

Запропоновано методика та обладнання для визначення кінетики спучування вогнезахисних покриттів. Досліджено вплив наповнювачів на коефіцієнт спучування покриття на основі неорганічних та органічних речовин в процесі термічного впливу. Встановлено вплив наповнювачів при дії високотемпературного теплового потоку на зміну процесу спучення вогнезахисного покриття та визначено механізм кінетики дії наповнювачів, який характеризується зниженням швидкості та втрати маси

Ключові слова: спучуючі покриття, температура печі, кінетика спучування покриття, тугоплавкі наповнювачі, ефективність покриття

Предложены методика и оборудование для определения кинетики вспучивания огнезащитных покрытий. Исследовано влияние наполнителей на коэффициент вспучивания покрытий на основе неорганических и органических веществ в процессе термического воздействия. Установлено влияние наполнителей при воздействии высокотемпературного теплового потока на смену процесса вспучивания огнезащитных покрытий и определен механизм кинетики действия наполнителей, характеризующийся снижением скорости и потери массы

Ключевые слова: вспучивающиеся покрытия, температура печи, кинетика вспучивания покрытий, тугоплавкие наполнители, эффективность покрытий

УДК 614.842

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.79869

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ НАПОВНЮВАЧІВ НА СПУЧУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ОРГАНО- НЕОРГАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

П. В. Кривенко

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com

Ю. В. Цапко

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник*

E-mail: juriyts@ukr.net

С. Г. Гузій

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

E-mail: sguziy@ukr.net

А. В. Кравченко

Аспірант*

E-mail: krav.anastasiya@gmail.com

*Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і

матеріалів ім. В. Д. Глуховського

Київський національний університет

будівництва і архітектури

пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03680

1. Вступ

Останнім часом в Україні підвищилась зацікавленість до результатів наукових розробок в області створення високоефективних засобів захисту будівельних конструкцій від впливу пожежі та їх впровадження.

Відомі методи забезпечення необхідної межі вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема обетонування, оштукатурювання цементно-пісочними розчинами, використання цегельної кладки, які є малоефективні. Застосування полегшених матеріалів і легких заповнювачів, що володіють високими теплоізоляційними властивостями, а саме спучений перліт і вермикуліт, мінеральне волокно, призводить до значних матеріальних затрат. Плитні і листові теплоізоляційні матеріали на основі гіпсокартонних і гіпсоволокнистих листів у значній мірі збільшують об'єм будівельної конструкції.

Для вогнезахисту будівельних конструкцій знайшли широке застосування спеціальні покриття, які при дії високої температури виділяють воду, але вони не завжди забезпечують вогнестійкість. Тому у останній час набули поширення покриття, що здатні до утворення на поверхні будівельної конструкції теплоізо-

ляційного шару, який у значній мірі знижує процеси передачі тепла до матеріалу.

Сучасні методи вогнезахисту будівельних конструкцій базуються на використанні покриттів, що спучуються, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів. Але при тривалій дії полум'я вони здатні до поступового вигорання і відповідно зниження вогнестійкості конструкції, що потребує додавання до них мінеральних волокон, здатних утворити більш стійкий шар пінококсу.

Тому визначена необхідність розвитку робіт в даному напрямку. Особливої уваги потребує розробка ефективних вогнезахисних покриттів для спорудження об'єктів різного призначення, де використання існуючих засобів малоефективне, а застосування нових потребує надійних способів вивчення властивостей покриття.

Основним заходом поліпшення стійкості покриттів є застосування мінеральних волокон, які характеризуються високою температурною стійкістю. Але в останній час набули використання тугоплавкі оксиди і гідроксиди, які здатні при горінні створювати тугоплавкі з'єднання. Тому постає необхідність встановлення кінетики спучення таких композицій, що потребує розроблення надійних способів оцінювання.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Особливість вогнезахисту будівельних конструкцій від впливу вогню полягає у створенні на поверхні елементів конструкцій теплоізолюючих екранів, які витримують високі температури. Наявність таких екранів дозволяє сповільнити прогрівання матеріалу (сталю конструкції) й зберігати свої функції при пожежі протягом заданого періоду часу та переводить деревину до важкогорючих матеріалів [1].

