

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-60>

УДК 547.1-536.18/.19

ШОЛОГОН ВІКТОР

Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАНУ

<http://orcid.org/0000-0002-6249-5390>e-mail: Shologon@nas.gov.ua**ВАХІТОВ РАМІЛЬ**

Київський національний університет технологій та дизайну

<http://orcid.org/0000-0002-9657-5743>e-mail: vahitov89@gmail.com**КАЛАФАТ КОСТЯНТИН**

Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАНУ

<http://orcid.org/0000-0001-6165-0005>e-mail: kalafat@nas.gov.ua**ТАРАН НАДІЯ**

Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАНУ

<https://orcid.org/0000-0003-1043-5596>e-mail: N.A.Taran@nas.gov.ua

ВПЛИВ ГРАФІТОВИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНТУМЕСЦЕНТНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій є ключовим аспектом пожежної безпеки, спрямованим на збереження їхньої несучої здатності під час впливу високих температур. Це досягається шляхом застосування вогнезахисних покриттів, які уповільнюють нагрівання конструкцій до критичних температур, що надає час для евакуації людей та проведення рятувальних заходів. Попри наявність широкого спектра вогнестійких матеріалів, актуальним залишається питання розробки нових покриттів з покращеними експлуатаційними, екологічними та технічними характеристиками. Сучасні дослідження зосереджені на створенні інтумесцентних систем з підвищеною ефективністю, зменшеною товщиною захисного шару та використанням екологічно безпечних компонентів. Інтумесцентні вогнезахисні покриття є ефективним засобом підвищення пожежної безпеки будівельних конструкцій, що функціонують за принципом утворення захисного пінококсового шару при впливі високих температур. Одним із ключових напрямків удосконалення таких покриттів є використання графітових наповнювачів, зокрема терморозширюваного графіту (EG) та спученого графіту (SG), для оптимізації їх термостійкості та механічної міцності. Метою даного дослідження є визначення впливу графітових наповнювачів на ефективність спучення інтумесцентних покриттів шляхом оцінки об'ємного коефіцієнта спучення та втрати маси. Вивчено вплив варіювання складу інгредієнтів вогнезахисної системи на основі амоній поліфосфату, меламіну, пентаеритриту та етиленвінілацетату. Результати досліджень свідчать, що EG забезпечує інтенсивне спучення, утворюючи захисний шар з низькою теплопровідністю, проте його використання в чистому вигляді провокує створення нерегулярної рихлої структури коксового залишку та зниження адгезії до захищаємої поверхні. Водночас SG стабілізує структуру коксу, покращуючи його механічні характеристики, але не сприяє активному газоутворенню. Дослідження підтверджує ефективність графітових наповнювачів у складі інтумесцентних покриттів та їхній значний потенціал для покращення реактивних вогнезахисних систем. Отримані результати можуть бути рекомендовані при визначенні оптимальної рецептури інтумесцентних покриттів на неорганічній підкладці з метою розроблення рулонних матеріалів для вогнезахисту сталевих, дерев'яних конструкцій та кабельних комунікацій. Подальші роботи можуть бути зосереджені на визначенні оптимальних концентрацій EG та SG для досягнення максимального рівня вогнезахисту та екологічної безпеки покриттів.

Ключові слова: вогнезахисне покриття, терморозширюваний графіт, спучений графіт.

SHOLOGON VICTOR

L. M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine

VAKHITOV RAMIL

Kyiv National University of Technologies and Design

KALAFAT KOSTYANTIN

L. M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine

TARAN NADIA

L. M. Litvinenko Institute of Physical Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine

THE INFLUENCE OF GRAPHITE FILLERS ON THE EFFICIENCY OF INTUMESCENT FIRE PROTECTION COATINGS

Ensuring the fire resistance of building structures is a key aspect of fire safety aimed at maintaining their load-bearing capacity when exposed to high temperatures. This is achieved through the use of fire protection coatings that slow down the heating of structures to critical temperatures, which provides time for evacuation and rescue operations. Despite the availability of a wide range of fire-resistant materials, the issue of developing new coatings with improved performance, environmental and technical characteristics remains relevant. Current research is focused on the creation of intumescent systems with increased efficiency, reduced thickness of the protective layer and the use of environmentally friendly components. Intumescent fire protection coatings are an effective means of improving the fire safety of building structures, which operate on the principle of forming a protective foam-char layer when exposed to high temperatures. One of the key areas of improvement of such coatings is the use of graphite fillers, in particular thermally expandable graphite (EG) and swollen graphite (SG), to optimise their heat resistance and mechanical strength. The aim of this study is to determine the effect of graphite fillers on the swelling efficiency of intumescent coatings by evaluating the volume coefficient of swelling and mass loss. The influence of varying

