуру. Для получения монолитных стекол отношение должно быть >4 , что позволяет достичь прочной каркасной структуры. Однако существуют граничные условия: при отношении $<0,5$ гидролиз идет очень медленно, при отношении >20 растворимость алкоксидов снижается. При синтезе кварцевого стекла установлено, что отношение воды к алкоксидам влияет на скорость и полноту процессов гидролиза и гелеобразования. Так, в зависимости от содержания воды время гелеобразования менялось с 12 ч при отношении $H_2O/TЭОС$, равном 20, до 2 мес при отношении, равном 1 [15].

Благодаря уникальным свойствам стекол системы $SiO_2-B_2O_3$ их синтезу, в частности золь-гель методом, посвящено достаточно много публикаций [16–18]. Первая из них относится к 1970-м годам [19]. Но интерес к этой системе и системам, содержащим бор, не ослабевает до сих пор. Так, в Институте керамики и стекла (Валенсия, Испания) золь-гель методом получены покрытия на основе системы $SiO_2-B_2O_3$ с содержанием оксида бора 10; 20 и 30 % (мольн.) [20]. В качестве прекурсоров применяли триметилборат, ТЭОС и метилтриоксисилан. Покрытие наносили на содоизвестковое стекло и в качестве защитного окислительностойкого покрытия на композит SiC/C . В зависимости от содержания B_2O_3 толщину покрытия варьировали от 0,6 до 1 мкм.

Ксерогели $SiO_2-B_2O_3$, допированные Eu^{3+} , приготовлены золь-гель методом с различным соотношением SiO_2 и B_2O_3 [16]. Методом ИК-спектроскопии изучена структурная эволюция перехода гелей в стекло. Показано, что при низких температурах присутствуют немостиковые связи $B-O$, с повышением температуры образуются связи $Si-O-B$, трехмерные связи появляются при температуре до 500 °С.

Золь-гель методом получали боросиликатные тонкие пленки, допированные ионами Tb^{+3} [17]. Многослойные покрытия наносили последовательным погружением стекловидной подложки в растворы. Послойность осаждения обуславливалась различными скоростями гидролиза алкоксидов кремния и бора. Изучены два раствора. Первый раствор содержал по 0,07 моля ТЭОС и этанола. В раствор вводили нитрат тербия, растворенный в минимальном количестве воды (0,6 моля). Второй раствор содержал 0,1 моля триэтилбората. Слои наносили по определенной компьютерной программе в следующей последовательности: силикатный–боратный–силикатный. После нанесения каждого слоя проводили термообработку при температуре 550 °С в течение 5 мин на воздухе ламповым нагревателем. После нанесения первого слоя формировалась пористая стекловидная SiO_2 -содержащая пленка, которая пропитывалась раствором триэтилбората. После обжига силикатных и боратных золь-гель стекловидных слоев образовывался боросиликатный каркас, допированный ионами тербия.

Низкотемпературным методом синтезировали бесвинцовую глазурь в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [18]. Тугоплавкие компоненты Al_2O_3 и SiO_2 вводили через алкоксиды – ТЭОС и бутоксид алюминия. Гомогенный гель получали гидролизом раствора, содержащего 5 молей воды на 1 моль алкоксидов, смеси этанола и бутанола в качестве растворителей и соляную кислоту в качестве катализатора ($\text{pH} = 3$). Остальные сырьевые компоненты вводили в гелевое покрытие. Исследование показало, что глазурное покрытие было аморфным, гомогенным. Температура плавления глазури снижалась на 30–130 °С.

Керамические материалы на основе карбида кремния отличаются тем, что при высоких температурах в процессе взаимодействия с кислородом окружающей среды на поверхности изделия образуется пластичный слой стеклофазы оксида кремния, в значительной мере замедляющий взаимодействие материала с кислородом. Однако при эксплуатации изделия в защитной пленке могут образовываться микротрещины вследствие разницы температурного коэффициента линейного расширения карбидокремневой основы и защитного слоя, а также частичной его кристобалитизации. Все это ухудшает эксплуатационные характеристики изделий. В связи с этим состав керамоматричного композита типа $\text{SiC}-\text{SiC}$ должен быть самозалечивающимся. Одним из способов самозалечивания микротрещин может быть образование при высоких температурах пластичных стеклофаз в системе $\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ [9].

Цель данной работы – исследование влияния модифицирующих углеродсодержащих добавок на свойства и процессы фазообразования золь-прекурсоров системы $\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$, перспективных для применения в керамических композиционных материалах на основе SiC .

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 14.1. «Конструкционные керамические композиционные материалы (ККМ)» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [21].