Найпростіші вогнезахистні засоби на основі неорганічних в'язучих матеріалів містять у своєму складі зв'язану воду, яка під час нагрівання випаровується і блокує перенос тепла до захищеної поверхні. У якості зв'язуючого використовують здебільшого натрієве рідинне скло, портландцемент, глиноземистий цемент, фосфатні і алюмосилікатні в'язучі [2]. Такі матеріали характеризуються незначною еластичністю, при дії температурного фактору в навколишнє довкілля виділяють тільки водяні пари [3]. Однак такі покриття є недовговічними та не ефективними, а також не забезпечують достатньої адгезійної міцності, оскільки вони мають великий температурний коефіцієнт лінійного розширення. Натомість покриття на основі неорганічних та органічних речовин здатні до утворення на поверхні, що захищається, спученого шару коксу, який у значній мірі знижує процеси теплопередачі [4].

Ефективність застосування вогнезахисних покриттів на основі органічних речовин показана в роботах [5], де за рахунок дії антипіренів та спінювачів можливий значний вплив на формування порового шару пінококсу, а саме на підвищення його стійкості, щільності і міцності, внаслідок модифікування полімерними добавками [6]. Дані дослідження направлені для виготовлення полімерно-неорганічних вогнезахисних покриттів, які не можуть забезпечити вогнестійкість і димоутворювальну здатність будівельних конструкцій протягом досить тривалого часу та є надто дорогими. Оцінка поведінки спучення покриттів при впливі тліючого вогню показали певну ефективність, але не встановлено їх поведінку при швидкоплинних пожежах [7].

Проведеними дослідженнями [8] встановлено, що додавання наповнювачів (оксиди, гідроксиди, борати) до органо-неорганічних покриттів змінює структуру коксового шару та процес спінення, але не встановлено їх вплив на теплопровідність утвореного пінококсу. Ефективність застосування неорганічних наповнювачів на характеристики вогнезахисту, які вміщують у своїй структурі воду показана в роботі [9].

Тому актуальним питанням є встановлення спучувальної здатності покриттів при довготривалій дії температур та впливі компонентів, які входять до їх складу, і їх ролі у забезпеченні вогнестійкості, так і розробки надійних, сучасних, об'єктивних методів оцінювання процесу спучення, що обумовлюють необхідність проведення досліджень у цьому напрямі.

3. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є дослідження впливу наповнювачів на спучувальну здатність вогнезахисного покриття на основі органічних і неорганічних речовин.

Для досягнення мети вирішувались наступні задачі:
– розробити методика та обладнання для оцінювання кінетики спучування вогнезахисного покриття при додаванні наповнювачів;

– встановити ефективність застосування різних типів наповнювачів на кратність спучення покриття та процес теплопровідності.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Досліджувані матеріали, які використовувались в експерименті

Дослідження проводили з використанням органо-неорганічної системи, 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 їх сумішей.

Експериментальні зразки покриттів готували на основі органо-неорганічної системи, що містить 18±20 % ПФА, 12±14 % меламіну, 10±12 % ПЕР, 16 % ПВА-дисперсія та вода. Отриману масу перемішували, вводили наповнювачі у кількості 10 % і наносили на сталю пластину товщиною 0,5±0,6 мм (рис. 1).



Рис. 1. Зразок покриття на сталій пластині

Наповнювачі не змінюють суттєво зовнішній вигляд та структуру покриття.

4.2. Розроблення методу та обладнання для визначення кінетики спучування вогнезахисного покриття та результати дослідження

Спучуючі вогнезахисні матеріали діють за принципом істотного зниження теплопровідності утворених ними покриттів в результаті перетворення їх при інтенсивному тепловому впливі в пінококсіві ніздрюваті шари, які значно відсувають в часі як процес передачі тепла так і момент руйнування будівельної конструкції.

Визначення коефіцієнта спучення вогнезахисних покриттів («ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання» [10]) проводять у муфельній печі за відповідних температури. Недоліком даного способу є те, що він придатний тільки для класифікаційного порівняння вогнезахисних покриттів між собою і не дає ніякої інформації про реальну спучувальну здатність покриття.

