

**Юрій Цапко<sup>1</sup>, Ольга Бондаренко<sup>2</sup>, Олексій Цапко<sup>3</sup>,  
Олександра Горбачова<sup>4</sup>, Сергій Мазурчук<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри технологій та дизайну виробів з деревини  
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [juriyts@ukr.net](mailto:juriyts@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [bondolya3@gmail.com](mailto:bondolya3@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8164-6473>. ResearcherID: [M-1453-2018](https://orcid.org/0000-0002-8164-6473)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс» (Київ, Україна),

доцент кафедри будівельних матеріалів

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [alekseysapko@gmail.com](mailto:alekseysapko@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2298-068X>

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій та дизайну виробів з деревини  
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [gorbachova.sasha@ukr.net](mailto:gorbachova.sasha@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7533-5628>

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій та дизайну виробів з деревини  
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [mazurchuk.s.m@ukr.net](mailto:mazurchuk.s.m@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6008-9591>

## **МЕХАНІЗМ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПУЧЕНОГО ШАРУ ПІНОКОКСУ ПРИ ВПЛИВІ МІНЕРАЛЬНИХ РЕЧОВИН**

Експериментальними дослідженнями встановлено вплив наповнювачів на роботу вогнезахисного покриття, параметри його спучення під дією температури й пригнічення, що дозволяє змінювати цей процес. У результаті термічної дії встановлено вплив наповнювачів на коефіцієнт спучування покриття на основі неорганічних та органічних речовин. Доведено, що він полягає у виникненні на поверхні матеріалу шару, який протидіє нагріванню до критичної температури та розкладанню матеріалу. Проведеними дослідженнями показано, що включення оксиду титану й гідроксиду алюмінію в кількості 5 % забезпечує досягнення найбільшого значення коефіцієнта спучення – до 47, який у 1,11 раза більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану, гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 3,3 %, в 1,12 раза більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану й тальку в кількості 5%, а також в 1,08 раза більше за значення коефіцієнта спучення при введенні гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 5 %. Виявлено вплив наповнювачів при дії високотемпературного теплового потоку на зміну процесу спучення вогнезахисного покриття та показано механізм кінетики дії наповнювачів, який характеризується зниженням швидкості та втрати маси. Підвищення стійкості вогнезахисту будівельних конструкцій забезпечується введенням наповнювачів при 700 °С, що призводить до утворення тугоплавких композицій, які запобігають вигоранню утвореного пінококсу.

**Ключові слова:** вогнестійкість, покриття, втрата маси, спучувальна здатність, температура, тугоплавкі наповнювачі, ефективність покриття.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** Деревина та вироби з деревинних матеріалів використовуються в сучасному будівництві, оскільки цей матеріал характеризується високими технологічними й декоративними показниками, екологічно чистий та має достатньо високу тенденцію щодо застосування як конструкційний матеріал. Але деревина одночасно є основним провідником поширення горіння і потребує захисту від дії джерел займання.

У зв'язку з цим велика увага приділяється вирішенню проблеми забезпечення вогнестійкості будівель і конструкцій, виконаних з деревини. Збільшити ступінь безпечної експлуатації споруд, де використовуються матеріали й вироби з деревини, припустимо за допомогою її захисного оброблення від вогню. Суть захисту деревини являє собою надання їй змоги опиратися впливу полум'я, розповсюдженню полум'я площиною, у протидії термоокислюванню деструкції та гальмуванню процесу займання.

**Постановка проблеми.** Одним із традиційних напрямів захисту від джерела вогню є зниження ймовірності загоряння матеріалів із деревини, а також обмеження його за часом дії й потужності шляхом поверхневого захисту спеціальними засобами, що мають забезпечити необхідну межу вогнестійкості та знизити швидкість поширення полум'я в умовах пожежі [1; 2].

Тому в будівництві прискореними темпами ведеться розробка новітніх якісних засобів вогнезахисту деревини, які на сьогодні мають не тільки гарантувати необхідну вогнестійкість деревини, а і зберігати її параметри експлуатації й забезпечувати довговічність.

Сучасні методи вогнезахисту деревини базуються на використанні покриттів, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів та спучуються. Проте вони при довготривалій дії полум'я здатні до послідовного вигорання й відповідно зниження вогнезахисної ефективності та потребують додавання речовин, здатних утворити більш стійкий спучений теплоізолювальний шар пінококсу. У зв'язку з цим і встановлюється потреба в проведенні досліджень у цьому напрямку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вогнезахист конструкцій із деревини полягає в забезпеченні на поверхні захисних теплоізоляційних екранів, що здатні витримати високу температуру від дії вогню пожежі. Крім того, вогнезахист дозволяє сповільнити прогрівання матеріалу та зберегти свої функціональні властивості в період заданого часу, що тим самим дозволяє перевести деревину до важкогорючих матеріалів [3].

