

УДК 666.762

*О. Б. Скородумова¹, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8962-0155)**О. В. Тарахно¹, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-3911-4385)**В. А. Крадожон¹, курсант (ORCID 0000-0001-8037-9636)**М. Є. Тополь¹, студент (ORCID 0000-0001-8268-1353)**М. П. Галайда², к.т.н., асистент (ORCID 0000-0003-0157-739X)**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна
Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ХІМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ПОВЕРХНІ ГІБРИДНИХ ГЕЛІВ SiO₂ – ПРЕКУРСОРІВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Гібридні золі SiO₂ широко використовуються в якості прекурсорів захисних покриттів по оптичному склу, ентеросорбентів різного призначення, високодисперсних наповнювачів, добавок, що модифікують і т.д. Це обумовлене технологічною гнучкістю золь-гель процесу одержання таких гелів: коригуванням кінетичних параметрів проведення гідролізу і поліконденсації кремнійорганічних компонентів можна отримувати задану дисперсність і форму частинок як гелевого порошку, так і кремнеземистого порошку після випалу. Останнім часом гібридні гелі використовують в якості ефективних композицій для вогнезахисту текстильних матеріалів. Численні публікації за цим питанням зосереджені на дослідженні впливу складу гібридного гелю на вогнестійкість захисних покриттів, але залишаються нез'ясованими і тому вимагають додаткового вивчення основні фактори, що впливають на зміну еластичності гібридних гелів SiO₂ та матеріалів на їх основі. В статті розглядається взаємозв'язок технологічних параметрів отримання золю, хімії поверхні гібридних гелів SiO₂ і фізико-хімічних властивостей отриманих на їх основі функціональних матеріалів. Для досліджень використовувались кислі золи тетраетоксисилану, отримані в присутності різних типів органічних розчинників: спирту (етанол), кетону (ацетон) і складного ефіру (етилацетат). Експериментальні золі отримувались за двома найбільш поширеними в золь-гель технології методами: гідролізом ТЕОС при кімнатній температурі (холодний гідроліз) і на водяній бані при 60 °С (гарячий гідроліз). Показано, що еластичність волокон і покриттів SiO₂ залежать від хімії поверхні і максимальна за умови мінімальної кількості основних центрів Льюїса та Бренстедовських кислотних й основних центрів.

Ключові слова: гібридні гелі SiO₂, функціональні матеріали, хімія поверхні, гідроліз, поліконденсація, еластичність

1. Вступ

Зв'язок небезпеки виникнення надзвичайної ситуації на промислових підприємствах хімічної, харчової та металургійної галузей та пожежної безпеки не викликає сумнівів. Дотримання норм безпеки зберігання та використання агресивних і легкозаймистих матеріалів і речовин значно знижує загрозу виникнення НС. Однак, з огляду на досить щільну компоновку цехів і адміністративних будівель на сучасних підприємствах, не можна не брати до уваги рівень пожежної безпеки в цих будівлях.

У приміщеннях громадського користування крім загальних заходів пожежної безпеки використовуються спеціальні оздоблювальні матеріали, зависи і оббивні текстильні матеріали, оброблені інтумесцентними композиціями [1-3], які підвищують їх вогнестійкість. Однак при різкому нагріванні такі композиції виділяють канцерогенні речовини і отруйні гази.

Даний стан питання формує наукову проблему, вирішення якої лежить в області пошуку нових шляхів захисту оздоблювальних матеріалів, зокрема, текстильних оббивних матеріалів, від дії відкритого вогню.

Останнім часом в якості ефективних композицій для вогнезахисту текстильних матеріалів широко застосовуються кремнійорганічні гелі SiO₂, модифіковані

полікарбонатами [4, 5], фосфорорганічними сполуками [6, 7] і різними комбінаціями з аммоній- борат- або борвмісними сполуками [8, 9]. Однак процес підготовки просочувальної композиції і безпосередньо процес просочення тканин такими композиціями досить складний. Тому проблематично отримувати стабільні фізико-хімічні властивості композицій, відповідно, вогнестійкість тканин, просочених такими композиціями, може змінюватися в широких межах.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Перспективним напрямком підвищення вогнестійкості текстильних матеріалів є розробка просочувальних складів на основі гібридних золів SiO_2 , які відрізняються поліфункціональним призначенням. Вони широко використовуються в якості прекурсорів захисних покриттів по оптичному і кварцовому склу [10], ентеросорбентів різного призначення, високодисперсних наповнювачів стоматологічних композиційних матеріалів з різною морфологією, добавок, що модифікують в технології технічної кераміки і вогнетривких бетонів і т.д. [11, 12]. Широка область застосування обумовлена технологічною гнучкістю золь-гель процесу: коригуванням кінетичних параметрів проведення гідролізу і поліконденсації кремнійорганічних компонентів можна отримувати задану дисперсність і форму частинок як гелевого порошку, так і кремнеземистого порошку після випалу [11, 13].

