

УДК 614.842

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215698

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗАХИСНОЇ ДІЇ ДЕРЕВИНИ ІНТУМЕСЦЕНТНИМ ПОКРИТТЯМ

Цапко Ю. В., Цапко О. Ю., Бондаренко О. П.

Об'єктом дослідження є інтумесцентні покриття для деревини, що здатні під впливом високої температури утворювати на поверхні деревини шар пінококсу, який перешкоджає проходженню температури до матеріалу. Одним з найбільш проблемних місць щодо застосування даних покриттів є невідома ефективність застосування та їх експлуатаційні параметри. Ефективність вогнезахисту деревини в будівельних конструкціях і виробач з деревини визначається рівнем їх здатності протистояти термічному впливу та обумовлюється розкладом компонентів під дією температури з поглинанням тепла та утворенням негорючих газів. Проведено термодеструкцію захищеної деревини та виявлено леткі продукти деструкції, а також отримано зміну компонентів, а саме, при термічному розкладі вогнезахисної деревини знижується кількість горючих газів та підвищується кількість інертних газів в оберненому порядку. Для встановлення ефективності захисту деревини наведеними покриттям необхідно було провести дослідження по горючості деревини. В ході дослідження використовувалося стандартизоване обладнання згідно ДСТУ 2289. Експериментально встановлено, що оброблена деревина характеризується низькою втратою маси (2,2 %) та температурою димових газів менше 200 °С, а також відноситься до важкогорючих матеріалів. Це пов'язано з тим, що покриття при дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення та сприяє утворенню теплоізолюваного шару коксу, який запобігає вигоранню деревини, та проходженню високої температури до матеріалу. Завдяки цьому забезпечується можливість отримання деревини з показниками, що не поширюють полум'я поверхню, та з помірно димоутворювальною здатністю. У порівнянні з аналогічними відомими покриттями на неорганічній основі, що характеризуються низькою адгезією до деревини при коливаннях температури та вологи, це забезпечує такі переваги, як менша витрата покриття та його атмосферостійкість.

Ключові слова: захисні засоби, вогнестійкість деревини, леткі продукти, втрата маси, оброблення поверхні, ефективність захисту.

1. Вступ

Причиною пожеж на об'єктах, де використовуються деревина, є займання газоподібних продуктів термічної та термоокислювальної деструкції (водню, метану, оксиду вуглецю та ін.), які утворюються в процесі високотемпературного нагрівання будівельних конструкцій. Досвід застосування вогнезахисних матеріалів свідчить, що існуючі засоби мають

низькі показники ефективності та екологічності, та не забезпечують достатнього рівня захисту від комплексу небезпечних та шкідливих чинників навколишнього середовища, чим зумовлюють необхідність розроблення науково обґрунтованих підходів до їх створення. Під час розроблення вогнезахисту деревини провідну роль відіграє правильний добір речовин до захисних композицій, який базується на об'єктивному та всебічному дослідженню їх властивостей, а також врахування важливих аспектів пожежної безпеки, як займистість, поширення полум'я поверхнею, тепловиділення, димоутворювальна здатність. Незадовільну ефективність захисних засобів можна пояснити недостатньою вивченістю механізму вогнезахисту деревини, що не уможливорює отримання об'єктивної інформації про характер процесів, які відбуваються під час експлуатації та про результат впливу. Разом з тим, проблема підвищення експлуатаційних властивостей вогнезахисних матеріалів в разі застосування засобів вогнезахисту на неорганічній основі на сьогодні залишається невирішеною.