Звичайні неорганічні покриття й вогнезахисні склади на основі алюмосилікатних речовин містять зв'язану воду, здатну під час нагрівання випаровуватися та протидіяти перенесенню тепла до деревини. При цьому як зв'язуючі речовини застосовують портландцемент, глиноземистий цемент, натрієве рідинне скло та в'язучі речовини [4]. Ці матеріали жорсткі, мають незначну еластичність й при дії температурно-вологісних коливань осипаються, що призводить до зниження естетичних показників та ефективності вогнезахисту [5]. Натомість створені покриття на основі неорганічних та органічних речовин спроможні до забезпечення на поверхні, яка захищається, спученого шару коксу. Це великою мірою знижує процеси теплопередачі [6].

Ефект від використання вогнезахисних покриттів на основі органічних речовин показано в роботі [7]. За рахунок дії антипіренів, газо- та коксоутворювачів можливо вплинути на формування спінюючого шару пінококсу. Однак підвищення стійкості, щільності та міцності досягається внаслідок модифікування органічного покриття полімерними речовинами [8]. Проте ці результати досліджень спрямовані на створення полімерно-неорганічних вогнезахисних покриттів, які не забезпечать вогнестійкість протягом тривалого часу та підвищують димоутворювальну здатність будівельних конструкцій, а також є надто дорогими.

Експериментальними дослідженнями в роботі [9] виявлено, що при додаванні наповнювачів (оксидів, гідрооксидів, боратів) до органо-неорганічних покриттів відбувається зміна структури коксового шару та безпосередньо процесу спучення покриття, але не встановлено їх вплив на теплопровідність утвореного шару пінококсу.

У роботі [10] досліджено синергічну дію поліфосфату амонію та тригідрату оксиду алюмінію як вогнезахисних компонентів для епоксидного вогнезахисного матеріалу, армованого природними волокнами. Показано також, що не постійно неармовані склади не можуть забезпечити при зміні температури якісний опір полум'ю.

Вплив структури деревини на довговічність вогнезахисних властивостей прозорого вогнестійкого покриття із застосуванням прискореного гіротермічного старіння встановлено в роботі [11]. За допомогою морфологічного аналізу та тесту на вогонь проводили аналіз ефекту старіння. У результаті проведених експериментів показано, що після 21 дня старіння вогнезахисні складові послідовно випадають на поверхню покриття. При цьому покриття втрачає спроможність до збільшення, а обвуглений шар показує пластинчасту структуру низької міцності. Покриття зменшило вогнестійкість на 43,48 % (від 23 хв до 13 хв).

У роботі [12] досліджено вогнезахисний засіб TW (FRTW) з вмістом ефіруфосфату-поліетиленгліколю (PEAG) з гарними оптичними властивостями та вогнестійкістю. При проведенні термогравіметричного аналізу TW/PEAG відбувається зменшення втрати

маси на 60 % і збільшення залишків пінококсу у 2,5 раза, у порівнянні з даними природної деревини. Це забезпечує підвищену термічну стабільність. Пікова швидкість тепловідділення, загальне тепловідділення та теплота згорання вогнезахисного засобу TW (FRTW) були знижені на 82,4, 84,3 і 80,8 % до показників, які отримані при використанні вогнезахисного засобу на основі епоксидної смоли. Про підвищення вогнезахисних характеристик TW/PEAG також свідчать обмежувальний кисневий індекс і експериментальні результати займистості. Висока вогнестійкість TW/PEAG пов'язана з вмістом ефіромфосфату-поліетиленгліколю, який забезпечив утворення теплоізоляційного шару вуглецю та знизив виділення тепла. Також TW/PEAG показав значні механічні властивості, що полягають в міцності на розрив – 153,6 МПа та модулі пружності – 2,2 ГПа. Однак не говориться про механізм дії покриття та його руйнування з часом.

Тому важливим питанням є встановлення спучувальної здатності покриттів при довготривалій дії температур та впливі компонентів, які входять до їх складу, їх ваги у забезпеченні вогнестійкості та розробці сучасних, надійних, об'єктивних методів оцінювання процесу спучення, що визначають необхідність проведення досліджень у цьому напрямі.

**Метою дослідження** є встановлення впливу на спучувальну здатність вогнезахисного покриття на основі органічних і неорганічних речовин наповнювачів, а також розроблення методів оцінювання процесу спучення та встановлення стійкості до дії високої температури отриманих композицій.

**Сировинні матеріали та методи досліджень.** У процесі проведення досліджень як сировинний матеріал використовували органо-неорганічну систему, яка складається з поліфосфату амонію (ПФА), меламіну, пентаеритриту (ПЕР) та в'язучого на основі ПВА-дисперсії, наповнювачів – діоксиду титану, тальку, гідроксиду алюмінію і магнію та їхніх сумішей.

Зразки покриттів для експерименту виготовляли на основі органо-неорганічної системи, що містить 18...20 % ПФА, 12...14 % меламіну, 10...12 % ПЕР, 16 % ПВА-дисперсії та воду. Отриману масу перемішували, вводили наповнювачі у кількості 10 % та наносили на стальну пластину товщиною 0,5...0,6 мм (рис. 1).



*Рис. 1. Зразок покриття на стальній пластині*

Джерело: розроблено авторами.

Зовнішній вигляд та структуру покриття суттєво не змінюють наповнювачі.