Відомо, що ступінь однорідності золів і гелів визначається механізмом поліконденсації, який залежить від концентрації іонів водню при гідролізі вихідних кремнійорганічних сполук [14]. При збільшенні швидкості гідролізу тетраетоксисилану (ТЕОС) і уповільненні процесу поліконденсації золь набуває волокноутворюючих властивостей. Однак при витягуванні волокон з таких золів принципово важливий вибір типу органічного розчинника, тому що діаметр і еластичність волокон можуть змінюватися в широкому інтервалі [14]. Тонкі покриття на основі цих золів також характеризуються різним ступенем еластичності [15].

Змінення технологічних параметрів гідролізу в присутності органічних розчинників також викликає або підвищення в'язкості золю, і, як наслідок, отримання пучків волокон, або знижує їх еластичність. Продукти, що виділяються в процесі гідролізу ТЕОС, частково випаровуються (як, наприклад, етанол), частково беруть участь в реакції поліконденсації (силаноли, силандіоли, хлорсиланоли і т.д.), а частина продуктів і напівпродуктів поліконденсації бере участь у продовженні процесу гідролізу (вода, етанол і хлорзаміщені димери-тетрамери полікремніевої кислоти) [14]. Зміна співвідношення продуктів і напівпродуктів реакцій гідролізу і поліконденсації при різних технологічних умовах проведення гідролізу призводить до отримання золів з різною в'язкістю і терміном старіння, а волокнисті порошки та покриття з них мають різну еластичність [15].

Залишаються нез'ясованими і тому вимагають додаткового вивчення основні фактори, що впливають на зміну еластичності функціональних матеріалів на основі гібридних гелів SiO_2 .

3. Мета та завдання дослідження

Метою досліджень було вивчення взаємозв'язків між технологічними параметрами отримання золю, хімією поверхні гібридних гелів SiO_2 і фізико-хімічними властивостями отриманих на їх основі волокон і покриттів.

Поставлена мета досягається вирішенням наступних завдань:

- визначення типу і кількості кислотно-основних активних центрів на поверхні глобул гелів SiO_2 ;

- вивчення впливу технологічних особливостей проведення гідролізу тетраетоксисилану на кількість кислотно-основних активних центрів на поверхні глобул гелів SiO_2 ;

- вивчення фазового складу і мікроструктури функціональних матеріалів на основі гібридних гелів SiO_2 (волоконистих порошоків і захисних покриттів по тканинах).

4. Матеріали й методи дослідження, що застосовувалися для синтезу та аналізу властивостей гібридних гелів SiO_2

Для досліджень використовувались кислі золи тетраетоксисилану, отримані в присутності різних типів органічних розчинників: спиртів (етанол), кетонів (ацетон) і складних ефірів (етилацетат).

Експериментальні золи отримувались за двома найбільш поширеними в золь-гель технології методами: гідролізом ТЕОС при кімнатній температурі (холодний гідроліз) і на водяній бані при $60\text{ }^\circ\text{C}$ (гарячий гідроліз) (рис.1). Час дозрівання золю, необхідний для формування волокнуотворюючих властивостей, змінювався в широкому інтервалі (від 1 до 12 діб).

Волокна з досліджуваних золів з оптимальним співвідношенням тетраетоксисилан / спирт / вода / кислота, доведених до в'язкості, що забезпечує волокнуотворюючі властивості, витягувались на лабораторній установці з центрифугою з обертовим диском і сушильною камерою.

Утворення волокон відбувалося за рахунок розтягування крапель тонкого струменя золю, який виливався на поверхню диска, що обертається, і їх відриву в момент придбання кутової швидкості диска (при експериментально встановлених оптимальних значеннях швидкості обертання диска, а також співвідношення діаметра диска і розміру камери). Отримані волокна сушилися в сушильній шафі при $(50\text{--}80)\text{ }^\circ\text{C}$.