the composition of the ingredients of the fire protection system based on ammonium polyphosphate, melamine, pentaerythritol and ethylene vinyl acetate was studied. The research results show that EG provides intensive swelling, forming a protective layer with low thermal conductivity, but its use in pure form provokes the creation of an irregular loose structure of the char residue and a decrease in adhesion to the protected surface. At the same time, SG stabilises the char structure, improving its mechanical characteristics, but does not contribute to active gas formation. Graphite fillers interact with other components of the intumescent system, which affects the swelling mechanisms and stability of the protective layer. The study confirms the efficiency of graphite fillers in intumescent coatings and their significant potential for improving reactive fire protection systems. The results obtained can be recommended for determining the optimal formulation of intumescent coatings on an inorganic substrate for the development of roll materials for fire protection of steel and wooden structures and cable communications. Further work may focus on determining the optimal concentrations of EG and SG to achieve the maximum level of fire protection and environmental safety of the coatings.

Keywords: fire protection coating, expandable graphite, swollen graphite.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 30.04.2025

Постановка проблеми

Вогнезахист будівель і споруд спрямований на підвищення несучої здатності будівельних конструкцій шляхом застосування вогнезахисних покриттів, які сповільнюють досягнення конструкціями критичного стану під впливом високих температур пожежі. Вогнезахисна обробка застосовується до всіх типів будівельних конструкцій незалежно від матеріалу їхнього виготовлення (сталь, залізобетон, пластик, дерево, скло тощо), їхньої форми та умов експлуатації. Серед різних видів вогнезахисних покриттів найбільш поширеними є інтумесцентні реактивні покриття, здатні до спучування під впливом високих температур.

Інтумесцентні покриття є складними багатокомпонентними системами. Рецептури цих покриттів вимагають удосконалення для досягнення раціональних поєднань таких основних параметрів покриттів, як кратність спучування та зміна маси. Технологія виробництва таких покриттів дозволяє використовувати різноманітні види сировини як функціональні добавки: спучувальні компоненти, антипірени, наповнювачі, стабілізатори та ін. Так, важливим напрямом наукових досліджень, спрямованих на підвищення вогнезахисту будівельних матеріалів, залишається вивчення впливу графітових наповнювачів на ефективність вогнезахисних покриттів. Незважаючи на досить широкий асортимент вогнестійких складів, потреба у створенні нових покриттів із покращеними експлуатаційними, екологічними та технічними характеристиками властивостями залишається актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтумесцентні вогнезахисні (intumescent flame retardant, IFR) покриття – це особливий клас матеріалів, які під час нагрівання утворюють пористий теплоізоляційний пінококс. Об'єм отриманого коксового шару у 10–100 разів перевищує початковий об'єм покриття, а його низька теплопровідність сприяє ефективному захисту поверхні конструкції від дії теплового випромінювання та відкритого полум'я [1, 2]. На сьогодні найбільш вивченою та типовою системою IFR є суміш амоній поліфосфат (APP)/меламін (MA)/пентаеритрит (PE), яка масово застосовується у світовій протипожежній індустрії для виробництва засобів реактивного вогнезахисту. Основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються при впливі високих температур на IFR, супроводжуються значним ендотермічним ефектом. При цьому утворюються гази, такі як аміак, вуглекислий газ та водяна пара, які, проходячи крізь нагріті шари, охолоджують пінококс і відводять частину теплової енергії.

Утворений вуглецевий шар функціонує як фізичний бар'єр для обмеження тепло- і масообміну та дифузії горючих газів між газовою та конденсованою фазами. А ефективність вогнезахисту цього шару залежить як від співвідношення основних компонентів IFR (APP, MA, PE, полімер), так і від інших домішок та наповнювачів [3].

Огляд останніх досліджень свідчить, що часто системи інтумесцентного типу містять у складі графітові наповнювачі: терморозширюваний графіт (expandable graphite, EG) та/або спучений графіт (swollen graphite, SG) [4, 5]. Терморозширюваний графіт – це інтеркальований графіт, який при нагріванні до ~150–250 °C різко збільшується в об'ємі за рахунок вивільнення газоподібних сполук. EG надає покриттям необхідні експлуатаційні властивості – гнучкість, довговічність, стійкість до шкідливих впливів. У низці наукових публікацій повідомляється також про синергетичний ефект від комбінації IFR та EG у напрямку покращення вогнезахисних властивостей полімерних матеріалів та покриттів [6–8].