Для дослідження процесу структуроутворення органо-неорганічної композиції та з метою отримання її елементного складу використовували один із сучасних спектроскопічних методів дослідження речовини – рентгенофлуоресцентний аналіз. Метод РФА заснований на зборі та подальшому аналізі спектра, що виникає при опроміненні досліджуваного зразка рентгєнівським випромінюванням [13].

Відповідно до вимог [14] проводили термогравіметричний аналіз. Виконували термогравіметричне дослідження процесів деструкції в динамічному режимі з метою визначення області температур, за яких термічна деструкція деревини відбувається найбільш інтенсивно. Для цього застосовували обладнання із використанням ТА (термічного аналізу) з модулем ТГА (термогравіметричного аналізу) – Q-1500 D. У всіх дослідах маса зразка становила 190 мг, швидкість нагрівання – 5 градусів на хвилину, зразок порівняння – порошок  $\alpha$ -корунду, матеріал тиглів – алунд, чутливість гальванометрів: DTA – 250 мкВ, DTG – 500 мкВ.

**Результати обговорення.** За даними РФА (рис. 2, крива 1) фіксуються дифракційні сплески водонерозчинного поліфосфату амонію II типу –  $(\text{NH}_4)_m(\text{HPO}_4)_n$   $d = 0,939; 0,781; 0,696; 0,605; 0,566; 0,557; 0,534; 0,482; 0,486; 0,457; 0,4221; 0,389; 0,374; 0,349; 0,312; 0,307; 0,265; 0,260; 0,251; 0,248; 0,237; 0,223; 0,211; 0,201; 0,187; 0,176; 0,172; 0,168; 0,160; 0,155; 0,152$  нм.

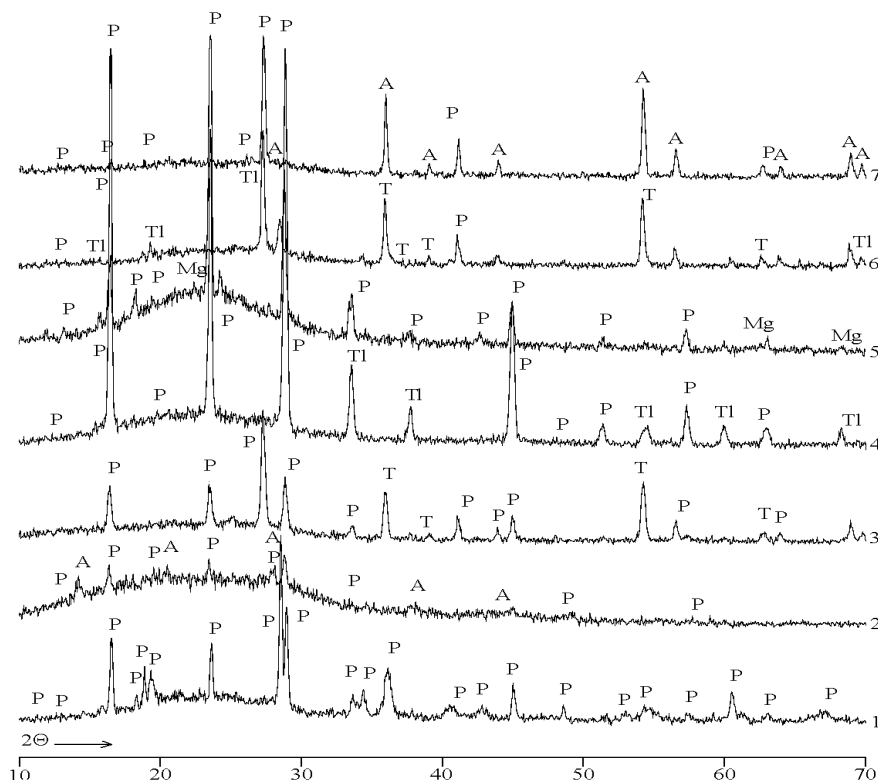


Рис. 2. Рентгенограми органо-неорганічної вогнезахисної композиції:

- 1 – органо-неорганічне; 2 – органо-неорганічне+ $\text{Al}(\text{OH})_3$  (10%);  
 3 – органо-неорганічне+ $\text{TiO}_2$  (10%); 4 – органо-неорганічне+тальк (10%);  
 5 – органо-неорганічне+ $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (10%); 6 – органо-неорганічне+ $\text{TiO}_2$  (5%)+тальк (5%);  
 7 – органо-неорганічне+ $\text{TiO}_2$  (5%)+ $\text{Al}(\text{OH})_3$  (5%)

Джерело: розроблено авторами.

Дифракційні сплески пентаеретриту та меламіну на дифрактограмі відсутні. Їх наявність підтверджується даними ДТА по ряду ендоефектів, характерних для цих складових (рис. 3, крива 1).

Для доведення даних досліджень був проведений відповідний термогравіметричний аналіз, який продемонстрував залежність втрати маси для даних композицій (рис. 3). На рис. 4 показано зразки пінококсу.