Материалы и методы

В системе $\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ в качестве базового выбран состав, содержащий 10 % (мольн.) B_2O_3 и 90 % (мольн.) SiO_2 . Золи синтезировали методом, основанным на гидролизе и поликондсации алкоксида кремния. Учитывая высокую скорость гидролиза алкоксидов, в качестве борсодержащего компонента применяли борную кислоту. В качестве растворителя использовали этанол, катализатора процесса – соляную кислоту. Характеристика сырьевых компонентов приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика компонентов

Компонент	Формула	Молекулярная масса, г/моль	Плотность, г/см ³	Температура кипения, °С	Температура плавления, °С
Борная кислота	H_3BO_3	61,83	1,435	–	185
Тетраэтоксилан	$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	208,33	0,935	167,5	–82,5
Соляная кислота	HCl	36,5	1,184	61	–17
Вода	H_2O	18,01	1,000	100	–
Этанол	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46,07	0,806	78,3	–14,1

Последовательность приготовления растворов: борную кислоту растворяли при перемешивании в воде, нагретой до температуры не более 100 °С, до полного растворения; отдельно готовили раствор ТЭОС, воды, спирта и соляной кислоты; растворы

смешивали; вносили предварительно подготовленную углеродсодержащую добавку. Исследовано три вида углеродсодержащих добавок, которые готовили следующим образом:

- крахмал предварительно растворяли в воде и соляной кислоте (состав 1);
- сахар растворяли в воде (состав 2);
- измельченный до тонкодисперсного состояния уголь добавляли в раствор, интенсивно перемешивали и затем добавляли крахмал, предварительно растворенный в воде и соляной кислоте (состав 3).

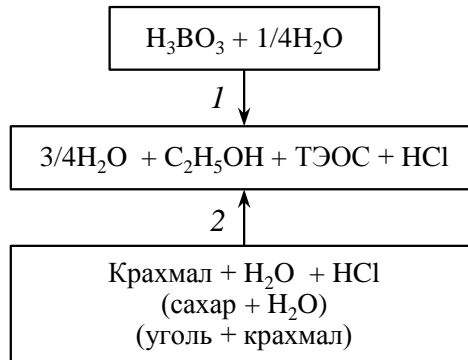


Рис. 2. Схема приготовления растворов системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с модифицирующими добавками

Таблица 2

Состав и количество добавок (на 100 г золя)

Компонент	Масса компонента, г, в составе		
	1	2	3
Крахмал	0,3	–	1
Сахар	–	1,6	–
Уголь	–	–	1

Схема приготовления растворов приведена на рис. 2, состав и количество углеродсодержащих добавок в табл. 2.

Результаты и обсуждение

Золь системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с крахмалом был однородным, опалесцирующим. Время гелеобразования составило 20 ч. Гель немного растрескался после термообработки (рис. 3).

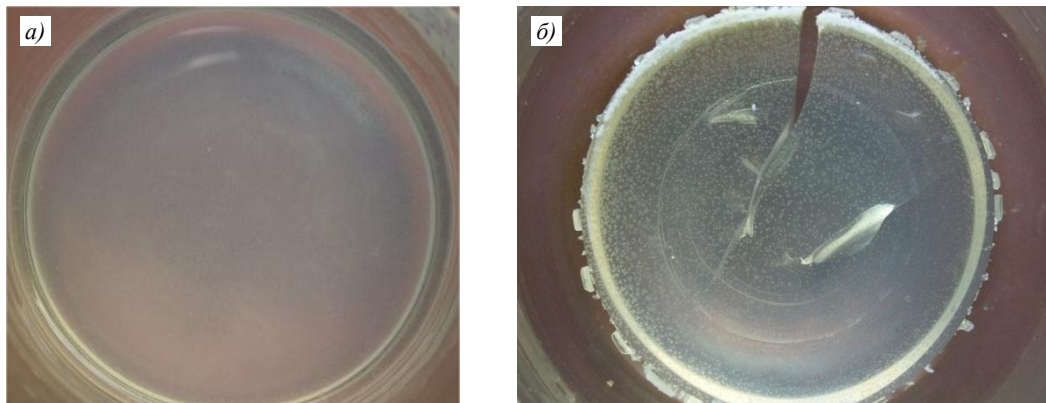


Рис. 3. Внешний вид золя (а) и геля (б) системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с крахмалом

Золь системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с сахаром получился прозрачным. На 10-й день гелеобразования (вязкость практически не изменилась) был подвергнут нагреванию при температуре $80\text{ }^\circ\text{C}$. Время гелеобразования составило 312 ч. Гель растрескался, стал желтого цвета (рис. 4).

