

УДК 699.842+691.175

А. В. Скрипинець¹, к.т.н. ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-3845-8303)

Н. В. Саєнко², к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0003-4873-5316)

О. М. Григоренко², к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4629-1010)

К. А. Афанасенко², к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-1877-1551)

О. В. Макаренко¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4125-2365)

¹Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

²Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ВАЖКОГОРЮЧА ВІБРОЗАХИСНА МАСТИКА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Розроблено важкогорючу епоксиретанову мастику з підвищеними вібродемпфуючими властивостями та необхідними фізико-механічними властивостями для облицювання внутрішніх металевих поверхонь рухомого складу залізничного транспорту. В якості полімерної матриці використовували епоксиретанові сітчасті полімери. Для зниження горючості використовували вогнезахисну добавку поліфосфат амонію, для надання тиксотропних властивостей – наповнювач із гідрофобізованою поверхнею Аеросил. Як метод дослідження в'язкопружних властивостей застосовували динамічну механічну спектроскопію, за допомогою динамічного релаксометра. Вивчення в'язкопружних властивостей проводили в області ультра низьких частот 0,7–1,0 Гц, що мінімізує дію зовнішніх механічних впливів на зміну структури полімерної матриці в температурному інтервалі від –100 °С до +100 °С. Визначено, що склади на основі олігоефірциклокарбонату, модифікованого епоксидіановим олігомером характеризуються кращими показниками демпфуючої здатності ($\text{tg}\delta=0,97$). Встановлено, що розроблена мастична композиція із вмістом антипірену та тиксотропної добавки має найбільші значення демпфуючої здатності ($\text{tg}\delta=0,45\text{--}0,47$) у високоеластичній області, даний склад може бути використаний як вібропоглинаючий матеріал, працездатний при температурі від –60 °С до +60 °С. В результаті комплексної оцінки пожежної небезпеки було встановлено, що розроблена мастика відноситься до групи вогнезахисних матеріалів з повільним поширенням полум'я, володіє помірно димоутворювальною здатністю і відноситься до категорії помірнонебезпечних матеріалів з точки зору токсичності. Досягнутий рівень характеристик розробленої важкогорючої вібропоглинаючої мастики вказує на перспективу подальшого використання її для облицювання внутрішньої металевої поверхні кузова залізничного рухомого складу з метою забезпечення пожежної безпеки та акустичного комфорту.

Ключові слова: епоксиретанова мастика, в'язкопружні дослідження, демпфування, пожежна безпека, токсичність, залізничний рухомий склад

1. Вступ

З кожним роком вимогам пожежної безпеки на транспорті, що забезпечує пасажирські перевезення, приділяється все більше уваги. Залізничний транспорт на сьогоднішній день є одним з найпопулярніших видів транспорту. Сьогодні технічний стан пасажирських вагонів українського залізничного транспорту характеризується значним зношуванням, що призводить до аварійних ситуацій (близько 85 %) [1–3].

Модернізація внутрішньої частини кузова на ремонтних підприємствах за допомогою інноваційних рішень дозволить відновити цілісність елементів конструкції з продовженням терміну її служби. Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є традиційним рішенням для покращення стану і створення комфорту при перевезенні пасажирів на залізницях [4–6].

Використання таких ПКМ для рухомого складу залізничного транспорту забезпечить його довговічність, зменшення ваги і знижує експлуатаційні витрати. Однак використання ПКМ у пасажирському рухомому складу може збільшити ризик пожежі або загибелі пасажирів [7, 8].

Відомо, що вагон пасажирського поїзда може вигоріти за кілька хвилин (час безпечної евакуації людей з вагона становить 5–6 хвилин з моменту загоряння). Матеріали, з яких виготовлені панелі і перегородки під час пожежі сприяють інтенсивному горінню, температура горіння стелі може досягати 1100 °С.