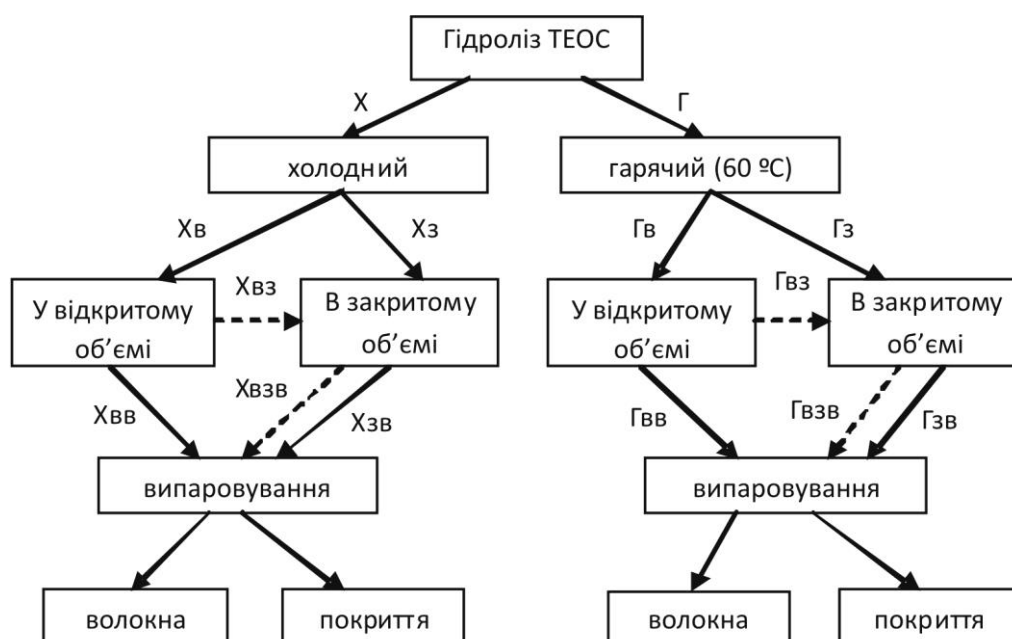


Рис. 1. Схема одержання експериментальних золів та матеріалів

Експериментальні покриття по тканинах готувались методом просочення золями тетраетоксисилану. Після просочення і видалення зайвого золю зразки сушилися в сушильній шафі при $(60\text{--}80)\text{ }^\circ\text{C}$.

Мікроструктура отриманих волокон і покриттів досліджувалась за допомогою оптичного мікроскопа XS-3320.

Механізм поліконденсації вивчався за допомогою ІЧ-спектроскопії (інфрачервоний Фур'є спектрометр Tensor 27).

У отриманих гелів досліджувались наявність і кількість активних кислотно-основних центрів на поверхні глобул, застосовуючи метод адсорбції кольорових індикаторів з водних розчинів в інтервалі рКа від -0,2 до 13 [16].

5. Результати досліджень кислотно-основних властивостей поверхні глобул експериментальних гелів

Відомо, що поверхня твердого тіла біфункціональна. Відповідно до теорії Бренстеда–Льюїса поверхня містить активні центри, здатні приймати або віддавати протон (центри Бренстеда) або, в разі наявності гетероатомів, приймати або віддавати пару електронів (центри Льюїса).

Результати визначення кислотно-основних властивостей поверхні глобул експериментальних гелів наведені в табл.1 і на рис.2 та 3.

Аналізуючи процеси, що протікають при отриманні гібридних гелів SiO₂, можна виділити на поверхні глобул гелю наступні групи атомів: ≡Si-O-Si≡, ≡Si-OH, ≡Si-OH-Si≡ (ол-групи), ≡Si-OC₂H₅, ≡Si-Cl, H-OH, C₂H₅-OH.

До жорстких основ Льюїса (Лю) відносяться: H₂O, Cl⁻ (в нашому випадку Si-Cl), OH⁻ (Si-OH), SiO₃⁻ (≡Si-O-Si≡), ROH (C₂H₅OH, що утворюється при гідролізі ТЕОС), RO⁻ (OC₂H₅ – негідролізовані групи в ТЕОС). У всіх групах присутні гетеро атоми, які мають на зовнішній оболонці неподілену пару електронів.