В останні роки з запропонованого напрямку досліджень відомі роботи, які направлені на створення вогнезахисних засобів, що в процесі нагрівання утворюють коксовий теплоізоляційний шар на поверхні деревини [1]. В якості альтернативного вирішення проблеми вогнезахисту дерев'яних конструкцій можливо використати захисні композиції на основі геоцементів, які є різновидом лужних цементів. Вони вогне-, тепло- та термостійкі, а також екологічно безпечні та характеризуються підвищеною довговічністю за рахунок синтезу в їх структурі речовин, аналогів природних цеолітів і фельдшпатоїдів [2]. Також мають незначну еластичність та при дії температурного фактору в навколишнє довкілля виділяють тільки водяні пари, але потребують нанесення на будівельну конструкцію значної товщини захисного шару [3]. Натомість спучуючі вогнезахисні матеріали діють за принципом істотного зниження теплопровідності утворених ними покриттів в результаті перетворення їх при інтенсивному тепловому впливі в пінококсові ніздрюваті шари, які значно відсувають в часі як момент загоряння горючих конструкцій з дерева [4]. Для вогнезахисту будівельних конструкцій знайшли широке застосування спеціальні покриття та органічній основі [5], наприклад, в якості добавки до поліолефіну застосовують хлорпарафіни, які добре поєднуються з полімером [6]. Вони досить ефективні, однак можуть утворювати висоли, підвищують димоутворювальну здатність та виділяють токсичні продукти горіння. Значне підвищення стійкості, щільності та міцності захисного шару досягається внаслідок направленої формування тих чи інших добавок, які утворюють високотемпературні сполуки [7]. Однак для підтвердження цього процесу не наведені відповідні фізико-хімічні розрахунки. Крім того, багато покриттів мають цілу низку недоліків, таких як вплив окремих компонентів, втрати функціональних властивостей при збільшенні температури середовища [8]. Це означає, що не визначено, як саме протікає процес за умов температур у діапазоні розкладу вогнезахисного покриття. Проведені також дослідження захисних матеріалів, виготовлених із органічних речовин з розчином колеманітової руди [9]. Показано, що завдяки встановленим співвідношенням стає можливим корегування вмісту компонентів для забезпечення процесу

теплостійкості. Синергічна дія поліфосфат амонію та тригідрат оксиду алюмінію в якості вогнезахисних компонентів для епоксидної композиції, армованої природними волокнами, як вогнезахисного матеріалу наведена в роботі [10]. В ній показано, що не завжди склади могли забезпечити ефективний опір полум'я при зміні температури. А тому проходив процес горіння з інтенсивною втратою маси, і для вирішення цього питання потрібне розроблення нових підходів. Тому актуальним є встановлення ефективності вогнезахисту при довготривалого часу термічного впливу. При цьому, невирішеною складовою є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій, що обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Таким чином, *об'єктом дослідження* обрано інтумесцентні покриття для деревини, що здатні під впливом високої температури утворювати на поверхні деревини шар пінококсу, який перешкоджає проходженню температури до матеріалу. *Мета роботи* полягає у визначенні особливості вогнезахисту дерев'яних конструкцій від дії високої температури інтумесцентним покриттям.

2. Методика проведення дослідження

Для встановлення горючості, поширення полум'я та димоутворення деревини та токсичності продуктів горіння використовували зразки деревини сосни. Для того, щоб порівняти необроблений та ті, що оброблювали (рис. 1) вогнезахисним інтумесцентним покриттям на основі органічних та мінеральних речовин «ФАЄРВОЛ-ВУД» з витратою 260 г/м², неорганічним покриттям з витратою 420 г/м² [3].

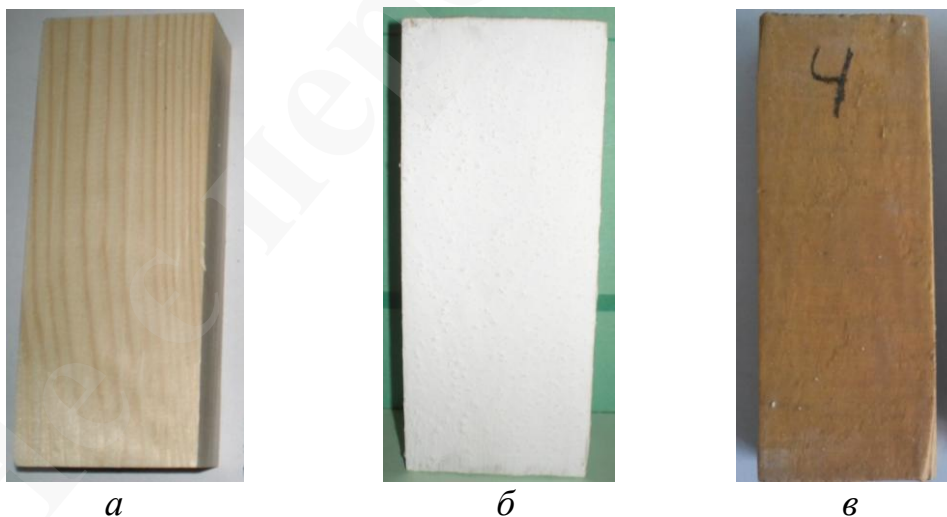


Рис. 1. Модельні зразки вогнезахисної деревини: *а* – необроблений; *б* – оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям; *в* – оброблений гецементним покриттям на неорганічній основі [3]

Дослідження механізму вогнезахисту деревини інтумесцентним покриттям проводили відповідно до методики [3].