EG демонструє високу вогнезахисну ефективність, низьку токсичність і бездимність, що робить його оптимальним матеріалом для вогнезахисних матеріалів. Тим не менш, у процесі горіння коксовий шар, утворений EG, має низьку адгезію та схильний до руйнування під дією термічної конвекції. У складі IFR (APP/MA/PE) домішки EG можуть провокувати раннє спучення ($T < 150$ °C) задовго до початку спрацювання IFR ($T > 215$ °C). Такий незлагоджений механізм терморозкладання компонентів під дією полум'я може порушувати гармонійність фізико-хімічних процесів в інтумесцентній системі, а тим самим зменшувати міцність утвореного коксового шару та може провокувати його передчасне терморозкладання та вигорання [5, 6].

Спучений графіт (SG) – це вже розширений графіт, який не збільшується в об'ємі при нагріванні у складі IFR. SG забезпечує стабільність структури коксового шару, але сам по собі не

сприяє утворенню газоподібних сполук [9, 10]. EG та SG мають різні механізми впливу на інтумесцентні покриття: EG покращує активне спучення, а SG змінює коксовий залишок. EG зменшує втрату маси при оптимальному дозуванні, тоді як SG мінімально впливає на Δm . Найкращі результати можна досягнути при комбінуванні EG з SG для забезпечення рівноваги між коефіцієнтом спучування та механічною стабільністю коксового шару. Таким чином, ефективність інтумесцентного покриття значно залежить від збалансованого складу EG та SG, що впливає на рівень спучування, термостійкість і механічну міцність коксового шару [10, 11].

Метою дослідження є визначення впливу графітових наповнювачів (терморозширюваного графіту та спученого графіту) на показники ефективності спучення інтумесцентних покриттів: об'ємний коефіцієнт спучення (K) та втрату маси (Δm). Дослідження направлене на оптимізацію реактивних вогнезахисних систем складу APP/MA/PE/TiO₂/етиленвінілацетат (EVA). Об'єктом дослідження є інтумесцентні покриття, нанесені на металеву підкладку та скловолоконну сітку. Варіації складу включають зміну кількості APP, EG, SG та діоксиду титану, а також їх комбінації у складі системи.

Виклад матеріалу дослідження

Інтумесцентні вогнезахисні композиції, що були приготовані із варіюванням складу інтумесцентної системи за основними компонентами – APP, MA, PE, TiO₂, полімер EVA, вмісту терморозширюваного графіту та спученого графіту, представлені в табл. 1.

Приготування інтумесцентних композицій (IFR). В дисольвер лабораторний з об'ємом робочої чаші 1 дм³ поміщали воду та компоненти інтумесцентної композиції: поліфосфат амонію, пентаеритрит, меламін, діоксид титану за необхідних співвідношень. Суміш перемішували протягом 60 хв. при швидкості фрези 900–1000 об/хв. Потім додавали EG або SG та перемішували протягом 15 хв. при швидкості фрези 500–600 об/хв. До отриманої пасти додавали водну дисперсію полімеру та перемішували при швидкості фрези 500–600 об/хв. протягом 30 хв. При приготуванні інтумесцентних композицій додатково застосовували диспергатор, піногасник та загущувач у кількостях 1–2 мас. %.

Вогнезахисні покриття, параметри вогнезахисної ефективності (K (см³/г) та Δm (%)) яких досліджувалися в роботі, складаються із інтумесцентного шару – відповідної композиції IFR (табл. 1) та підкладки (скловолоконної сітки або металеві підкладки). Результати цих експериментів наведені в табл. 2. Визначення об'ємного коефіцієнта спучення інтумесцентних композицій (табл. 1) K та маси коксового залишку проводили у термошафі за описаною методикою [12]. У випадку рулонних покриттів (табл. 2) для визначення коефіцієнта спучення використовували фрагмент покриття розміром 2х2 см.

Дані, наведені в табл. 2, свідчать про те, що найменший показник спучення (K = 9–10 см³/г) має IFR1,– покриття, що містить 61,5% EG з EVA без інших інгредієнтів. Це свідчить про те, що EG самостійно не забезпечує високого рівня спучення. Введення поліфосфату амонію значно покращує спучення (IFR2 – K=34–36 см³/г).