При проведенні досліджень встановлена ефективність використання наповнювачів разом із неорганічними та органічними речовинами як вогнезахисних покриттів, зокрема:

– здійснено дослідження процесу спучення вогнезахисних покриттів, визначено зміну температури та кінетику розкладу зразків при термічній дії за запропонованим способом дослідження кінетики спучування покриттів, значення якого полягає у впливі теплового потоку за певний проміжок часу на зразок, вимірюванні температури на зворотній поверхні та перед зразком і встановленні теплоізоляційних властивостей;

– випробування на модельних зразках покриттів органо-неорганічних покриттів з вмістом наповнювачів показали, що покриття на основі органо-неорганічних речовин при дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення, проте з часом йде процес вигорання пінококсу та зменшення ефекту спучення.

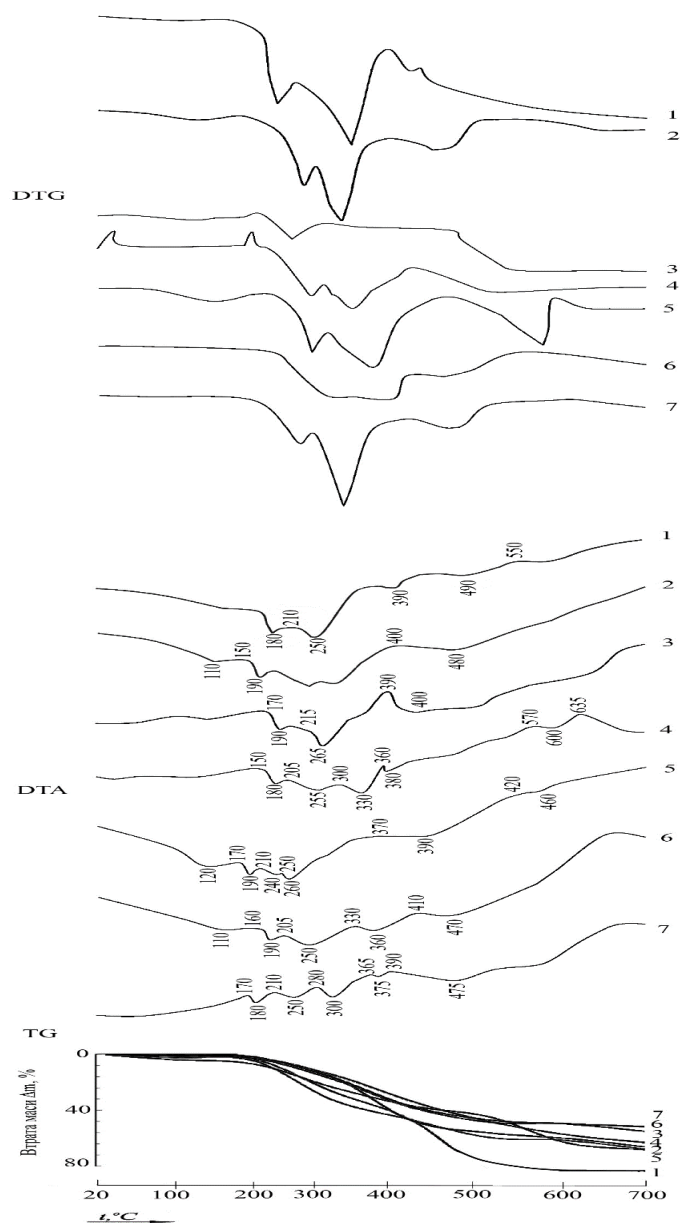


Рис. 3. Дериwатограми органо-мiнеральних вогнезахисних композицiй:  
 1 – органо-неорганiчне; 2 – органо-неорганiчне+Al(OH)<sub>3</sub> (10%);  
 3 – органо-неорганiчне+TiO<sub>2</sub> (10%); 4 – органо-неорганiчне+тальк (10%);  
 5 – органо-неорганiчне+Mg(OH)<sub>2</sub>(10%); 6 – органо-неорганiчне+TiO<sub>2</sub> (5%)+тальк(5%);  
 7 – органо-неорганiчне +TiO<sub>2</sub>(5%)+Al(OH)<sub>3</sub> (5%)

Джерело: розроблено авторами.

Натомiсть утворенню тугоплавких композицiй, що запобiгають вигоранню пiнококсу i проходженню високої температури до матерiалу, запобiгає додавання до органо-неорганiчної системи покриття наповнювачiв.

Так, на зазначенiй кривiй фiксується екзоeфект У дiапазонi температур (+) 60...70 °С, який пояснює часткове окислення (осмолення) пентаеритриту. При збiльшеннi температури вiдбувається часткова деструкцiя пентаеритриту, про що свiдчить наявнiсть ендоефектiв на кривiй ДТА при температурах: (-) 255, 300 i 350 °С, якi описують хiмiчні перетворення даної складової, а саме, проходження стадiї пiролізу з утворенням метанолу, формальдегiду з видiленням води та подальшою деструкцiєю в напрямку утворення акролену, вуглекислоти та смоляного залишку з синтезом альфаметилакролену.