Ще однією проблемою, пов'язаною з «зношеними» пасажирськими транспортними засобами є підвищення рівня вібрації і шуму, викликаних рухом вагонів, що знижує комфорт пасажирів під час перевезення [9]. Згідно з ДСТУ UIC 513:2004 «Вагони магістральні пасажирські. Настанова з оцінювання комфорту пасажирів залежно від вібрації» вібрації, що впливають на організм пасажирів, можуть викликати дратівливість, головні болі, порушення уваги, підвищену ймовірність неврозів тощо.

Вимоги щодо пожежної безпеки матеріалів та внутрішнього обладнання пасажирських вагонів (систем опалення, вентиляції, електрообладнання) наведені у ДСТУ 4049 та ДСТУ 4493.

Згідно до ДСТУ 4049 «Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Вимоги безпеки. Зі зміною № 1» матеріали, що використовуються у конструкції пасажирського вагона та для внутрішнього немеханічного обладнання, повинні відповідати наступним вимогам щодо пожежної безпеки: група горючості – негорючі або важкогорючі, коефіцієнт димоутворювальної здатності – не більшим 500 м²/кг; за показником токсичності відповідати класу малонебезпечних або помірнобезпечних; текстильні матеріали повинні бути важкозаймистими згідно з ДСТУ 4155.

Отже, актуальність даної теми обумовлена потребою впровадження заходів щодо зниження пожежної небезпеки залізничного транспорту та вібраційного впливу, що виникає внаслідок руху вагона. Ці заходи спрямовані на збільшення безпеки пасажирських перевезень та зниження ризику пожеж та інших аварійних ситуацій на залізничному транспорті.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Згідно до ДСТУ 7773 «Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальні технічні вимоги» і ДСТУ 7774 «Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загально технічні норми для розрахування та проектування механічної частини вагонів» та ДСТУ 7776 «Вагони-самоскиди (думпкари). Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих думпкарів залізниць колії 1520 мм» застосовують лакофарбові покриття на основі фенолоформальдегідних, поліуретанових, епоксидних олігомерів, що забезпечує конструкції пасажирського вагона довговічність, антикорозійні та водостійкі властивості. Однак призначення цих лакофарбових тонкошарових покриттів – забезпечити надійність вже наявних покриттів. У зв'язку з цим актуальним є забезпечення комплексної пожежної безпеки та віброзахисних властивостей пасажирських вагонів за допомогою полімерних композиційних мастик, товщиною від 2 до 4 мм.

В роботах [10, 11] наведено такі традиційні полімерні мастики на основі невисихаючих герметиків, як хлорбутилкаучук, поліетилен, поліізобутилен. Недоліком використання таких складів у залізничному рухомому складі є те що вони відносяться до горючих речовин. Інша група полімерних мастик на основі водної полівінілацетатної дисперсії, що використовуються для внутрішньокорпусних покриттів залізничних вагонів, характеризується зниженою горючістю та стабільністю технологічних властивостей. Однак недоліком таких відомих матеріалів є

низькі віброакустичні показники (коефіцієнт механічних втрат 0,2 при температурі 20 °С) [12].

В роботі авторів [13] було показано, що з точки зору технології одержання та застосування вібропоглинаючих покриттів найбільш доцільно використання отверджуючих систем на основі сумішей олігоєфірциклокарбонатних та епоксидіанових олігомерів. Для поверхонь деталей машин, механізмів, захисних кожухів, транспортних засобів з метою зниження рівня вібрації та шумів також застосовуються важкогорючі мастики [13] на основі епоксидного олігомеру з цільовими добавками. Основним недоліком є те, що вони характеризуються недостатнім рівнем демпфуючої здатності (коефіцієнт механічної сили 0,25 при температурі 20 °С). При переведенні таких олігомерів в твердий стан за допомогою амінів – отримуємо зшиті епоксигідроксиуретанові полімерні композиції, що поєднують у собі високі значення адгезійно-механічної міцності [14, 15] та тангенсу кута механічних втрат, але мають не визначенні показники щодо їх пожежної безпеки.