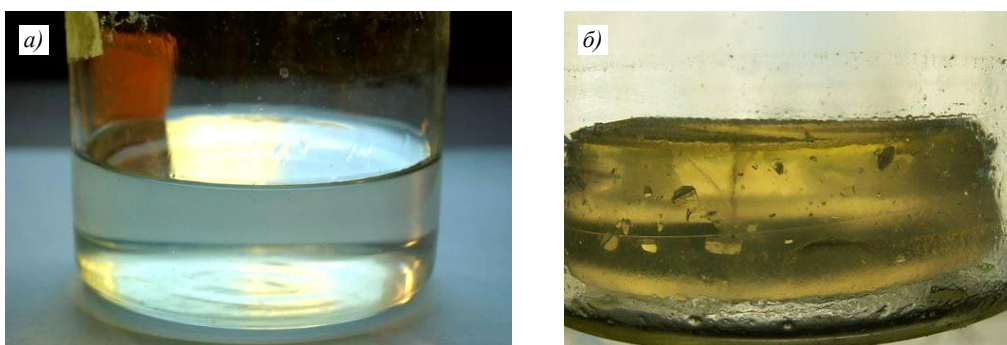


Рис. 4. Внешний вид золя (а) и геля (б) системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с сахаром

Золь системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с углем получился черного цвета. Гель образовался практически сразу – в течение 2 ч (рис. 5).

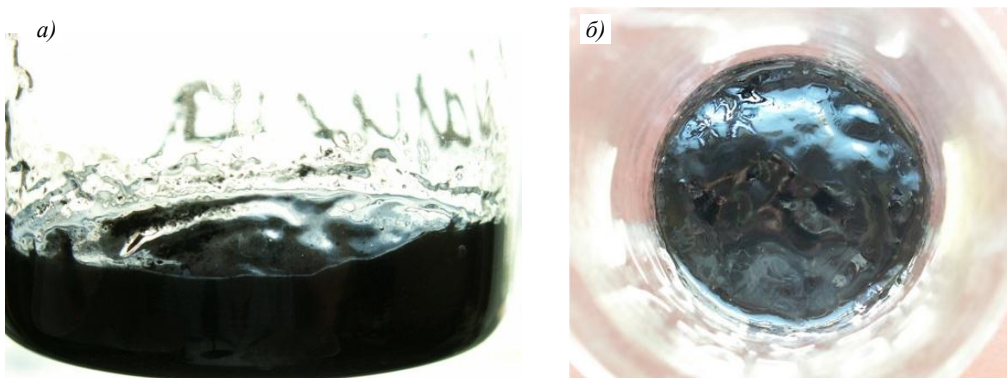


Рис. 5. Внешний вид золя (а) и геля (б) системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с углем

На рис. 6–8 представлен внешний вид термообработанных при температуре $350\text{ }^\circ\text{C}$ гелей с модифицирующими добавками, показывающий наличие углерода в составе. Гель с крахмалом был термообработан также при температуре $500\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 6, б), в результате чего цвет изменился с черного до янтарного – количество углерода в материале уменьшилось.

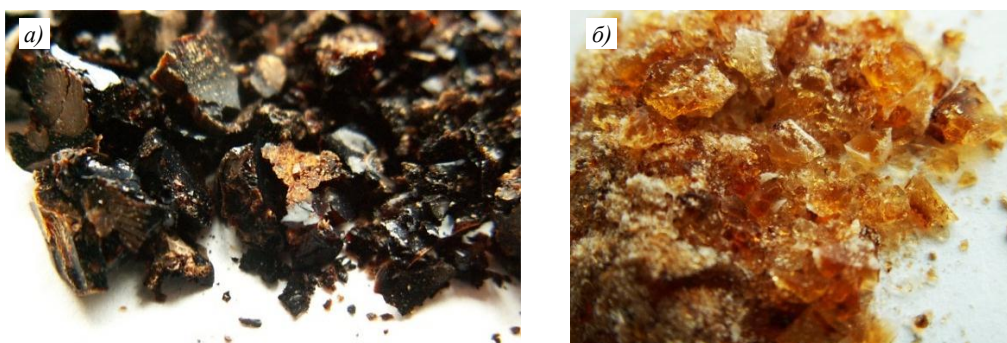


Рис. 6. Внешний вид геля с крахмалом, подвергнутого термообработке при температуре $350\text{ }^\circ\text{C}$ (а) и $500\text{ }^\circ\text{C}$ (б)



Рис. 7. Внешний вид термообработанного геля с сахаром (температура термообработки 350 °С)