Одночасно з цим процесом відбувається деструкція ПВА-дисперсії – ендоефект при температурі (-) 200 °С, який пов'язаний з виділенням оцтової кислоти та утворенням подвійних зв'язків у атомах вуглецю. Збільшення температури дії призводить до термоокислення ПВА-дисперсії екзоэффект при температурі (+) 400 °С і терморозпаду меламіну, який характеризується значним газовиділенням, що призводить до утворення поризованого шару пінококсу неупорядкованої структури (рис. 3, а).

Процес коксоутворення аналогічно проходить і для інших композицій, але дещо зі своєю специфікою. Так, введення до складу органо-неограничної композиції 10 %  $\text{Al}(\text{OH})_3$   $d = 0.309; 0.248; 0.229; 0.204; 0.169; 0.162; 0.145$  нм (рис. 1, крива 2) призводить до збільшення величини коефіцієнта спучення за рахунок двохступеневої дегідратації гідроаргіліту: ендоефекти в діапазоні температур (-) 250...300 і 500...550 °С (рис. 2, крива 2). Подальше збільшення температури впливу сприяє додатковому виділенню парів води зі структури гідроксиду та сприяє поліморфному переходу  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  і утворенню ортофосфатів алюмінію різних структурних типів з ефектом армування поризованого шару пінококсу, екзоэффект при температурі (+) 800 °С (рис. 3, б). Внаслідок проходження цих процесів структура пінококсу ущільнюється, зміцнюється за рахунок утворення більш дрібних пор порівняно з попереднім типом структури (рис. 3, а). В органо-неорганічній вогнезахисній композиції, що містить 10 %  $\text{TiO}_2$  (рис. 1, крива 3) окрім фаз поліфосфату амонію фіксуються дифракційні сплески, які характерні для  $\text{TiO}_2$  ( $d = 0,2929; 0,249; 0,168; 0,154$  нм). На кривій РФА не фіксуються дифракційні відображення, які були б характерними для фосфатів титану.

Ймовірно, що фосфати титану виду  $\text{Ti}(\text{OH})_2(\text{HPO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{Ti}(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  утворюються в результаті твердофазової реакції поміж  $\text{TiO}_2$  та продуктом часткової дефосфізації фосфату амонію  $(\text{HPO}_3)_n$ . При підвищенні температури від 300 до 600 °С на кривій ДТА відмічено ендоефект (-) 600 °С, який характерний для початку дегідратації вище зазначених фаз з утворенням безводних високотемпературних фосфатів титану (рис. 2, крива 3), які значно підвищують термоопір шару пінококсу (рис. 3, в). Макроструктура шару пінококсу складається з глобул більших розмірів порівняно з макроструктурою композиції, що вміщує 10%  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

При введенні до складу органо-неограничної композиції 10% тальку на кривій РФА (рис. 1, крива 4) фіксуються дифракційні сплески, які є характерними для цього мінералу  $d = 0,266; 0,238; 0,175; 0,171; 0,159; 0,155$  нм. Дегідратація тальку в напрямку утворення енстатиту проходить при температурі 930...950 °С. Енстатит реагує з частково дефосфізованим  $(\text{HPO}_3)_n$  з утворенням силікофосфату магнію. Ця фаза є достатньо температуростійкою й значно підвищує температуростійкість шару пінококсу. Макроструктура пінококсу дещо схожа на макроструктуру базової композиції, але відрізняється від неї своєю нерозривністю (рис. 3, г).

Введення до 10% гідроксиду магнію принципово не змінює формування макроструктури шару пінококсу (рис. 3, д). Дегідратація  $\text{Mg}(\text{OH})_2$   $d = 0,47; 0,179; 0,149$  нм (рис. 1, крива 5) відбувається в діапазоні температур 400...550 °С з утворенням  $\text{MgO}$  з подальшою його взаємодією з  $(\text{HPO}_3)_n$  в напрямку утворення фосфату магнію, як високотемпературної фази, що зміцнює структуру шару пінококсу та підвищує його стійкість до дії високих температур. Макроструктура шару пінококсу лускоподібна (рис. 3, д).