Табл. 1. Кислотно-основні центри на поверхні глобул експериментальних гелів

№ зр.	Розчинник	Кількість активних центрів q • 10 ⁻⁶ моль/г при рКа											
		-0,29 (Лю)	+1,5	+3,46	+5	+6,4	Σ Бк	+7,3	+8,0	+10,5	+12,8	Σ Бо	Всього
Гвзв	Етил-ацетат	4,96	8,04	7,08	1,47	1,53	18,12	5,09	1,27	0,66	1,68	8,7	31,78
Гзв		3,33	0,24	0,39	2,64	0,03	3,3	2,13	3,73	0,28	0,54	6,68	13,31
Хз		7,91	5,75	1,15	2,34	0,3	9,54	7,01	2,12	0,69	2,41	12,23	29,68
Гз		4,2	6,28	0,91	0,30	1,23	8,72	6,67	2,39	0,45	2,73	12,24	25,16
Гвв		3,34	0,11	0,74	5,89	1,55	8,29	1,36	1,86	0,21	0,32	7,09	15,38
Хвз		13,53	0,33	0,92	4,09	1,56	6,9	1,41	0,31	0,29	2,67	4,68	25,11
Хв		8,65	0,25	0,76	3,46	1,74	6,21	2,4	8,51	0,81	1,94	13,66	28,52
Хвзв		1,81	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,56	2,7	4,51
Хзв		10,71	0,36	1,83	1,98	0,74	4,91	1,27	3,02	1,49	1,56	7,34	22,96
Хзв	ацетон	10,53	0,69	1,48	6,25	1,98	10,4	1,68	2,05	0,82	2,89	14,78	28,37
Хзв	етанол	5,46	0,32	0,73	2,07	2,07	5,19	2,61	0,38	0,25	1,25	4,49	15,14

Кислотні центри Бренстеда (Бк) легко віддають протон. До них можна віднести наступні групи на поверхні глобул гелю: ≡Si-OH, ROH, ол-групи, які, віддаючи протон, переходять в оксогрупи (процес оксоляції).

Основні центри Бренстеда (Бо) можуть приймати протон. До них відносяться: RO⁻, ≡Si-OH-Si≡ (ол-групи, які, приймаючи протон, утворюють аква-групи).

Таким чином, різне поєднання кислотних і основних центрів може дати додаткову інформацію про ступінь активності поверхні, можливості утворення хімічних зв'язків між глобулами гелю. Особливо це важливо при отриманні тонких волокон тому, що вони при витягуванні відцентровим способом будуть на місцях перебування активних центрів злипатися. Для вогнестійких покриттів по текстильним матеріалам необхідно, щоб поверхня була пасивованою або містила гідрофобні ділянки для того, щоб тканина не втрачала своєї рухливості і м'якості.

6. Обговорення результатів дослідження кислотно-основних характеристик поверхні гібридних гелів

При гарячому гідролізі в закритому об'ємі на поверхні гелю, в основному, присутні центри Бренстеда: основні (OR^- , ол-групи) та кислотні ($\equiv Si-OH$, ROH , ол-групи), що свідчить про неповне проходження гідролізу ТЕОС (рис.2).