Суть методу визначення коефіцієнта спучення вогнезахисних покриттів полягає у впливі на зразок вогнезахисного покриття, який нанесений на сталю

пластину, теплового потоку у муфельній печі та вимірюванні утвореного шару після його охолодження. Проведеними дослідженнями встановлено, що при дії теплового потоку відбувалось незначне спучення геоцементного покриття, яке продовжувалося до температури 500 °С і коефіцієнт спучення склав 3,1 (табл. 1).

Таблиця 1

Коефіцієнт спучування покриття після випробування

Зразок покриття	Товщина покриття, мм	Температура печі, °С	Коефіцієнт спучення, після випробувань
геоцементне	1	500	3,1
органонеорганічне	1	500	47,0

Потім були проведені випробування зразків, які оброблені органо-неорганічним вогнезахисним покриттям. При дії теплового потоку на зразки органо-мінерального вогнезахисного покриття було встановлено, що при досягненні 500 °С коефіцієнт спучення склав 47,0 (табл. 1).

Відомий спосіб визначення теплоізоляційних властивостей, при якому підготовлений зразок поміщають в тримач та вставляють у випробувальну піч і фіксують його заданим чином, щоб кінець контрольної термопари притискувався до тильної поверхні зразка. Вмикають нагрів випробувальної камери та контролюють температуру перед зразком і з тильної поверхні зразка, а по вимірних величинам визначають теплоізоляційну здатність матеріалу. Критерієм оцінки теплоізоляційних властивостей використовується характер поведінки зразка вогнезахисного покриття при дії теплового потоку і час прогріву металеві підкладки зразка до критичної температури металу (для сталі – 500 °С, алюмінію – 250 °С), при якій конструкція втрачає свою несучу здатність в умовах теплового впливу [11].

Недоліком даного способу є те, що він не дозволяє достовірно оцінити процес спучування вогнезахисного покриття, а саме, врахувати вплив зміни температури і кінетики руйнування зразків при термічній дії.

Відомо, що при односторонньому нагріванні вогнезахисного покриття в його підповерхневому шарі формується змінне по товщині і в часі температурне поле, а також виділяються газоподібні продукти термічного розкладу та у міру зростання температури каркас твердне, утворюючи шар пінококсу, який переміщається «назустріч» зовнішньому тепловому потоку [12]. Параметри, такі як швидкість і порядок реакції, являють собою характеристики, що носять назву ефективних параметрів, відображаючи суму різних хімічних перетворень при термічній деструкції [13].

Враховуючи вищевикладене, запропоновано спосіб визначення кінетики спучування вогнезахисного покриття, який здійснюється розрахунком теплоізоляційних властивостей по даним вимірювання температури на зворотній поверхні та перед зразком після впливу на нього теплового потоку. Разом з цим додатково вимірюється початкова товщина покриття та товщина після закінчення процесу спучування і розраховується кінетичний параметр за залежністю:

$$e_v = k_v \left(\frac{T - T_{пс}}{T_{кк} - T_{пс}} \right)^n, \quad (1)$$

де k_v – коефіцієнт спучування:

$$k_v = \frac{\delta_1}{\delta_0}, \quad (2)$$

де δ_0, δ_1 – відповідно початкова та товщина покриття після закінчення процесу спучення, мм; $T_{пс}, T_{кк}$ – відповідно температура початку та кінця процесу спучення, °С; T – тепле значення температури спучення, °С; n – порядок реакції розкладу покриття.

5. Експериментальні дослідження кінетики спучення покриття та їх результати

На рис. 2 наведено прилад для проведення досліджень.

Дослідження за приведеним способом здійснюють таким чином. Підготовлений зразок 5 з вогнезахисним покриттям поміщають в тримач зразка 3, який прикріплений до дверцят 4 і фіксують його заданим чином, щоб кінець контрольної термопари 8 був притиснутий до тильної поверхні зразка та вставляють в випробувальну камеру 1. Встановлюють відповідну швидкість нагріву і температуру у випробувальній камері за допомогою блоку 7. Включають прилад для реєстрації температури 11 та комп'ютер 12, нагрів випробувальної камери 1 за допомогою радіаційної панелі 2 та контролюють процес спучення через оглядове вікно 6 за допомогою лінійки 10.