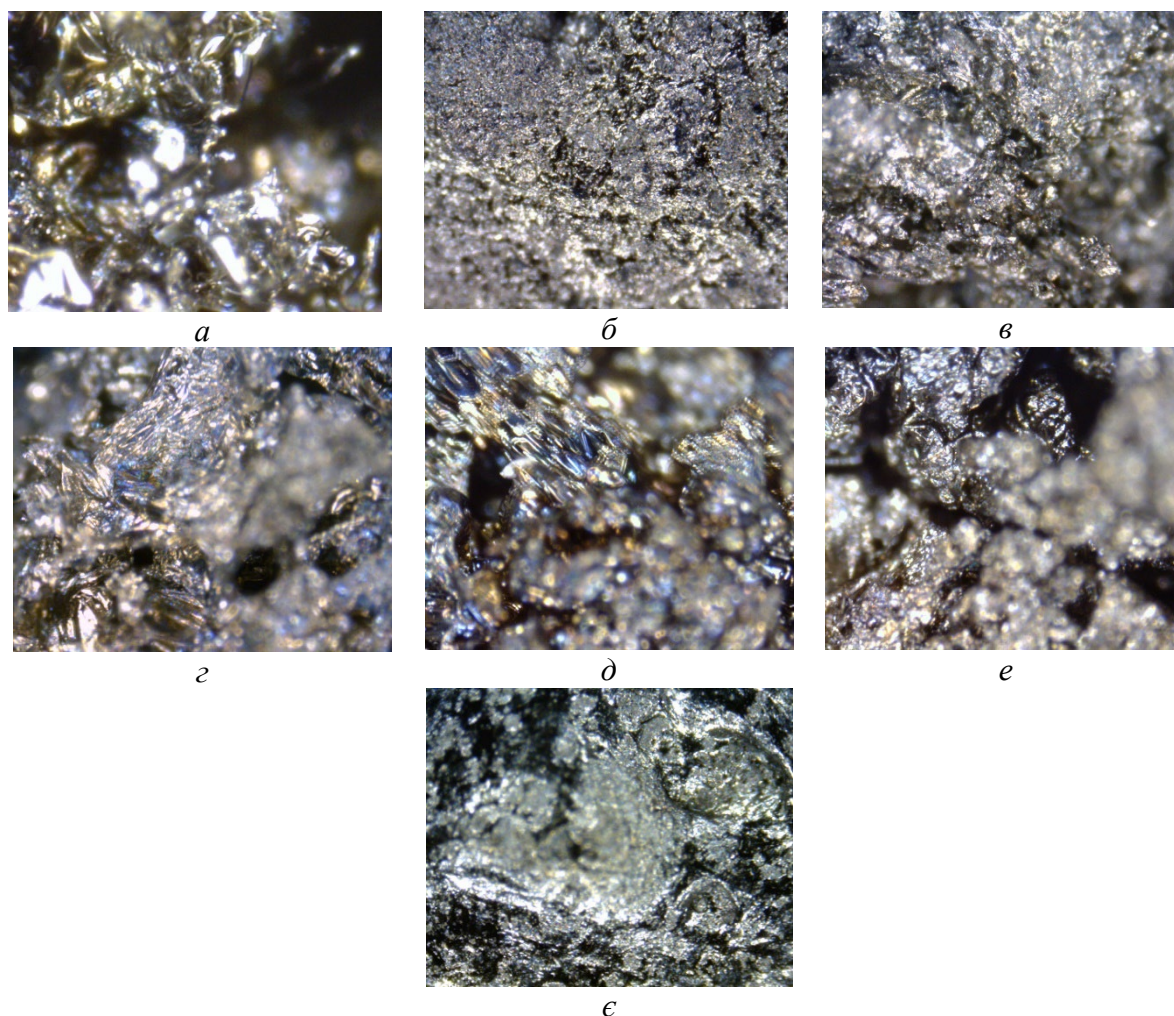


Рис. 4. Цифрові фотографії шару пінококсу після спучення при температурі 500 °С: а – органо-неорганічне; б – органо-неорганічне +  $Al(OH)_3$  (10%); в – органо-неорганічне +  $TiO_2$  (10%); г – органо-неорганічне + тальк (10%); д – органо-неорганічне +  $Mg(OH)_2$  (10%); е – органо-неорганічне +  $TiO_2$  (5%) + тальк (5%); є – органо-неорганічне +  $TiO_2$  (5%) +  $Al(OH)_3$  (5%) (збільшення фотографій у 20 разів)

Джерело: розроблено авторами.

Сумісне введення неорганічних добавок діоксиду титану та тальку в кількості 5 % не призводить до суттєвої зміни фазового складу пінококсу. На кривій РФА (рис. 1, крива б) фіксуються дифракційні сплески фосфату амонію, діоксиду титану ( $d = 0,293; 0,249; 0,168; 0,154$  нм) і тальку ( $d = 0,688; 0,33; 0,238; 0,190; 0,176; 0,142$  нм). Макроструктура шару пінококсу стає щільнішою за рахунок її армування титаномагнієвими фосфатами (рис. 3, е).

На наш погляд, найбільш доцільним є введення в склад органо-неорганічної композиції суміші діоксиду титану з гідроксидом алюмінію в кількості по 5 % кожної. На кривій РФА (рис. 1, крива 7) досить суттєво вирізняються дифракційні сплески, які характерні для поліфосфату амонію та гідроксиду алюмінію  $d=0,309; 0,248; 0,229; 0,204; 0,169; 0,162; 0,145$  нм. Дифракційні сплески для діоксиду титану характеризуються меншою інтенсивністю  $d=0,292; 0,262; 0,249; 0,2017; 0,168; 0,154$  нм. При збільшенні температури в складі продуктів можливе утворення змішаних титаноалюмінієвих фосфатів, які відрізняються від титаномагнієвих значно вищою термостійкістю. Макроструктура шару пінококсу подібна композиції, що вміщує 10% гідроксиду алюмінію, але відрізняється від неї більшим ступенем упорядкованості (рис. 3, є).