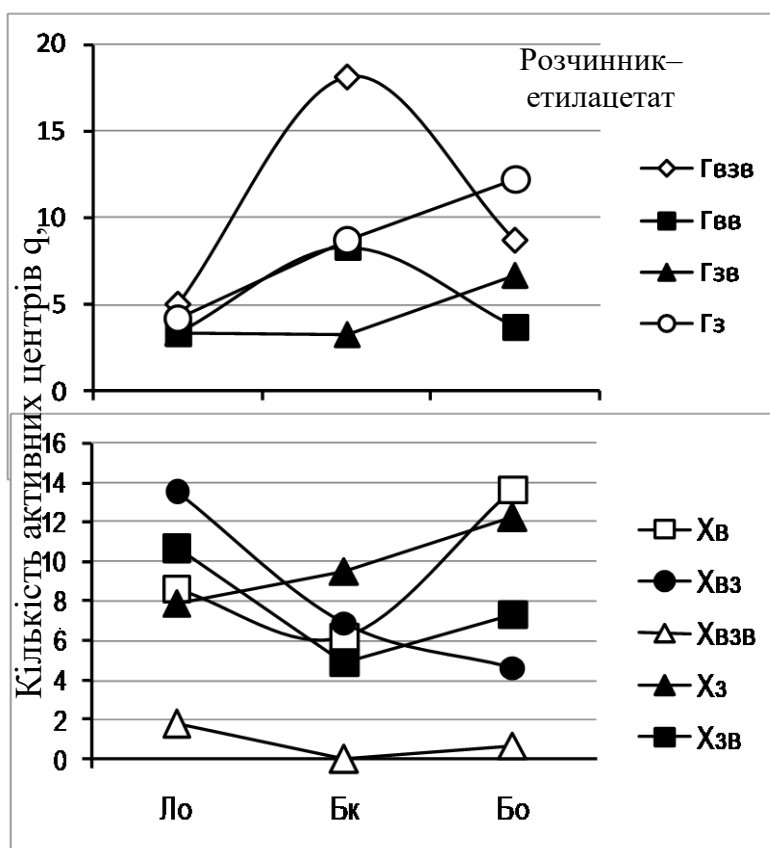


Рис. 2. Зміна кількості активних центрів на поверхні глобул гелів в залежності від способу проведення гідролізу ТЕОС

Гідроліз при нагріванні у відкритому об'ємі (Гвв) призводить до зміни хімії поверхні гелю: на графіку видно переважне утворення кислотних центрів Бк, а кількість основних центрів Бо знижується, відповідно, гідроліз проходить найбільш повно. Гідроліз в комбінованому режимі (Гвзв) супроводжується різким збільшенням кількості кислотних центрів Бк, що є наслідком утворення неоднорідностей в гелях за рахунок активізації поліконденсації в неповністю гідролізованій суміші ТЕОС і його напівпродуктів і продуктів гідролізу. Це підтверджується результатами ІЧ-спектроскопії: в гелях, отриманих у відкритому об'ємі, співвідношення висоти і ширини (I/d) смуги поглинання коливання зв'язків $Si-O$ при 1080 cm^{-1} мінімально, що свідчить про деяке збільшення кількості лінійних силосанових ланцюгів і скорочення сітчастих полімерів.

Гідроліз без нагрівання протікає практично повністю, тому кількість кислих центрів Бк помітно нижча, ніж в гелях, отриманих гарячим гідролізом. Проведення гідролізу в закритому об'ємі утримує продукти реакції від випаровування, тому, перебуваючи в реакційній суміші, сприяють утворенню основних центрів Бо, які легко гідратуються з утворенням різних комплексів і перехідних станів, що також призводить до злипання волокон при витягуванні та утворення зрощених пучків.

Занадто тривалий гідроліз призводить до утворення підвищеної кількості центрів Бо: при підсушуванні витягнутих волокон і просочених тканин спостерігається їх злипання і еластичність знижується. Отримані результати узгоджуються з даними ІЧ-спектроскопії: найменше значення I/d було зафіксовано в золях, отриманих нетривалим холодним гідролізом у відкритому об'ємі. При подальшому випаровуванні такого золю кількість активних центрів Бренстеда на поверхні глобул гелю мінімальна. Льюїсовські основні центри, що містять в якості гетероатома кисень, за нормальних умов хімічної активності не виявляють, проте під дією температури схильні до перебудови, що негативно позначається на вогнетійкості покриттів і термостабільності волокон. Тому в якості оптимального режиму гідролізу обраний Хвзв, за якого кількість центрів Ло також мінімальна.

Наведений спосіб аналізу поверхні також дозволяє коригувати інші технологічні параметри отримання еластичних волокон і покриттів. Так, на рис.3 показано, що найбільш ефективним розчинником для гідролізатів ТЕОС є етанол.