Якісний та кількісний склад цих сумішей визначали газохроматографічним методом з використанням газового хроматографа Цвет-500М, виробництва дослідного підприємства «Хроматограф», Україна.

Газова хроматографія з масоселективним детектором, який оснащений автосемплером Autoinjector 7683b: колонкою HP-5 length 30 m, ID 0.32 mm, film 0.25 μm . Введення проби – авто, ділення потоку 1:10 ($v=1 \mu\text{kl}$).

Піроліз здійснюється в трубчатій печі при нагріванні від 40 °С до 800 °С. Вловлювання здійснюється в скляний газозбірник, заповнений насиченим розчином хлориду натрію. Для випробувань готують не менше 5 зразків масою 100 г. Зразки кондиціонують в лабораторних умовах, після зважують з похибкою не більше 0,1 г.

Дослідження з визначення групи горючості деревини, індексу поширення полум'я та димоутворення, обробленої покриттям проводили згідно з [3].

3. Результати дослідження та обговорення

Ефективність вогнезахисту деревини в будівельних конструкціях і виробках з деревини визначається рівнем їх здатності протистояти термічному впливу. І насамперед обумовлюється розкладом компонентів під дією температури з поглинанням тепла та утворенням негорючих газів, зміною процесу термічного розкладу матеріалів у напрямку утворення коксу та гальмуванням процесів окиснення. Натомість, покриття під час дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення, сприяє утворенню теплоізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню деревини та проходженню високої температури до матеріалу. При цьому знижується димоутворювальна здатність і горіння матеріалу. Склад продуктів термічної деструкції залежить від багатьох умов: виду рослинного матеріалу, вологості, температури, динаміки надходження повітря тощо. Найвищий вміст горючих компонентів – у газоподібних продуктах, які утворюються внаслідок піролізу (термічного розкладу без доступу повітря). Одним з методів, який дає можливість дослідити утворення летких продуктів вогнезахисної деревини, є газохроматографічний аналіз. Із застосуванням хроматографа «Цвет-500М» проведено хроматографічний аналіз летких продуктів розкладу деревини (рис. 2).



Рис. 2. Хроматограф газовий «Цвет-500М»

Результати газохроматографічного аналізу одержаних горючих газових сумішей наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Якісний та кількісний склад газоподібних продуктів термічної деструкції деревини

Компонент	Вміст компонентів у летких продуктах деструкції соснової деревини, % об.		
	Не обробленої	Обробленої геоцементним покриттям	Обробленої інтумесцентним покриттям
CO	39,08	16,29	12,79
CO ₂	51,93	82,44	76,19
CH ₄	6,05	0,42	0,55
C ₂ H ₆ + C ₂ H ₄	0,45	0,17	Не виявлено
C ₃ H ₈	0,19	Не виявлено	Не виявлено
C ₃ H ₆	0,32	Не виявлено	Не виявлено
H ₂	0,73	0,52	Не виявлено
O ₂	0,26	Не виявлено	Не виявлено
N ₂	0,99	Не виявлено	10,45

Встановлено, що леткі продукти деструкції суттєво відрізняються за вмістом інертних газів та кількістю горючих. Для деревини, яка була оброблена інтумесцентним покриттям, виявлено збільшення інертних газів, зокрема CO₂ в 1,46 рази та азоту в 10,45 рази та зниження горючих газів. При обробленні геоцементним покриттям – підвищується в основному CO₂.

Враховуючи, що за цими дослідженнями визначити групу вогнезахисної ефективності деревини не можливо, то були проведені експериментальне визначення комплексу пожежонебезпечних властивостей. А саме групи горючості, індексу поширення полум'я, димоутворювальної здатності.

Результати досліджень із визначення маси зразків (Δm , %) після горіння та приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , °C) наведено на рис. 3, 4.

Як видно з рис. 3, 4, вогнезахисна деревина відноситься до важкогорючих матеріалів, оскільки температура газоподібних продуктів горіння не перевищила 189 °C, а втрата маси не перевищила 4,0 % (рис. 4). Набагато більшу ефективність показали зразки, які оброблені інтумесцентним покриттям (крива 3), з втратою маси 2,1 % та температурою димових газів менше 160 °C (рис. 3).

Для встановлення здатності протистояти поширенню полум'я поверхню деревини, захищеної покриттям, були проведені відповідні дослідження (рис. 5). Для деревини був встановлений на основі експериментальних даних індекс поширення полум'я, який становив 57,6 (табл. 2). Після цього були проведені випробування зразків, які були оброблені покриттями.

