

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕЛЕУТВОРЕННЯ  
У ВОГНЕЗАХИСНИХ КОМПОЗИЦІЯХ СИСТЕМИ ЗОЛІ  $\text{SiO}_2$  –  
ФОСФАТОВМІСНА ДОБАВКА**

*Лисак Н.М.<sup>1</sup>, аспірант,  
Скородумова О.Б.<sup>1</sup>, д.т.н., професор,  
Чернуха А.А.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,  
Кочубей В.В.<sup>2</sup>, к.х.н., доцент*

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України,  
<sup>2</sup>Львівський національний університет «Львівська політехніка»

Пожежі, що виникають під час горіння деревини, можуть становити серйозну загрозу для життя і здоров'я людини, а також призводити до значних матеріальних збитків. Тому впровадження нових технологій вогнезахисту та пошук надійних і дієвих антипіренів для цього будівельного матеріалу завжди будуть актуальними та важливими [1]. Однією із умов утворення ефективного вогнезахисного покриття для деревини є наявність у його складі стійких до термічного розкладу та енергетично стабільних хімічних зв'язків, наприклад силікофосфатних. Для добування вогнезахисних композицій, що містять зв'язки Si-O-P, часто використовують золі кремнезему. Прекурсорами Фосфору при цьому зазвичай виступають фосфорганічні речовини, оскільки важливим у даному контексті є утворення спученого карбонізованого шару, що запобігає розповсюдженню полум'я. Проте токсикологічні дослідження [2] виявили небезпеку використання таких сполук, адже ці компоненти не зв'язані хімічно з матеріалом, що захищається, і можуть вивільнитися у навколишнє середовище через вплив несприятливих кліматичних факторів або надмірних механічних навантажень.

Більш безпечними для довкілля антипіренами вважаються неорганічні фосфорвмісні сполуки. Зокрема, як компонент вогнезахисних складів привертає увагу ортофосфатна кислота. Відомо, що ця речовина відіграє роль сполучної системи при утворенні формованих вогнетривів [3], тобто можна прогнозувати ефективність вогнезахисних складів на її основі.

За результатами раніше проведених досліджень [4] встановлено, що буферні системи підвищують плинність золів кремнієвої кислоти. З іншого боку, є дані про здатність ортофосфатної кислоти утворювати у водному середовищі буферну пару  $\text{H}_2\text{PO}_4/\text{HPO}_4^{2-}$ . Цей факт доповнює аргументацію у виборі фосфорвмісної модифікувальної добавки кремнеземвмісної вогнезахисної композиції. Отже, метою роботи було дослідження впливу ортофосфатної кислоти на процеси гелеутворення в гелях  $\text{SiO}_2$ , а також вивчення структури вогнезахисних покриттів на їх основі.

Золі кремнієвої кислоти одержували змішуванням розчинів рідкого скла та оцтової кислоти. Вплив концентрації ортофосфатної кислоти (1, 2, 4 та 8 масових %) на реологічні властивості композицій вивчали методом спектрофотометрії (фотоколориметр КФК-2, довжина хвилі 490 нм). Золі з малими кількостями  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (1–2 %) мали рН 6 та втрачали текучість в інтервалі 45–70 хвилин - при цьому реалізувався лінійний механізм поліконденсації, що є передумовою для утворення покриттів з однорідною структурою. Збільшення вмісту добавки (4–8 %, рН 3–4) призводило до різкого зростання значень оптичної густини та розширювало інтервал живучості золів до 24 год (8 %).

Гелі кремнезему піддавали термообробці при 800 °С (витримка при максимальній температурі 2 год., швидкість підйому температури 4–5 °С/хв). Для сирих та термооброблених зразків здійснювали реєстрацію ІЧ-спектрів поглинання на

інфрачервоному спектрофотометрі FTIR-8400S (Shimadzu), що споряджений приставкою QATR 10 (Shimadzu) в діапазоні  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ . Величину ступеня поліконденсації оцінювали за відношенням інтенсивності (I) та ширини смуги (d) при  $1050\text{ см}^{-1}$ , що відповідає коливанням зв'язків Si-O-Si. За результатами порівняння показника I/d було підтверджено факт утворення лінійних силоксанових ланцюгів при введенні малих добавок  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

За даними ІЧ спектроскопії було ідентифіковано фазовий склад термооброблених гелів та встановлено його залежність від механізму поліконденсації. Для спектрів модифікованих композицій із вмістом ортофосфатної кислоти 2 % було зафіксовано зменшення інтенсивності смуги при  $1050\text{ см}^{-1}$  та збільшення її ширини. Це є підставою стверджувати про утворення однорідної структури покриття завдяки лінійному механізму поліконденсації, і відповідно прогнозувати його ефективну поведінку під час пожежі.

На ІЧ-спектрі термообробленого гелю з добавкою 8 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$  в області  $3200\text{--}3400\text{ см}^{-1}$  з'являється достатньо велика смуга поглинання коливання зв'язків O-H, яка вказує на наявність клатратів води в структурі гелю  $\text{SiO}_2$  та свідчить про утворення сітчастої структури. Високі концентрації ортофосфатної кислоти ініціюють кислотний механізм поліконденсації за участі іону гідроксонію і не можуть забезпечити утворення надійного вогнезахисного покриття.

Експериментальні двошарові покриття наносили на поверхню деревини ванним методом. Після нанесення кожного шару композиції дослідні зразки висушували нагріванням у сушильній шафі при температурі  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Структуру отриманих вогнезахисних покриттів оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа. Встановлено, що найбільш рівномірне та суцільне покриття утворюється при використанні золю  $\text{SiO}_2$  із вмістом  $\text{H}_3\text{PO}_4$  1 %, що є додатковим аргументом для обґрунтування складу вогнезахисної кремнеземвмісної композиції з малими добавками розглянутого фосфорвмісного компоненту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Mali, P., Sonawane, N., Patil, V., Lokhande, G.P., Mawale, R., Pawar, N.S. (2021). Morphology of wood degradation and flame retardants wood coating technology: an overview. *International Wood Products Journal*. 1. 13. 21–40.
2. Yao, C., Yang, H., Li, Y. (2021). A review on organophosphate flame retardants in the environment: Occurrence, accumulation, metabolism and toxicity. *Science of the Total Environment*. 795. 148837.
3. Leber, T., Kenn, D., Matt, F., Scheller, M., Tonnesen, T., González-Julián, J. (2024). Phosphate-bonded refractories in hydrogen containing atmosphere. *Open Ceramics*. 17. 100511.
4. Skorodumova, O., Tarakhno, O., Babayev, A.M., Chernukha, A., Shvydka, S. (2023). Study of Phosphorus-Containing silica coatings based on liquid glass for fire protection of textile materials. *Key Engineering Materials*. 954. 167–175.