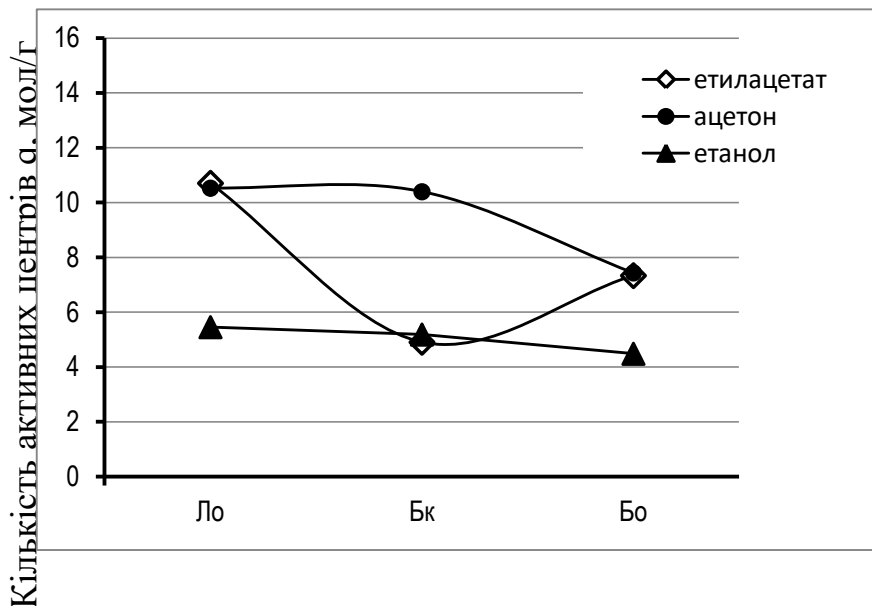


Рис. 3. Зміна кількості активних центрів на поверхні глобул гелів в залежності від типу розчинника

7. Висновки

В результаті проведених досліджень визначено тип і кількість кислотно-основних активних центрів на поверхні глобул гелів SiO_2 . Вивчено вплив технологічних особливостей проведення гідролізу тетраетоксисилану на фазовий склад, мікроструктуру та кількість кислотно-основних активних центрів на поверхні волокон та покриттів.

На основі аналізу хімічної активності поверхні глобул гібридних гелів SiO_2 встановлено взаємозв'язок технологічних параметрів отримання золю, хімії поверхні гібридних гелів SiO_2 і фізико-хімічних властивостей отриманих на їх основі

волокон і покриттів. Обґрунтовано оптимальний режим гідролізу ТЕОС і тип розчинника. Показано, що еластичність волокон і покриттів залежать від хімії їх поверхні і максимальна за умови мінімальної кількості центрів Ло, Бк, і Бо.

Отримані результати є основою для подальшого вивчення комплексних гелів SiO_2 з різним співвідношенням антипіренів та модифікаторів.

Література

1. Йулдошева О. М., Хакимова М. Ш., Рейимов А. Ф., Рафиков А. С. Коллаген – компонент композиции для огнезащитной обработки текстильных материалов // *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* 2018. № 8(53). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/6303> (дата обращения: 15.10.2018).
2. Сабирзянова Р. Н., Красина И. В., Тучкова О. А., Еналеев Р. Ш. Исследование влияния вспучивающих антипиренов на повышение огнестойкости текстильных материалов // *Вестник Казанского технологического университета.* 2014. № 3. Т. 17. С. 53–54.
3. Chuan-Mei Jiao, Xi-Lei Chen. Influence of fumed silica on the flame-retardant properties of ethylene vinyl acetate/aluminum hydroxide composites// *Journal of Applied Polymer Science.* 2010. 120(3). P. 1285–1289.
4. Rongjun Song, Liyan Chang, Bin Li. Flame retardancy and thermal properties of carboxyl-containing polysiloxane derivatives in polycarbonate // *Journal of Applied Polymer Science.* 2014. 131(5). P. 39814.
5. Shu-Mei Liu, Yan Yang, Zhi-Jie Jiang, Yan-Hui Zhou, Jian Zuo, Jian-Qing Zhao. Synergistic flame retardant effect of poly(ether sulfones) and polysiloxane on polycarbonate // *Journal of Applied Polymer Science.* 2012. 124(6). P. 4502–4511.
6. Pei Ni, Youyou Fang, Lijun Qian, Yong Qiu. Flame-retardant behavior of a phosphorus/silicon compound on polycarbonate // *Journal of Applied Polymer Science.* 2017. 135(6). P. 45815.
7. Paul Joseph, Svetlana Tretsiakova-Mcnally. Reactive modifications of some chain- and step-growth polymers with phosphorus-containing compounds: effects on flame retardance // *Polymers for Advanced Technologies.* 2011. 22(4). P. 395–406.
8. Sheng Gao, Ying Liu, Shengyu Feng, Zaijun Lu. Synthesis of borosiloxane/polybenzoxazine hybrids as highly efficient and environmentally friendly flame retardant materials // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry.* 2017. 55(14). P. 2390–2396.
9. Lin Zhou, Chuigen Guo, Liping Li. Influence of ammonium polyphosphate modified with 3-(methylacryloyl) propyltrimethoxy silane on mechanical and thermal properties of wood flour–polypropylene composites // *Journal of Applied Polymer Science.* 2011. 122(2). P. 849–855.
10. Хашковский С. В., Шорников Р. С., Шилова О. А., Полякова И. Г. Физико-химические свойства композиционных стеклокерамических покрытий, полученных из золь-гель систем: легированный кремнезоль-оксид хрома // *Физ. и химия стекла.* 2010. Т. 36. С. 555–564.
11. Скородумова О. Б., Тарахно Е. В., Олейник Д. Ю., Гончаренко Я. Н., Шуба И. В. Керамічні, композиційні матеріали й вогнестійкі покриття на основі гібридних гелів: монографія. Х.: НУЦЗУ, 2017. 102 с.
12. Drisko G. L., Sanchez C. Hybridization in materials science. Evolution, current state, and future aspirations // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2012. 2012(32). P. 5097–5105.
13. Alongi J., Ciobanu M., Carosio F., Tata J., Malucelli, G. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics treated by sol-gel process // *Journal of Applied Polymer Science.* 2011. 119. P. 1961–1969.