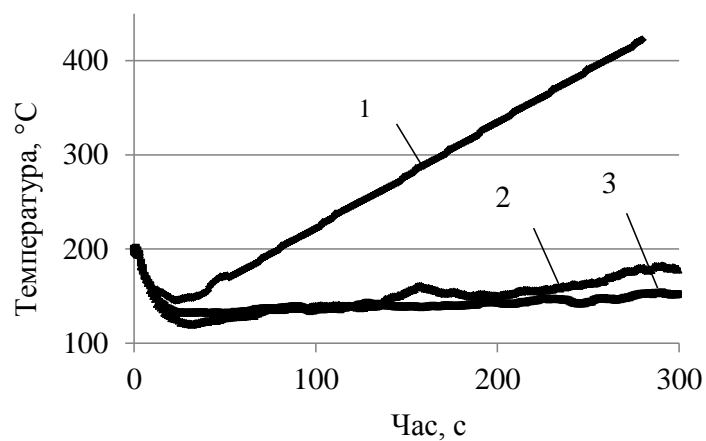


Рис. 3. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях деревини: 1 – необроблена; 2 – оброблена покриттям на неорганічній основі; 3 – оброблена інтумесцентним покриттям

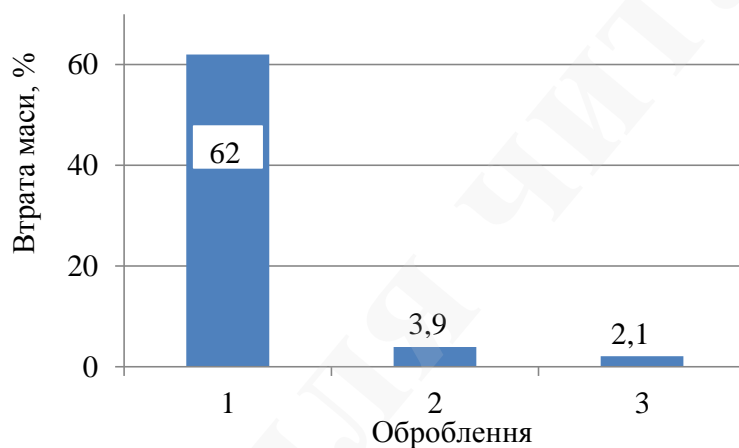


Рис. 4. Результати втрати маси зразків Δm , % вогнезахисної деревини: 1 – необроблена; 2 – оброблена покриттям на неорганічній основі; 3 – оброблена інтумесцентним покриттям



Рис. 5. Установка для визначення індексу поширення полум'я поверхнею деревини

Таблиця 2

Час проходження фронтом полум'я контрольних точок

Зразок деревини	Температура димових газів, °С		Час проходження фронтом полум'я ділянок зразка, с										Час досягнення t_{max} , с	Довжина пошкодження зразка l_c , мм	Індекс поширення полум'я
	t_l	t_{max}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Необроблена	89	355	20	26	8	21	55	39	30	51	91	30	122	300	57,6
Вогнезахищена геоцементним покриттям	90	105	181	–	–	–	–	–	–	–	–	–	300	16	4,4
Вогнезахищена інтумесцентним покриттям	92	97	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	390	0	0

Під час випробувань деревини, захищеної геоцементним покриттям, було виявлено, що зразок загорівся на 181 с. Поширення полум'я відбулося тільки на першу ділянку, максимальна температура димових газів становила 105 °С за удвічі більший час, а індекс поширення полум'я знизився близько 12 разів. При застосуванні інтумесцентного покриття поширення полум'я не відбулося.

Димоутворення вогнезахищеної деревини визначали відповідно для кожного зразка деревини, а саме, для деревини необробленої (1) та вогнезахищеної: інтумесцентним покриттям (2) та покриттям на неорганічній основі (3), табл. 3.

Таблиця 3

Результати випробувань коефіцієнту димоутворення деревини

Режим випробувань	№ зразка	Маса зразка (m), кг $\times 10^{-3}$	Світлопропускання, %		Коефіцієнт димоутворення (D_m), м ² /кг
			(T_0) початкове	(T_{min}) кінцеве	
Полуменеве горіння (35 кВт/м ²)	1	0,74	100	52	671,66
	2	0,82	100	88	141,33
	3	0,85	100	85	150,79
Тління (35 кВт/м ²)	1	0,79	100	48	766,32
	2	0,84	100	72	300,98
	3	0,87	100	76	290,33

Примітка: 1 – деревина необроблена; деревина вогнезахищена: 2 – спучуючим покриттям, 3 – геоцементним покриттям

Коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає 766,32 м²/кг, що відносить її до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахист зменшує димоутворювальну здатність понад 2 рази, і переводить до матеріалів з помірною димоутворювальною здатністю.