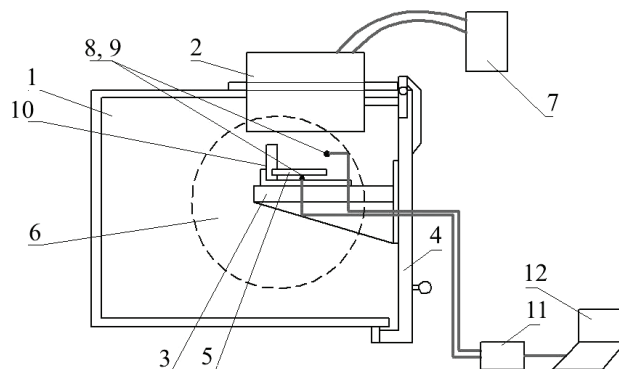


Рис. 2. Прилад по визначенню кінетики спучування вогнезахисного покриття: 1 – випробувальна камера, 2 – радіаційна панель, 3 – тримач зразка, 4 – дверцят випробувальної камери, 5 – зразок, 6 – оглядове скло, 7 – терморегулятор, 8, 9 – термопара, 10 – лінійка, 11 – аналого-цифровий перетворювач, 12 – комп'ютер

Під час проведення випробувань термопарою 8, 9 вимірюють температуру перед зразком і з тильної поверхні зразка, та через оглядове скло 6 за допомогою лінійки 10 висоту спучення покриття.

Після досягнення з тильної поверхні зразка 5 граничної температури у 230 °С дослідження закінчується і нагрів випробувальної камери 1 вимикається, при цьому фіксується час від початку нагріву до моменту досягнення температури та визначається коефіцієнт спучення через певні проміжки температурного інтервалу дії теплового потоку.

Спочатку були проведені випробування органо-неорганічного покриття, нанесеного на сталеву пласти-

ну. При дії теплового потоку на зразки за короткий проміжок часу при температурі перед зразком близько 100 °С відбувалось незначне спучення покриття, а за температури перед зразком близько 190 °С почалося інтенсивне спучення покриття та незначне підвищення температури на оберненій поверхні зразка, яке тривало при досягненні температури близько 360 °С, а висота спученого шару пінококсу підвищилась до 32 мм. При подальшому впливі теплового потоку за рахунок вигорання пінококсу спучений шар став зменшуватись, та при досягненні температури сталльної пластини 230 °С після 1820 с випробування коефіцієнт спучування склав відповідно 48,0. На рис. 3 показано процес спучення покриття.

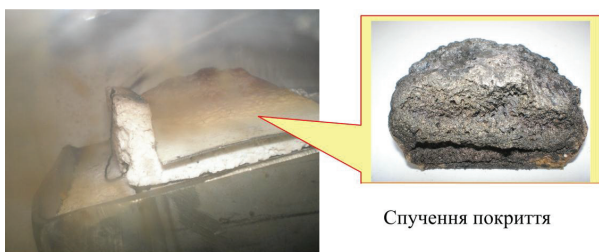


Рис. 3. Результати випробувань спучуючого покриття

Для підвищення термостійкості пінококсу у орґано-неорґанічного покриття було запропоновано ввести наповнювачі та дослідити стійкість утвореного пінококсу при дії теплового потоку (табл. 2).