14. Олейник Д. Ю., Лозовской А. Ю., Скородумова О. Б., Гончаренко Я. Н. Влияние технологических параметров получения золя этилсиликата на его волокнообразующие свойства и морфологию частиц кремнеземистых порошков // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер. Хімія, хімічна технологія та екологія. Харків: НТУ «ХПІ». 2012. № 59. С. 97–101.

15. Скородумова О. Б., Тарахно О. В., Крадожон В. А., Тополь М. Є., Плетюк В. Є. Вивчення впливу органічних розчинників на фізико-хімічні властивості захисних кремнеземистих покриттів // Проблемы пожарной безопасности. 2018. Вып. 43. С. 162–167.

16. Данченко Ю. М., Качоманова М. П. Комплексна оцінка кислотно-основних властивостей поверхні дисперсних оксидних наповнювачів // Науковий вісник будівництва. 2016. Т. 86. № 4. С. 164–172.

O. Skorodumova¹, DSc, Professor, Professor of the Department

O. Tarahno¹, PhD, Associate Professor, Head of Department

V. Kradozhon¹, Cadet

M. Topol¹, Student

M. Halayda², PhD, Assistant

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Kharkiv National University of Construction and Architecture*

STUDY OF THE CHEMICAL ACTIVITY OF SiO₂ HYBRID GELS-PRECURSORS OF FUNCTIONAL MATERIALS

SiO₂ hybrid sols are widely used as precursors of protective coatings on optical glass, intestinal sorbents for various purposes, highly dispersed fillers, modifying additives, etc. Adjusting the kinetic parameters of the hydrolysis and polycondensation of organosilicon components, it is possible to obtain a given dispersion and shape of particles of both gel powder and silica powder after calcination. Recently, they are used as effective compositions for fire protection of textile materials. Numerous publications are focused on studying the effect of that hybrid gel composition on the fire resistance of protective coatings; however, the main factors affecting the change in elasticity of the SiO₂ hybrid gels and materials based on them are still unclear, therefore, they requires to be studied. The article discusses the interrelation of technological parameters for obtaining a sol, the chemistry of the hybrid gel surface SiO₂ and the physical-chemical properties of the functional materials obtained on their basis. To study those materials, we used acidic sols of tetraethoxysilane obtained with the presence of various types of organic solvents: alcohol (ethanol), ketone (acetone) and ester (ethyl acetate). The experimental sols were obtained with the two most common methods used in sol-gel technology: hydrolysis of tetraethoxysilane at room temperature (cold hydrolysis) and in a water bath heated to 60 ° C (hot hydrolysis). It is shown that the elasticity of the fibers and SiO₂ coatings depend on the chemistry of their surface and is maximum with a minimum number of basic Lewis and Brønsted acid and basic centers.

Keywords: hybrid gels SiO₂, functional materials, surface chemistry, hydrolysis, polycondensation, elasticity

References

1. Iuldosheva, O. M., Hakimova, M. Sh., Reimov, A. F., Rafikov, A. S. (2018). Kollagen – komponent kompozicii dlya ognезaschitnoi obrabotki tekstilnyh materialov. Universum: Tehnicheskie nauki: elektron. nauchn. jurn. 8(53). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/6303> (data obrascheniya: 15.10.2018).