Таблиця 1

Співвідношення компонентів (%) в інтумесцентних композиціях

№ IFR	APP	PE	MA	TiO ₂	EVA	EG	SG
IFR1	-	-	-	-	38,5	61,5	-
IFR2	31,5	-	-	-	37,0	31,5	-
IFR3	34,5	-	-	11,0	37,9	16,6	-
IFR4	38,0	11,4	14,2	14,2	22,2	-	-
IFR5	31,7	14,1	10,6	15,7	12,0	15,9	-
IFR6	27,8	11,6	12,0	12,0	20,7	15,9	-
IFR7	36,3	16,1	12,1	20,2	13,7	1,6	-
IFR8	35,4	7,7	7,7	10,8	30,8	7,6	-
IFR9	34,1	8,9	8,9	10,4	25,9	11,8	-
IFR10	27,8	12,3	9,3	15,4	21,5	24,7	-
IFR11	27,5	8,3	10,3	10,3	16,1	27,5	-
IFR12	37,2	11,2	14,0	14,0	21,8	-	1,8
IFR13	36,6	11,0	13,7	13,7	21,4	-	3,6
IFR14	31,4	9,4	11,8	11,8	18,4	15,7	1,5
IFR15	30,9	9,3	11,6	11,6	18,1	15,5	3,0
IFR16	34,1	10,2	12,8	12,8	19,9	8,5	1,7
IFR17	33,5	10,1	12,6	12,6	19,6	8,4	3,2

Композиції APP/MA/PE демонструють очікувано високі показники (наприклад, IFR4 – K=50–54 см³/г). Найвищий коефіцієнт спучення спостерігається для IFR11 (K=52–54 см³/г), що може бути пов'язано з оптимальним балансом компонентів. Введення SG у невеликих кількостях (IFR12 – IFR17)

не призводить до суттєвого покращення параметрів K , хоча деякі композиції (наприклад, IFR12, IFR14) демонструють достатньо високі показники ($K = 44\text{--}54\text{ см}^3/\text{г}$). Порівняння IFR10 (з 24,7% EG) та IFR12 (з 1,8% SG) показує, що наявність SG не дає значного покращення у порівнянні з високим вмістом EG. Домішки діоксиду титану у композицію EVA/EG/APP суттєво знижують коефіцієнт спучення (IFR3), але при цьому збільшується коксовий залишок інтумесцентної системи.

Загалом значення коефіцієнта спучення K трохи підвищуються при використанні скловолоконної сітки, що може бути пов'язано з кращою стабілізацією коксового залишку.

Найменші втрати маси (30–39%) спостерігаються у IFR11–IFR14, що вказує на більш термостабільну структуру пінококсу. Найбільші втрати маси (67%) має IFR1, що ще раз підтверджує недостатню ефективність EG у складі без APP.

Варіювання кількості графіту EG у межах 25–28% підвищує інтенсивність спучення інтумесцентної системи (IFR10, IFR11, табл. 2). Проте, коксовий залишок при цьому має нерегулярну рихлу структуру, втрачає міцність та адгезію до поверхні. Не змінює ситуацію й повна (IFR12, IFR13), або часткова (IFR14–IFR17) заміна графіту EG на графіт SG. Можливі коливання значень інтенсивності спучення чи маси коксового залишку в той чи інший бік не мають перспектив для суттєвого підвищення вогнезахисних властивостей розглянутих IFR. Композиції IFR11, IFR12, IFR4 демонструють високий коефіцієнт спучення та низькі втрати маси, що робить їх перспективними для практичного застосування.

Таблиця 2

Коефіцієнт спучення K (см³/г) та втрата маси Δm (%) інтумесцентних композицій при 400 °C

№ IFR	K , см ³ /г		Δm , %	
	На металевій підкладці	На сітці із скловолокна	На металевій підкладці	На сітці із скловолокна
IFR1	10	9	67	65
IFR2	34	36	45	43
IFR3	22	24	36	38
IFR4	50	54	42	44
IFR5	29	30	38	36
IFR6	41	40	43	45
IFR7	45	48	45	47
IFR8	43	42	42	43
IFR9	41	44	42	42
IFR10	41	44	40	39
IFR11	54	52	30	37
IFR12	52	54	38	39
IFR13	39	37	35	36
IFR14	45	44	38	39
IFR15	43	42	41	40
IFR16	40	43	39	36
IFR17	42	44	40	38

Отримані результати можуть бути використані для визначення оптимальної рецептури інтумесцентного покриття на неорганічній підкладці з метою розроблення рулонних матеріалів для вогнезахисту сталевих, дерев'яних конструкцій та кабельних комунікацій.

Висновки

При визначенні залежності вогнестійкості інтумесцентних покриттів від природи та кількості графітових добавок встановлено, що додавання терморозширюваного графіту у кількості до 10 мас. % зміцнює теплозахисний коксовий шар. Терморасширюваний графіт самостійно є неефективною домішкою, але його додавання у комбінації з як з APP, так і з інтумесцентною тріадою покращує показники ефективності спучення. Спучений графіт не має значних переваг перед терморасширюваним графітом у представлених системах.