У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є відсутність комплексного підходу до розробки та впровадження важкогорючих і віброзахисних полімерних мастик для залізничного рухомого складу. У той же час як і раніше існує необхідність в розробці матеріалів, що одночасно забезпечують пожежну безпеку, мають високі віброакустичні характеристики і відповідають всім стандартам безпеки та якості.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка та оцінка можливості використання важкогорючої епоксидуретанової мастики з підвищеними вібропоглинаючими характеристиками і необхідними фізико-механічними властивостями для облицювання внутрішніх металевих поверхонь кузовів рухомого залізничного складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити вплив реакційно здатних олігомерів і вогнезахисної добавки на в'язкопружні властивості полімерної матриці та розробити склади наповнених епоксидуретанових мастик з підвищеними вібродемпфуючими властивостями та необхідними фізико-механічними властивостями.

2. Провести комплексну оцінку пожежної безпеки розробленої епоксидуретанової мастики за наступними показниками: група горючості, коефіцієнт димоутворення, показник токсичності горіння продукту та індекс поширення полум'я.

4. Матеріали та методи дослідження

Предметом дослідження є епоксидуретанові (ЕУ) сітчасті полімери, отримання яких засноване на взаємодії суміші циклокарбонатвмісних та епоксидних олігомерів з амінами.

Об'єктом дослідження є процеси підвищення вібродемпфуючих властивостей та пожежної безпеки епоксидуретанових мастик для застосування у внутрішньому облицюванні кузовів рухомого залізничного складу.

Беручи до уваги вищевикладене, сформульовано наукову гіпотезу: підвищити вібродемпфуючі та вогнестійкі властивості епоксидуретанової мастики можна шляхом підбору співвідношення олігомерів та введення наповнювачів (вогнезахисної та тиксотропної добавки). Вважається, що взаємна модифікація епоксидних і уретанових олігомерів поєднує одночасно міцності і релаксаційні властивості, що дозволить отримати композиції з високими демпфуючими характеристиками.

ками. В якості вогнезахисної добавки запропоновано використання поліфосфат амонію для збільшення виходу нелеткого коксового залишку та зменшення горючих продуктів піролізу з утворенням поверхневого склоподібного розплавленого шару поліметафосфорної кислоти. Для отримання мастики передумовою є введення поверхнево-модифікованого аеросилу до полімерної матриці, що надасть змогу при незначному підвищенні ефективної в'язкості збільшити їх ступінь структурованості.

Тож, для отримання епоксиретанових композицій використовували олігоєфірциклокарбонат марки Лапролат (ОЦК) і епоксидно-діановий олігомер марки ЕД-20 (ЕД). Для отвердження олігомерів використовували діетилентріамін (ДЕТА) – отверджувач амінного типу.

Для зниження горючості ПКМ використовували вогнезахисну добавку – поліфосфат амонію (ПФА) у кількості 25 мас.ч. Основною перевагою ПФА є вміст азоту в межах 14–15 % та фосфору не менше 70 %. Для надання мастиці тиксотропних властивостей використовували наповнювач із гідрофобізованою поверхнею Аеросил марки АМ-1-300 у кількості 1,5 мас.ч.

Двокомпонентну мастику наносили на металеву поверхню методом наплення або спеціальним шпателем завтовшки 2–3 мм.

В якості основного методу вивчення в'язкопружних характеристик було обрано метод динамічної механічної спектроскопії, який реалізується на крутильному маятнико-динамічному релаксометрі. Такий метод дозволяє дослідити властивості полімерних матеріалів в області ультра низьких частот. Вивчення в'язкопружних властивостей ПКМ, проводили в області ультра низьких частот 0,7–1,0 Гц, що мінімізує дію зовнішніх механічних впливів на зміну структури ПКМ [16] в температурному інтервалі від -100°C до $+100^{\circ}\text{C}$. З отриманих експериментальних даних розраховувалися динамічний модуль пружності (G' , E'), тангенс кута механічних втрат $\text{tg}\delta$ і модуль втрат G'' . Ці показники пов'язані між собою $\text{tg}\delta=G''/G'$.