2. Sabirzyanova, R. N., Krasina, I. V., Tuchkova, O. A., Enaleev, R. Sh. (2014). Issledovanie vliyaniya vspuchivayuschih antipirenov na povyshenie ognestoikosti tekstil'nyh materialov. Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta, 17(3), 53–54.

3. Chuan-Mei Jiao, Xi-Lei Chen (2010). Influence of fumed silica on the flame-retardant properties of ethylene vinyl acetate/aluminum hydroxide composites. Journal of Applied Polymer Science, 120(3), 1285–1289.

4. Rongjun Song, Liyan Chang, Bin Li (2014). Flame retardancy and thermal properties of carboxyl-containing polysiloxane derivatives in polycarbonate. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(5), 39814.
5. Shu-Mei Liu, Yan Yang, Zhi-Jie Jiang, Yan-Hui Zhou, Jian Zuo, Jian-Qing Zhao (2012). Synergistic flame retardant effect of poly(ether sulfones) and polysiloxane on polycarbonate. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(6), 4502–4511.
6. Pei Ni, Youyou Fang, Lijun Qian, Yong Qiu (2017). Flame-retardant behavior of a phosphorus/silicon compound on polycarbonate. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(6), 45815.
7. Paul Joseph, Svetlana Tretsiakova-Mcnally (2011). Reactive modifications of some chain- and step-growth polymers with phosphorus-containing compounds: effects on flame retardance. *Polymers for Advanced Technologies*, 22(4), 395–406.
8. Sheng Gao, Ying Liu, Shengyu Feng, Zaijun Lu (2017). Synthesis of borosiloxane/polybenzoxazine hybrids as highly efficient and environmentally friendly flame retardant materials. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 55(14), 2390–2396.
9. Lin Zhou, Chuigen Guo, Liping Li (2011). Influence of ammonium polyphosphate modified with 3-(methylacryloxy) propyltrimethoxy silane on mechanical and thermal properties of wood flour–polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(2), 849–855.
10. Hashkovskii, S. V., Shornikov, R. S., Shilova O. A., Polyakova, I. G. (2010). Fiziko-himicheskie svoystva kompozicionnyh steklokeramicheskikh pokrytii, poluchennyh iz zol'-gel' sistem: legirovannyi kremnezol'-oksid hroma. *Fiz. i himiya stekla*, 36, 555–564.
11. Skorodumova, O. B., Tarahno, E. V., Oleinik, D. Yu., Goncharenko, Ya. N., Shuba, I. V. (2017). Keramichni, kompoziciini materiali i vognestiiki pokrittya na osnovi gibridnih geliv. Harkiv: NUCZU.
12. Drisko, G. L., Sanchez, C. (2012). Hybridization in materials science. Evolution, current state, and future aspirations. *Eur. J. Inorg. Chem*, 2012(32), 5097–5105.
13. Alongi, J., Ciobanu, M., Carosio, F., Tata, J., & Malucelli, G. (2011). Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics treated by sol-gel process. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 1961–1969.
14. Oleinik, D. Yu., Lozovskoi, A. Yu., Skorodumova, O. B., Goncharenko, Ya. N. (2012). Vliyanie tehnologicheskikh parametrov polucheniya zolya etilsilikata na ego volknoobrazuyushchie svoystva i morfologiyu chastic kremnezemistih poroshkov. *Visnik nacionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskii politehnicnii institut»*. Ser. Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya. Harkiv: NTU «HPI», 59, 97–101.
15. Skorodumova, O. B., Tarahno, O. V., Kradojon, V. A., Topol, M. Ye., Pletyuk V. Ye. (2018). Vivchennya vplivu organichnih rozchinnikov na fiziko-himichni vlastivosti zahisnih kremnezemistih pokrittiv. *Problemy pojarnoi bezopasnosti*, 43, 162–167.
16. Danchenko, Yu. M., Kachomanova, M. P. (2016). Kompleksna ocinka kislotno-osnovnih vlastivostei poverhni dispersnih oksidnih napovnyuvachiv. *Naukovii visnik budivnictva*, 86, 4, 164–172.

Надійшла до редколегії: 05.09.2018

Прийнята до друку: 09.11.2018