Графітові наповнювачі взаємодіють з іншими компонентами інтумесцентної системи, що впливає на механізми спучування та стійкість захисного шару. Враховуючи різні механізми участі у процесі термодеструкції інтумесцентного покриття EG та SG, слід зазначити, що подальші дослідження можуть бути спрямовані на визначення найбільш ефективних концентрацій EG та SG для досягнення максимального спучування, термостійкості та механічної міцності пінококсу інтумесцентних систем. Використання графітових наповнювачів може знизити потребу у традиційних антипіренах, покращуючи екологічну безпеку покриттів.

Література

1. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*, 34(2), 120–163. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>
2. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10(14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>
3. Kalafat, K. V., Taran, N. A., Plavan, V. P., Redko, A. M., Efimova, I. V., & Vakhitova, L. M. (2020). The effect of ammonium polyphosphate:melamine:pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 59–68. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-59-68>
4. Андрищенко, Л. А., Борисенко, В. Г., Кудін, О. М., & Горонескуль, М. М. (2019). Інтумесцентні вогнезахисні покриття у сучасному будівництві (огляд). *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 1(29), 121–138. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2602899>
5. Шологон, В. І., Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2023). Модифікація та армування епоксидних покриттів інтумесцентного типу. *Технології та інжиніринг*, 3(14), 77–88. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.8>
6. Zheng, Z., Liu, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2016). Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene. *Journal of Materials Science*, 51(12), 5857–5871. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9887-6>
7. Ma, L., Song, Q., Dong, F., Yang, H., Xia, Z., & Liu, J. (2024). Effect of organic–inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coatings. *Coatings*, 14, 1034. <https://doi.org/10.3390/coatings14081034>
8. Kmeťová, E., Kačíková, D., & Kačík, F. (2024). The effect of intumescent coating containing expandable graphite onto spruce wood. *Coatings*, 14, 490. <https://doi.org/10.3390/coatings14040490>
9. Chung, D. D. L. (2015). A review of exfoliated graphite. *Journal of Materials Science*, 51(1), 554–568. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9284-6>
10. Horrocks, A. R., & Price, D. (Eds.). (2008). *Advances in fire retardant materials*. Woodhead Publishing.
11. Wang, D.-Y. (Ed.). (2017). *Novel fire retardant polymers and composite materials*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01717-0>
12. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., & Vakhitova, L. (2020). Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(106)), 45–54.

References

1. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*, 34(2), 120–163. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>
2. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10(14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>
3. Kalafat, K. V., Taran, N. A., Plavan, V. P., Redko, A. M., Efimova, I. V., & Vakhitova, L. M. (2020). The effect of ammonium polyphosphate:melamine:pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 59–68. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-59-68>
4. Andriushchenko, L. A., Borysenko, V. H., Kudin, O. M., & Horoneskul, M. M. (2019). Intumescentsentni vohnezakhysni pokryttia u suchasnomu budivnytstvi (ohliad). *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(29), 121–138. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2602899>
5. Sholohon, V. I., Vakhitov, R. A., Kalafat, K. V., Taran, N. A., Bessarabov, V. I., & Vakhitova, L. M. (2023). Modyfikatsiia ta armuvannia epoksydnykh pokryttiv intumescentsentnoho typu. *Tekhnolohii ta inzhynirynh*, 3(14), 77–88. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.8>
6. Zheng, Z., Liu, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2016). Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene. *Journal of Materials Science*, 51(12), 5857–5871. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9887-6>
7. Ma, L., Song, Q., Dong, F., Yang, H., Xia, Z., & Liu, J. (2024). Effect of organic–inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coatings. *Coatings*, 14, 1034. <https://doi.org/10.3390/coatings14081034>
8. Kmeťová, E., Kačíková, D., & Kačík, F. (2024). The effect of intumescent coating containing expandable graphite onto spruce wood. *Coatings*, 14, 490. <https://doi.org/10.3390/coatings14040490>
9. Chung, D. D. L. (2015). A review of exfoliated graphite. *Journal of Materials Science*, 51(1), 554–568. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9284-6>
10. Horrocks, A. R., & Price, D. (Eds.). (2008). *Advances in fire retardant materials*. Woodhead Publishing.
11. Wang, D.-Y. (Ed.). (2017). *Novel fire retardant polymers and composite materials*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01717-0>
12. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., & Vakhitova, L. (2020). Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(106)), 45–54.