Визначено, що включення мінеральних наповнювачів до складу органо-неорганічної системи в кількості 10 % забезпечує збільшення коефіцієнта спучення від 30 до 36,7, що в 1,5...1,84 рази більше від значення коефіцієнта спучення органо-неорганічної композиції без наповнювачів оптимального складу. Включення до складу органо-неорганічної системи до 10 %  $\text{TiO}_2$  забезпечує зменшення коефіцієнта спучення в 1,74...2,13, порівняно з вищенаведеними добавками та в 1,16 рази, порівняно з композицією без наповнювачів, однак суттєво збільшує термічну стійкість утвореного пінококсу.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У результаті проведених досліджень показано, що введення оксиду титану та гідроксиду алюмінію в кількості 5 % сприяє досягненню найбільшого значення коефіцієнта спучення – до 47, який у 1,11 рази більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану, гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 3,3 %, в 1,12 рази більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану й тальку в кількості 5 %, а також у 1,08 рази більше за значення коефіцієнта спучення при введенні гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 5 %.

Встановлено, що при високій температурі органо-неорганічне покриття здатне до значної втрати маси. Так, при 700°C включення наповнювачів призводить до утворення тугоплавких композицій, які протидіють вигоранню утвореного пінококсу. При цьому збільшується ефективність вогнезахисту будівельних конструкцій.

На основі фізико-хімічних методів досліджень показано, що введення в склад органо-неорганічної композиції суміші діоксиду титану з гідроксидом алюмінію в кількості по 5 % кожної призводить до збільшення коефіцієнта спучення, упорядкованості структури шару пінококсу, підвищення його термостійкості за рахунок дегідратації змішаних титаноалюмінієвих фосфатів.

Подальші дослідження будуть направлені на теоретичне та експериментальне вивчення процесів горіння матеріалів із деревини, а також встановлення взаємозв'язку між властивостями й складовими засобів захисту.

#### Список використаних джерел

1. Tsapko, Yu. Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples / Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko // *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 2, No10 (98). – Pp. 49-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591.
2. Tsapko, Yu. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples / Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko // *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 1, No10 (97). – Pp. 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644.
3. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen / S. Krüger, G. J. G. Gluth, M. B. Watolla, M. Morys, D. Häßler, B. Schartel // Berlin, Bautechnik. – 2016. – Vol. 93, Is. 8. – Pp. 531-542.
4. Tsapko Yu. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings / Yu. Tsapko, A. Tsapko // *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 3, No 10 (87). – Pp. 50-55.
5. Heat and Sound Insulation Material Prepared Using Plant Raw Material / V. G. Babashov, A. S. Bepalov, A. V. Istomin, N. M. Varrik // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2017. – Vol. 58(2). – Pp. 208-213.
6. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber / Na Xiao, Xue Zheng, Shuping Song, Junwen Pu // *United States: BioResources*. – 2014. – Vol. 9, No 3. – Pp. 4924-4933.
7. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood / M. Gaff, F. Kačík, M. Gašparík, L. Makovická Osvaldová, H. Čekovská // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 200. – Pp. 551-558.
8. Zhao P. Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate / P. Zhao, C. Guo, L. Li // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Pp. 1-9.



9. Carosio, F. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds / F. Carosio, J. Alongi // *Acs applied materials & Interfaces. – Eletttronico.* – 2016. – Vol. 8 (10). – Pp. 6315-6319.
10. Khalili P. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy comp / P. Khalili, K.Y. Tshai, D. Hui, I. Kong // *Composites Part B: Engineering.* – 2017. – Vol. 114. – Pp. 101-110.
11. Experimental study on hygrothermal accelerated aging effects of transparent fire resistive wood structure coatings / T. Zhang, H. Huang, X. Ge, Z. Zhang, P. Li // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2022. – № 2194 (1). – 012038. DOI:10.1088/1742-6596/2194/1/012039.
12. Highly fire-retardant optical wood enabled by transparent fireproof coatings / T. Chu, Y. Gao, L. Yi, Q. Huang, Z. Wang // *Advanced Composites and Hybrid Materials.* – Vol. 5 (3). – 2022. – Pp. 1-9. DOI:10.1007/s42114-022-00440-3.
13. Sprang, H. A. Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy / H. A. Sprang // *Advances in X-ray Analysis.* – 2000. – Vol 42. – Pp. 1-11.
14. Broido, A. A simple sensitive graphical method of treating thermogravimetry analyse data / A. Broido, J. Polym. // *Sci.* – 1969. – Part A, Vol. 7, No 2. – Pp. 1761-1773.