Таблиця 2

Результати визначення стійкості пінококсу до дії теплового потоку для орґано-неорґанічного покриття та з додаванням наповнювачів

Зразок покриття	Товщина покриття, мм	Кількість нанесеного покриття, г/м ²	Час досягнення граничної температури, с	Маса покриття після випробувань, г/м ²
Орґано-неорґанічне без наповнювача	0,6	10,2	1820	2,6
Орґано-неорґанічне+ (10 %) TiO ₂	0,55	10,1	1932	4,4
Орґано-неорґанічне+ (10 %) тальк	0,56	10,2	1958	4,6
Орґано-неорґанічне+ (5 %) TiO ₂ + (5 %) тальк	0,6	10,2	1946	5,8
Орґано-неорґанічне+ (10 %) Al(OH) ₃	0,54	10,1	1861	5,0
Орґано-неорґанічне+ (10 %) Mg(OH) ₂	0,57	10,2	1848	5,1
Орґано-неорґанічне+ (5 %) TiO ₂ + (5 %) Al(OH) ₃	0,56	10,2	1912	6,2

6. Обговорення результатів з визначення кінетики спучення покриття

На рис. 4, 5 зображено залежність коефіцієнту спучення від температури, яку визначали експериментально та обробляли за допомогою Microsoft Excel статичною функцією:

$$y = a \cdot x^b, \tag{3}$$

де а і b – емпіричні константи, коефіцієнт спучення і порядок реакції.

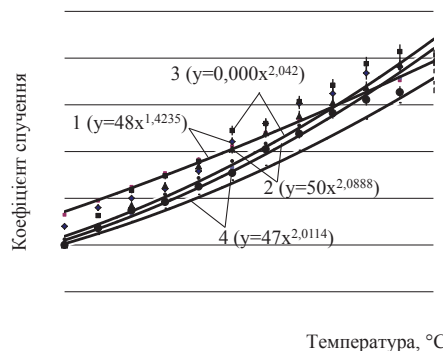


Рис. 4. Залежність коефіцієнту спучення покриття від температури: 1 – орґано-неорґанічне, 2 – орґано-неорґанічне+(10 %) TiO₂ TiO₂ (10 %), 3 – орґано-неорґанічне+тальк (10 %), 4 – орґано-неорґанічне+TiO₂ (5 %)+тальк (5 %)

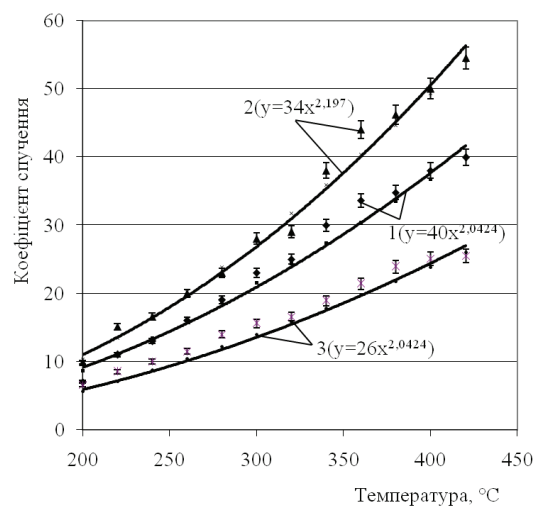


Рис. 5. Залежність коефіцієнту спучення покриття від температури: 1 – орґано-неорґанічне+Al(OH)₃ (10 %), 2 – орґано-неорґанічне+Mg(OH)₂ (10 %), 3 – орґано-неорґанічне+TiO₂ (5 %)+Al(OH)₃ (5 %)

Встановлено, що динаміка зміни товщини спучення, яка отримана експериментально, співпадає з теоретично розрахованою. Розрахований порядок реакції для орґано-неорґанічного покриття становить 1,42, а у разі введення наповнювачів підвищується до 2, що у свою чергу пов'язане з утворенням температуростійких сполук із значним коксовим залишком.

Для підтвердження даних досліджень був проведений відповідний термогравіметричний аналіз, який показав залежність втрати маси для даних композицій (табл. 3), та за методикою дослідження кінетики розкладу, наведеної у роботі [12], було розраховано енергію активації.