Для вивчення комплексної оцінки пожежної безпеки розроблених мастик проводили дослідження згідно ДСТУ 4049 «Вагони пасажирські локомотивної тяги. Вимоги безпеки». Для порівняльної оцінки пожежної безпеки розроблених епоксиретанових мастик використовували аналог на основі епоксидної смоли: група горючості (ДСТУ 8829:2019), нижня теплота згоряння, ΔH_c , кДж/кг (ДСТУ ISO 1928:2006), коефіцієнт димоутворення, D_m , $\text{m}^2/\text{кг}$, (ДСТУ 8829:2019).

Для обробки експериментальних даних та розрахунку динаміко-механічних характеристик, комплексної оцінки пожежної безпеки використовувалися спеціалізовані програмні засоби: LabVIEW та Mathcad.

5. Дослідження епоксиретанових олігомерів і вогнезахисної добавки на в'язкопружні властивості полімерної матриці

Результати досліджень динамічних механічних властивостей сітчастих епоксиретанових композицій (ЕУ) залежно від співвідношення епоксидного олігомеру та олігоєфірциклокарбонату (ЕД:ОЦК) наведені на рис. 1 (температурні залежності динамічного модуля зсуву G') та рис. 2 (тангенс механічних втрат $\text{tg}\delta$).

Як видно з рис. 1 та рис. 2, зі збільшенням вмісту епоксидного олігомеру ЕД у суміші з олігоєфірциклокарбонатним олігомером від 10:90 до 30:70 мас.ч., температура склування (пік $\text{tg}\delta$) епоксиретанових композицій спочатку знижується на 5°C , досягаючи мінімуму при вмісті 20 мас.ч. ЕД. Після цього температура склування підвищується на 11°C , що супроводжується розширенням піку $\text{tg}\delta$ та

зменшенням максимальних значень $\text{tg}\delta$.

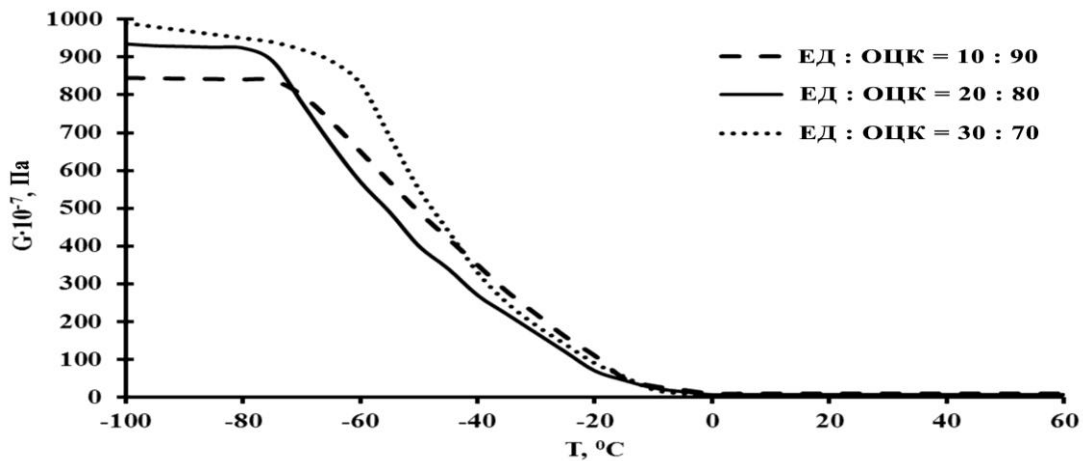


Рис. 1. Температурні залежності динамічного модуля зсуву G' ЕУ композицій від співвідношення олігомерів ЕД:ОЦК=10:90, 20:80, 30:70 мас.ч.