### References

1. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., & Tsapko, A. (2019). Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 2(10(98)), 49-54. doi:10.15587/1729-4061.2019.163591.
2. Babashov, V.G., Bepalov, A.S., Istomin, A.V., & Varrik, N.M. (2017). Heat and Sound Insulation Material Prepared Using Plant Raw Material. *Refractories and Industrial Ceramics*, 58(2), 208-213.
3. Krüger, S., Gluth, G.J.G., Watolla, M.B., Morys, M., Häßler, D., & Schartel, B. (2016). Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen. *Berlin, Bautechnik*, 93(8), 531-542.
4. Tsapko, Yu., & Tsapko, A. (2017). Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 3(10(87)), 50-55.
5. Tsapko, Yu., Kyrycyok, V., Tsapko, A., Bondarenko, O., & Guzii, S. (2018). Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers. *MATEC Web of Conferences*, 230(02034), 1-6. doi:10.1051/mateconf/201823002034.
6. Xiao, Na, Zheng, Xue, Song, Shuping, Pu, & Junwen (2014). Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber. *United States: BioResources*, 9(3), 4924-4933.
7. Gaff, M., Kačík, F., Gašparík, M., Makovická Osvaldová, L., & Čekovská, H. (2019). The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. *Construction and Building Materials*, 200, 551-558.
8. Zhao, P., Guo, & C., Li, L. (2018). Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-9.
9. Carosio, F., & Alongi, J. (2016). Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds. *Acs applied materials & Interfaces. Eletttronico*, 8(10), 6315-6319.
10. Khalili, P., Tshai, K.Y., Hui, D., & Kong, I. (2017) Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy comp. *Composites Part B: Engineering*, 114, 101-110.
11. Zhang, T., Huang, H., Ge, X., Zhang, Z., & Li, P. (2022). Experimental study on hygrothermal accelerated aging effects of transparent fire resistive wood structure coatings. *Journal of Physics: Conference Series*, 2194(1), 012038. doi:10.1088/1742-6596/2194/1/012039.
12. Chu, T., Gao, Y., Yi, L., Huang, Q., & Wang, Z. (2022). Highly fire-retardant optical wood enabled by transparent fireproof coatings. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(3), 1-9. doi:10.1007/s42114-022-00440-3.
13. Sprang, H.A. (2000). Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy. *Advances in X-ray Analysis*, 42, 1-11.
14. Broido, A. (1969). A simple sensitive graphical method of treating thermogravimetry analyse data. *J. Polym. Sci. Part A.*, 7(2), 1761-1773.

**Yuriy Tsapko<sup>1</sup>, Olga Bondarenko<sup>2</sup>, Alexey Tsapko<sup>3</sup>,  
Alexandra Gorbachova<sup>4</sup>, Sergey Mazurchuk<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technologies and Design of Wood Products  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv Ukraine)

**E-mail:** [juriyts@ukr.net](mailto:juriyts@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>

<sup>2</sup>PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Building Materials  
Kyiv National University of construction and architecture (Kyiv Ukraine)

**E-mail:** [bondolya3@gmail.com](mailto:bondolya3@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8164-6473>. **ResearcherID:** [M-1453-2018](https://orcid.org/0000-0002-8164-6473)

<sup>3</sup>PhD of Technical Sciences, Senior Research Fellow

Ukrainian State Research Institute "Resource" (Kyiv Ukraine),

Associate professor of the Department of Building Materials

Kyiv National University of construction and architecture (Kyiv Ukraine)

**E-mail:** [aleksejtsapko@gmail.com](mailto:aleksejtsapko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2298-068X>

<sup>4</sup>PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Technologies and Design of Wood Products  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv Ukraine)

**E-mail:** [gorbachova.sasha@ukr.net](mailto:gorbachova.sasha@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7533-5628>

<sup>5</sup>PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Technologies and Design of Wood Products  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv Ukraine)

**E-mail:** [mazurchuk.s.m@ukr.net](mailto:mazurchuk.s.m@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6008-9591>

## **MECHANISM STRUCTURE FORMATION OF A FOAMED FOAM LAYER UNDER THE INFLUENCE OF MINERALS**

*The studies have established the effect of fillers on the performance of the fireproof coating, the parameters of its swelling under the influence of temperature and inhibition, which makes it possible to influence this process. The effect of fillers on the coefficient of swelling of coatings based on inorganic and organic substances during thermal exposure was investigated. It is proved that it consists in the creation of a layer on the surface of the material that prevents heating to a critical temperature and decomposition of the material. Experimental studies have confirmed that the introduction of titanium oxide and aluminum hydroxide in the amount of 5% contributes to the achievement of the highest value of the coefficient of swelling - up to 47, which is 1.11 times higher than the value of the coefficient of swelling when aluminum hydroxide is introduced, titanium oxide and talc in the amount of 3.3%, 1.12 times higher than the value of the coefficient of swelling when titanium oxide and talc in the amount of 5% were added, and 1.08 times higher than the value of the coefficient of swelling when aluminum hydroxide and talc in the amount of 5% were added. The influence of fillers under the action of high-temperature heat flow on the change in the process of swelling of the fireproof coating was established and the mechanism of the kinetics of the fillers' action, characterized by a decrease in speed and mass loss, was determined. Thus, at 700 °C, the introduction of fillers leads to the formation of refractory compositions that prevent the burnout of the resulting foam coke, which increases the efficiency of fire protection of building structures. On the basis of physicochemical research methods, it is shown that the introduction of a mixture of titanium dioxide and aluminum hydroxide in the amount of 5% each into the composition of the organic-inorganic composition leads to an increase in the coefficient of swelling, orderliness of the structure of the foam coke layer, and an increase in its heat resistance due to the dehydration of mixed titanium-aluminum phosphates.*

**Keywords:** fire resistance; coating; weight loss; swelling capacity; temperature; refractory fillers; coating efficiency.

**Fig.:** 4. **References:** 14.