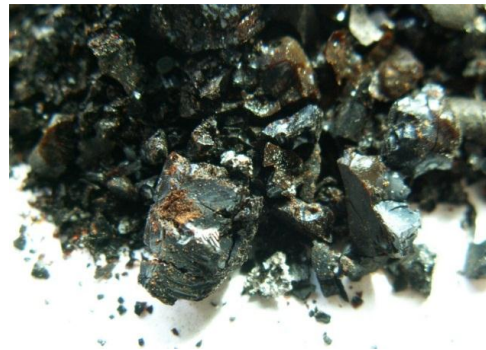


Рис. 8. Внешний вид термообработанного геля с углем и крахмалом (температура термообработки 350 °С)

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии установлено, что разложение углеродной составляющей происходит в интервале температур 410–720 °С. При этом масса состава 1 уменьшилась на 11 %, состава 2 – на 13 %, состава 3 – на 24 %.

Заключения

Установлено, что природа углеродсодержащего компонента влияет на время гелеобразования, цвет получаемого геля и его поведение при термообработке. Максимальное время гелеобразования отмечено для системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3$ с сахаром. Совместное присутствие крахмала и угля резко повышает склонность к образованию геля. Максимальное количество углерода содержал гель, в исходный раствор которого добавляли тонкоизмельченный уголь, а затем растворенный в воде и кислоте крахмал (24 %).

Список источников

1. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Сорокин О.Ю. Керамические материалы в авиационном двигателестроении (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
2. Кузнецов Б.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Осин И.В. Синтез модельных высокотемпературных керамических матриц методом искрового плазменного спекания и изучение их свойств для получения композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
3. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
4. Воронов В.А., Чайникова А.С., Лебедева Ю.Е., Житнюк С.В. Получение, физико-механические и триботехнические свойства горячепрессованного углерод-керамического композиционного материала на основе карбида кремния // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 03.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
5. Wang L., Fan S., Sun H. et al. Pressure-less joining of SiCf/SiC composites by $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ glass: Microstructure and properties // Ceramic International. 2020. Vol. 46. No. 17. P. 27046–27056.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 7–11.
7. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Самородова О.Н. Оксидное волокно с покрытием карбида кремния для создания композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.

8. Wang X., Zhao J., Cui E. et al. Nano/microstructures and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-WC-TiC}$ ceramic composites incorporating graphene with different sizes // *Materials Science & Engineering A*. 2021. Vol. 812. Art. 141132.
9. Cabet C. Review: Oxidation of SiC/SiC Composites in Low Oxidizing and High Temperature Environment // *Materials Issues for Generation IV Systems*. NATO Science for Peace and Security. Series B: Physics and Biophysics. 2008. P. 351–366.
10. Lee K.N., Fox D.S., Eldrige J.I. et al. Miller Upper temperature limit of Environmental Barrier Coatings based on mullite and BSAS // *Journal of American Ceramic Society*. 2003. Vol. 86. No. 8. P. 1299–1306.
11. Jacobson N.S. Corrosion of Silicon-Based Ceramics in Combustion Environments // *Journal of American Ceramic Society*. 1993. Vol. 76. No. 1. P. 2–28.
12. Каблов Е.Н., Чайникова А.С., Щеголева Н.Е., Гращенко Д.В., Ковалева В.С., Белянчиков И.О. Синтез, структура и свойства алюмосиликатной стеклокерамики, модифицированной оксидом циркония // *Неорганические материалы*. 2020. Т. 56. № 10. С. 1123–1129.
13. Alhaji A., Shoja Razavi R., Ghasemi A. et al. Modification of Pechini sol-gel process for the synthesis of $\text{MgO-Y}_2\text{O}_3$ composite nanopowder using sucrose-mediated technique // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. P. 2541–2548.
14. Zanurin N.A., Johari J., Alias H. et al. Research progress of sol-gel ceramic coating: a review // *Materials today: proceedings*. 2022. Vol. 48. Part 6. P. 1849–1854.
15. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. М.: Академкнига, 2006. 309 с.
16. Tonooka K., Shimokawa K., Nishimura O. Preparation and luminescent properties of sol-gel derived $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$: Tb glass films // *Solid State Ionics*. 2002. Vol. 151. Is. 1–4. P. 105–110.
17. Grandi S., Tomasi C., Cassinelli V. et al. $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ xerogels: The problem of boron leaching // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012. Vol. 358. Is. 14. P. 1631–1637.
18. Медведев Е.Ф., Минько Н.И. Особенности синтеза в водной среде силикатных и боросиликатных стекломатериалов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 10. С. 156–165.
19. Charles R.J. Metastable immiscibility of the $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system // *Journal of American Ceramic Society*. 1968. Vol. 51. Issue 1. P. 220–225.
20. Villegas M.A., Aparico M., Duran A. Thick sol-gel coatings based on the $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1997. Vol. 218. P. 146–150.
21. 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.