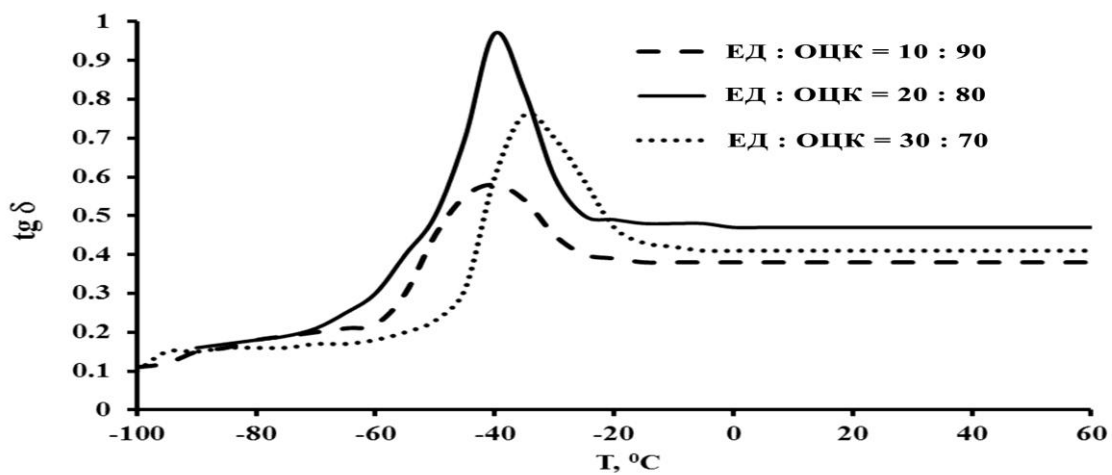


Рис. 2. Температурні залежності тангенсу механічних втрат $\text{tg}\delta$ ЕУ композицій від співвідношення олігомерів ЕД:ОЦК=10:90, 20:80, 30:70 мас.ч.

Поряд з цим для складу ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч. відзначається звуження піку механічних втрат і підвищення максимального значення $\text{tg}\delta$ до 0,97. Така зміна в характеристиках піку механічних втрат вказує на підвищення кооперативності процесу розморожування молекулярної рухливості основних сегментів полімерної сітки, що властиво для полімерів з більш однорідною структурою. Крім того, при цьому співвідношенні у високоеластичному стані найбільший рівень $\text{tg}\delta$ характерний для складу ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч. і становить приблизно 0,48–0,50.

Результати досліджень динамічних механічних властивостей сітчастих епоксидних композицій наведені на рис. 3 і рис. 4. На цих рисунках показані температурні залежності тангенса кута механічних втрат ($\text{tg}\delta$) і динамічного модуля зсуву (G') для різних епоксидних олігомерів (рис. 3) і композицій, наповнених поліфосфатом амонію та аеросилом (рис. 4). З графіків видно, що форма кривих динамічного модуля і тангенса кута механічних втрат при зміні температури схожа з кривими для ненаповнених композицій.

Аналіз кривих зміни динамічного модуля зсуву показав, що введення до складу ПФА та Аеросилу приводить до збільшення модуля на 20%. При цьому відбувається більш повільна зміна динамічного модуля в міру підвищення темпе-

ратури до температур початку процесу «розклування», а сама область «розклування» зміщується різною мірою у бік вищих температур, а температурний інтервал α -переходу не зазнає помітних змін, на відміну від ненаповнених ЕД:ОЦК композицій.