Таблиця 3

Результати втрати маси покриттів залежно від температури

t, °C	Δm, %	Ln(Ln(100/100-Δm))
органонеорганічне покриття		
200	2.4	-0.133
300	26.8	1.190402
400	47.1	1.348663
500	86.7	1.495699
600	94.9	1.515748
700	98.9	1.524775
органонеорганічне+TiO ₂ (10 %)		
200	1.82	-0.51277
300	10.73	0.862993
400	25.91	1.181143
500	38.05	1.29132
600	59.71	1.408382
700	70.8	1.449236
органонеорганічне+талък (10 %)		
200	1.02	-0.35226
300	9.55	0.813833
400	28.65	1.210498
500	40.23	1.306876
600	54.66	1.386577
700	69.1	1.443514
органонеорганічне + TiO ₂ (5 %)+талък (5 %)		
200	2.6	-0.04551
300	18.5	1.07082
400	40.0	1.305323
500	50.7	1.367602
600	52.5	1.376449
700	56.8	1.39613
органонеорганічне+Al(OH) ₃ (10 %)		
200	3.9	0.308202
300	33.1	1.25263
400	49.1	1.359401
500	62.0	1.417583
600	63.57	1.423738
700	71.2	1.450558
органонеорганічне+Mg(OH) ₂ (10 %)		
200	6.75	0.646864
300	23.4	1.148271
400	36.9	1.283212
500	44.9	1.336168
600	63.9	1.42487
700	71.5	1.451543
органонеорганічне+TiO ₂ (5 %)+Al(OH) ₃ (5 %)		
200	2.04	-0.33834
300	17.7	1.055553
400	38.8	1.297031
500	49.3	1.360444
600	51.4	1.371089
700	54.4	1.385385

На рис. 6 приведені графічна залежність швидкості деструкції покриття від оберненої температури.

Значення енергії активації (E) розраховується за залежністю:

$$E = \text{tg}\phi \cdot R,$$

де R – універсальна газова стала, кДж/(моль×К).

В табл. 4 наведено значення енергії активації при термічному розкладі покриттів без наповнювачів та з ними.

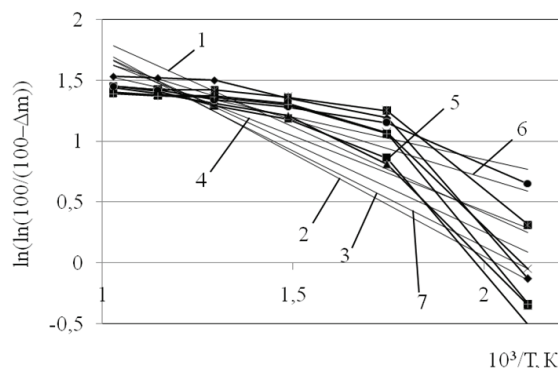


Рис. 6. Графічна залежність швидкості деструкції покриття від оберненої температури: 1 – органонеорганічне, 2 – органонеорганічне+Al(OH)₃ (10 %), 3 – органонеорганічне+TiO₂ (10 %), 4 – органонеорганічне+талък (10 %), 5 – органонеорганічне+Mg(OH)₂ (10 %), 6 – органонеорганічне+TiO₂ (5 %)+талък (5 %), 7 – органонеорганічне+TiO₂ (5 %)+Al(OH)₃ (5 %)

Таблиця 4

Розраховане значення енергії активації при термічному розкладі деревини за різних значень кисню в газоповітряному середовищі

№ п/п	Покриття	Енергія активації, E (кДж/моль)
1	органонеорганічне	18,79
2	органонеорганічне+Al(OH) ₃ (10 %)	32,59
3	органонеорганічне+TiO ₂ (10 %)	31,45
4	органонеорганічне+талък (10 %)	30,36
5	органонеорганічне+Mg(OH) ₂ (10 %)	29,35
6	органонеорганічне+TiO ₂ (5 %)+талък (5 %)	60,85
7	органонеорганічне+TiO ₂ (5 %)+Al(OH) ₃ (5 %)	65,10

Виявлено, що для термічного розкладу органонеорганічного покриття з наповнювачами потребується значно більша енергія активації, ніж для розкладу органонеорганічної системи без наповнювачів.

Таким чином, встановлено, що органонеорганічне покриття за високих температур здатне до значної втрати маси, а введення наповнювачів призводить до утворення тугоплавких композицій, які запобігають вигоранню утвореного пінококсу, що підвищує ефективність вогнезахисту будівельних конструкцій.