Дослідження механізму захисту деревини від дії високотемпературного полум'я є закономірним процесом зниження горючих летких продуктів піролізу (табл. 1). Під дією температури утворені леткі продукти піролізу деревини характеризуються утворенням інертних компонентів, які інгібують активні радикали полум'я. Крім того під час роботи покриття утворюється шар пінококсу, який уповільнює процеси теплопереносу. Захист інтумесцентними покриттями, наприклад, спучуючим, характеризується утворенням коксового шару, який знижує горючі компоненти, розкладу деревини. Такий механізм є фактором регулювання ступеня захисту та ефективності вогнезахисту деревини. Але, це може негативним чином впливає на димоутворювальну здатність покриття, оскільки органічні компоненти здатні до підвищення димоутворення. Що погоджується з даними, відомими з робіт [4, 5], автори яких погоджуються про підвищення димоутворювальної здатності. На відміну від результатів досліджень [6, 7], отримані дані щодо теплоізолювання спіненого шару коксу та зміни властивостей дозволяють стверджувати наступне:

- основним регулятором процесу теплоізолювання є не тільки формування шару пінококсу, а і утворення інертних газів;

- суттєвий вплив на процес переходу горючого матеріалу при застосуванні вогнезахисного покриття здійснює перехід до групи важко займистих матеріалів, які утворюють на поверхні шару піно коксу, що не поширює полум'я поверхнею та характеризується низькою димоутворювальною здатністю.

Перехід деревини при захисті покриттями та утворення теплоізоляційного шару коксу не може бути вирішена в рамках приведенного дослідження, оскільки потрібно провести додаткові експерименти з метою отримання більш достовірних даних. Зокрема, встановлення моменту часу, з якого починається падіння теплостійкості, що дозволить дослідити поверхню покриття, яка переміщується у сторону підвищеної температури, та визначити ті змінні, що впливають на перетворення покриття у кокс.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесів встановлення зв'язку між природою компонентів і такими властивостями покриттів, як формування піноутворювального коксу, а також стійкість до тепла та погоди.

4. Висновки

Досліджено механізм захисту деревини покриттями при утворенні теплоізолювального шару коксу. Виявлено леткі продукти деструкції та отримано зміну компонентів, а саме, при термічному розкладі вогнезахисної знижується кількість горючих газів та підвищується кількість інертних газів в оберненому порядку.

Показано, що покриття при дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення. Це сприяє утворенню теплоізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню деревини та проходженню високої температури до матеріалу, а саме, з втратою маси 2,1 % та температурою димових газів менше 160 °C. Встановлено, що вироби з деревини при вогнезахисті відносяться до важкогорючих матеріалів, які повільно поширюють полум'я та з низькою димоутворювальною здатністю.

В ході дослідження отримано дані, які дозволяють порівняти покриття для деревини, встановити витрати на оброблення. Результати дослідження стануть у нагоді для проектування будівельних конструкцій.

Література

1. Tsapko, J., Tsapko, A. (2017). Simulation of the phase transformation front advancement during the swelling of fire retardant coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (86)), 50–55. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.73542>
2. Krivenko, P. V., Guzii, S., Kravchenko, A. (2013). Protection of Timber from Combustion and Burning Using Alkaline Aluminosilicate-Based Coatings. *Advanced Materials Research*, 688, 3–9. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.688.3>
3. Tsapko, Y., Tsapko, A. (2017). Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (87)), 50–55. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102393>
4. Cirpici, B. K., Wang, Y. C., Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84. doi: <http://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>
5. Fan, F., Xia, Z., Li, Q., Li, Z. (2013). Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*, 76 (5), 844–851. doi: <http://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.02.002>
6. Xiao, N., Zheng, X., Song, S., Pu, J. (2014). Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber. *BioResources*, 9 (3), 4924–4933. doi: <http://doi.org/10.15376/biores.9.3.4924-4933>
7. 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*, 8 (10), 6315–6319. doi: <http://doi.org/10.1021/acsami.6b00598>
8. Md Nasir, K., Ramli Sulong, N. H., Johan, M. R., Afifi, A. M. (2018). An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment & Resin Technology*, 47 (2), 142–153. doi: <http://doi.org/10.1108/prt-09-2016-0089>
9. Erdoğan, Y. (2016). Production of an insulation material from carpet and boron wastes. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 152, 197–202. doi: <http://doi.org/10.19111/bmre.74700>
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 composite. *Composites Part B: Engineering*, 114, 101–110. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>