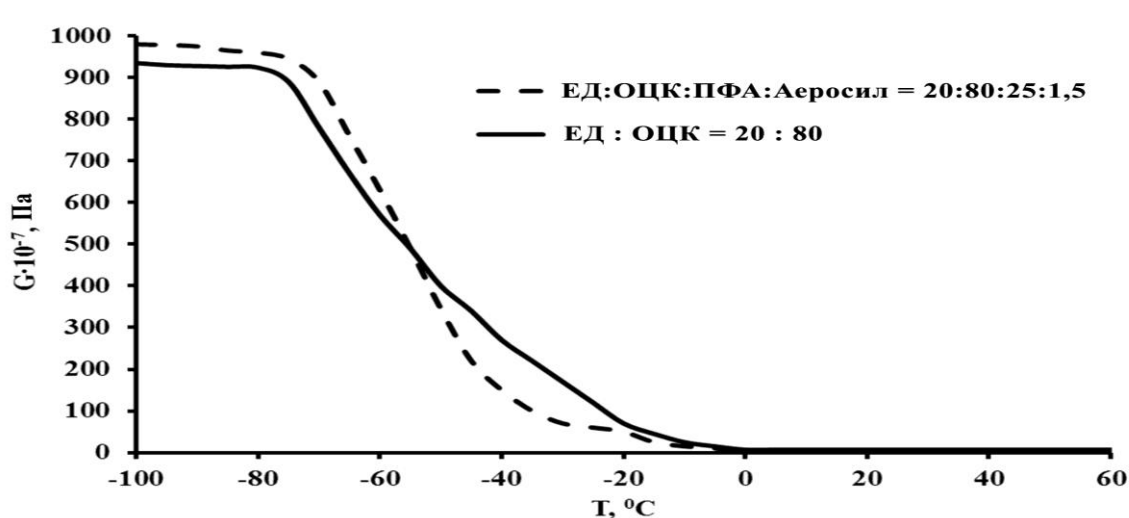


Рис. 3. Температурні залежності динамічного модуля зсуву G' ненаповненої ЕУ композиції (ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч.) та наповненою композиції ПФА та Аеросилом

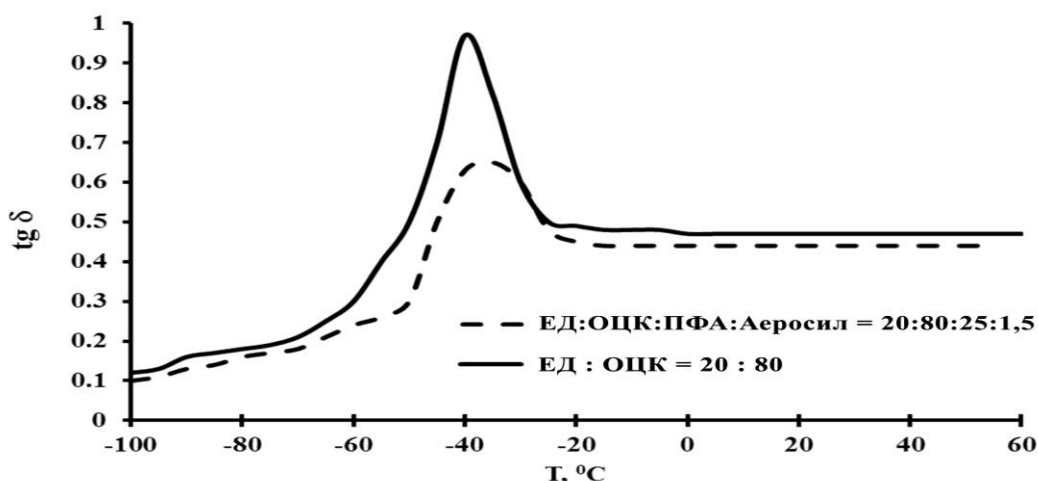


Рис. 4. Температурні залежності тангенса механічних втрат $\text{tg}\delta$ ненаповненої ЕУ композиції (ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч.) та наповненою ПФА та Аеросилом

Деяких змін зазнає і температурна залежність $\text{tg}\delta$ наповнених ЕУ композицій. Показано, що введення ПФА та Аеросилу призводить до незначного підвищення температури склування (близько 3 °С), але сприяє зниженню механічних втрат на 33 % (від 0,97 до 0,65) порівняно з ненаповненою композицією.

6. Дослідження пожежної безпеки розробленої епоксиретанової мастики

Для комплексної оцінки пожежної безпеки розроблених мастик проводили дослідження згідно ДСТУ 4049 «Вагони пасажирські локомотивної тяги. Вимоги безпеки». Для порівняльної оцінки пожежної безпеки розроблених епоксиретанових мастик використовували аналог на основі епоксидної смоли (табл. 1).