6. Висновки

У результаті проведених досліджень встановлена ефективність застосування наповнювачів у суміші неорганічних та органічних речовин у якості вогнезахисних покриттів, зокрема:

– проведено дослідження процесу спучення вогнезахисних покриттів, визначено зміну температури і кінетику розкладу зразків при термічній дії за запропонованим способом визначення кінетики спучування покриттів, суть якого полягає у впливі теплового потоку протягом певного проміжку часу на зразок, вимірюванні температури на зворотній поверхні та перед зразком і визначенні 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, однак з часом йде процес вигорання пінококсу та зниження ефекту спучення. Натомість додавання до органо-неорганічної системи покриття наповнювачів сприяє утворенню тугоплавких композицій, що запобігає вигоранню пінококсу і проходженню високої температури до матеріалу.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення процесів структуроутворення захисного шару, встановлення взаємозв'язку між складовими і властивостями покриттів та їх оптимізації.

Література

1. Цапко, Ю. В. Влияние поверхностной обработки древесины на огнестойкость деревянных конструкций [Текст] / Ю. В. Цапко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 5 (65). – С. 11–14. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/18104/15850>
2. Krivenko, P. V. Fireproof coatings on the basis of alkaline aluminum silicate systems [Text] / P. V. Krivenko, E. K. Pushkarjeva, M. V. Sukhanevich, S. G. Guziy // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2009. – Vol. 29, Issue 10. – P. 129–142. doi: 10.1002/9780470456200.ch13
3. Krivenko, P. Protection of timber from combustion and burning using alkaline aluminosilicate-based coatings [Text] / P. Krivenko, S. Guzii, A. Kravchenko // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 688. – P. 3-9. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.688.3
4. Ненахов, С. А. Проблемы огнезащитной отрасли [Текст] / С. А. Ненахов, В. П. Пимонова, А. Л. Пименов // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 12, № 12. – С. 19–26.
5. Анцупов, Е. В. Антипирены для пористых материалов [Текст] / Е. В. Анцупов, С. М. Родивилов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 5. – С. 25–32.
6. Гравит, М. В. Исследование влияния различных факторов на коэффициент вспучивания органорастворимых огнезащитных покрытий [Текст] / М. В. Гравит // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2013. – № 6. – С. 12–16.
7. Cirpici, B. K. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire [Text] / B. K. Cirpici, Y. C. Wang, B. Rogers // Fire Safety Journal. – 2016. – Vol. 81. – P. 74–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.011
8. Ненахов, С. А. Влияние наполнителей на структуру пенококса на основе полифосфата аммония [Текст] / С. А. Ненахов, В. П. Пимонова, Л. И. Натейкина // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – Т. 18, № 7. – С. 51–58.
9. Fan, F.-Q. Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings [Text] / F.-Q. Fan, Z.-B. Xia, Q.-Y. Li, Z. Li // Progress in Organic Coatings. – 2013. – Vol. 76, Issue 5. – P. 844–851. doi: 10.1016/j.porgcoat.2013.02.002
10. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 «Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання [Текст] / Чинний від 2011-11-01. – К., 2010. – 16 с.
11. Патент РФ № 2180741, МПК G01N3/08. Установка для испытания огнезащитных вспучивающихся покрытий по металлу [Текст] / Баженов С. В., Наумов Ю. В., Лашкин С. М., Капранов А. В. – заявл. 04.08.1999; Опубл. 20.03.2002; Бюл. № 12. – 10 с.
12. Ненахов, С. А. Экспериментальное изучение влияние толщины вспенивающихся покрытий на огнезащитную эффективность [Текст] / С. А. Ненахов, В. П. Пименова // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 5. – С. 41–47.
13. Крамаренко, В. Ю. Неизотермическая кинетика в термическом анализе полимеров [Текст] / В. Ю. Крамаренко // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 64. – С. 64–76.
14. Кравченко А. В. Вплив геоцементного покриття на енергію активації термоокиснювальної деструкції деревини [Текст] / А. В. Кравченко, П. В. Кривенко, С. Г. Гузій, Ю. В. Цапко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 1, 6 (67). – С. 57–60. doi: 10.15587/1729-4061.2014.20727