References

1. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Sorokin O.Yu. Ceramic materials aviation engineering (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 06, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
2. Kuznetsov B.Yu., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L., Osin I.V. Synthesis of model high-temperature ceramic matrices by the method of spark plasma sintering and the study of their properties for the production of composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
3. Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 06, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
4. Voronov V.A., Chainikova A.S., Lebedeva Yu.E., Zhitnyuk S.V. Production, physico-mechanical and tribotechnical properties of hot-pressed carbon-ceramic composite material on the basis of silicon carbide. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 03, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
5. Wang L., Fan S., Sun H. et al. Pressure-less joining of SiCf/SiC composites by $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass: Microstructure and properties. *Ceramic International*, 2020, vol. 46, no. 17, pp. 27046–27056.
6. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. High-Temperature Structural Composite Materials Based on Glass and Ceramics for Advanced Aircraft Products. *Steklo i keramika*, 2012, no. 4, pp. 7–11

7. Babashov V.G., Varrik N.M., Maksimov V.G., Samorodova O.N. Oxide fiber coated with silicon carbide for producing composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 06, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
8. Wang X., Zhao J., Cui E. et al. Nano/microstructures and mechanical properties of Al₂O₃-WC-TiC ceramic composites incorporating graphene with different sizes. *Materials Science & Engineering A*, 2021, vol. 812, art. 141132.
9. Cabet C. Review: Oxidation of SiC/SiC Composites in Low Oxidizing and High Temperature Environment. *Materials Issues for Generation IV Systems. NATO Science for Peace and Security. Series B: Physics and Biophysics*, 2008, pp. 351–366.
10. Lee K.N., Fox D.S., Eldrige J.I. et al. Miller Upper temperature limit of Environmental Barrier Coatings based on mullite and BSAS. *Journal of American Ceramic Society*, 2003, vol. 86, no. 8, pp. 1299–1306.
11. Jacobson N.S. Corrosion of Silicon-Based Ceramics in Combustion Environments. *Journal of American Ceramic Society*, 1993, vol. 76, no. 1, pp. 2–28.
12. Kablov E.N., Chainikova A.S., Shchegoleva N.E., Grashchenkov D.V., Kovaleva V.S., Belyanchikov I.O. Synthesis, structure and properties of aluminosilicate glass ceramics modified with zirconium oxide. *Inorganic Materials*, 2020, vol. 56, no. 10, pp. 1123–1129.
13. Alhaji A., Shoja Razavi R., Ghasemi A. et al. Modification of Pechini sol-gel process for the synthesis of MgO-Y₂O₃ composite nanopowder using sucrose-mediated technique. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, pp. 2541–2548.
14. Zanurin N.A., Johari J., Alias H. et al. Research progress of sol-gel ceramic coating: a review. *Materials today: proceedings*, 2022, vol. 48, part 6, pp. 1849–1854.
15. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. *Fundamentals of the sol-gel technology of nanodispersed silica*. Moscow: Akademkniga, 2006, 309 p.
16. Tonooka K., Shimokawa K., Nishimura O. Preparation and luminescent properties of sol-gel derived SiO₂-B₂O₃: Tb glass films. *Solid State Ionics*, 2002, vol. 151, is. 1–4, pp. 105–110.
17. Grandi S., Tomasi C., Cassinelli V. et al. SiO₂-B₂O₃ xerogels: The problem of boron leaching. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, is. 14, pp. 1631–1637.
18. Medvedev E.F., Minko N.I. Features of the synthesis of silicate and borosilicate glass materials in an aqueous medium. *Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov*, 2016, no. 10, pp. 156–165.
19. Charles R.J. Metastable immiscibility of the B₂O₃-SiO₂ system. *Journal of American Ceramic Society*, 1968, vol. 51, is. 1, pp. 220–225.
20. Villegas M.A., Aparico M., Duran A. Thick sol-gel coatings based on the B₂O₃-SiO₂ system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1997, vol. 218, pp. 146–150.
21. 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.

Информация об авторах

Лебедева Юлия Евгеньевна, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Щеголева Наталья Евгеньевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Турченко Максим Витальевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Волобуева Татьяна Михайловна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yulia E. Lebedeva, Deputy Head of Laboratory for Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya E. Shchegoleva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim V. Turchenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana M. Volobueva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.03.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.03.2023.
The article was submitted 23.03.2023; approved and accepted for publication after reviewing 29.03.2023.