В табл. 2 наведені результати токсикологічних досліджень аналогу на основі епоксидної смоли та розробленої епоксиретанової віброзахистної мастики.

Табл. 1. Вимоги пожежної безпеки згідно ДСТУ 4049

Показники	Аналог на основі епоксидної смоли	Розроблена епоксидно-уретанова композиція
Група горючості (ДСТУ 8829:2019)	горючий, середньої займистості	важкогорючий, важкої займистості
Нижня теплота згоряння, ΔH_c , кДж/кг (ДСТУ ISO 1928:2006)	32060	19780
Коефіцієнт димоутворення, D_m , м ² /кг, (ДСТУ 8829:2019)		
– при тлінні	1307,5	986
– полум'яне горіння	552,6	485
Індекс поширення полум'я (ДСТУ 8829:2019)	22,8 швидко поширюють полум'я по поверхні (група І3)	8 повільно поширюють полум'я по поверхні (група І2)

Табл. 2. Токсикологічні дослідження аналогу на основі епоксидної смоли та розробленої епоксидно-уретанової віброзахистної мастики

Показник токсичності продуктів горіння за різних температур	Композиції	
	Аналог на основі епоксидної смоли	Розроблена епоксидно-уретанова композиція
H_{CL50} , г/м ³	450 °С	65,5±6,3
HbCO, %		55,6±7,6
H_{CL50} , г/м ³	750 °С	58,4±2,6
HbCO, %		59,2±2,9
H_{CL50} , г/м ³	750 °С	86,1±9,9
HbCO, %		88,5±10,3
		61,6±3,1
		62,8±3,1

Матеріали випробувалися в двох режимах: в термоокислювальному розкладанні (450 °С) та в полум'яному горінні (750 °С). Крім того, дуже важливим є показник HbCO, що показує вміст карбоксигемоглобіну в крові загиблих піддослідних тварин відразу після експозиції в камері згоряння. За цим показником визначають переважні біохімічні механізми токсичної дії продуктів горіння. Вважається, що токсичний ефект продуктів горіння обумовлюється переважно дією монооксиду вуглецю, коли у крові тварин значення HbCO становлять 50 % і більше. Однак, автори робіт [17–20] вважають, що тільки при концентраціях HbCO менше 60 % токсичний ефект, несумісний з життям, обумовлений присутністю в газовій суміші як провідних (монооксид вуглецю та діоксид вуглецю), так і мінерних компонентів (зокрема для пінополіуретанів присутністю в суміші ціаністого водню), а також їх комбінованим впливом.

7. Обговорення результатів можливості використання розробленої епоксидно-уретанової мастики

Запропонований підхід отримання ефективного вібропоглинаючого матеріалу на основі полімерної композиції полягає на створенні таких композицій, які б володіли у необхідному діапазоні температур і частот максимальними значеннями тангенса механічних втрат ($tg\delta$) або модуля механічних втрат G'' , які відповідно є мірою розсіяної енергії [21, 22]. При цьому максимальні значення $tg\delta$ повинні знаходитися в області переходу від склоподібного до в'язкопружного стану.

Проведений аналіз показав, що зміна динамічних властивостей із збільшенням вмісту ЕД на перший погляд неоднозначна (рис. 1, 2). При вмісті 20 % мас.ч. ЕД в суміші олігоефірциклокарбонатному олігомеру спостерігається збільшення піку максимального значення $tg\delta$ та його звуження, що свідчить про впорядкуван-

ня сегментарної здатності та підвищення структурної однорідності. Однак зсув піку $\text{tg}\delta$, температури склування на 3–5 °C до нижчих температур, подовження інтервалу склування, більш різке зниження модуля зсуву в склоподібному стані та поява додаткових піків $\text{tg}\delta$ низької інтенсивності в області (–80) °C – (–70) °C свідчать про деяке розпушення структури.

При подальшому збільшенні концентрації ЕД до 30 мас.ч. разом зі збільшенням абсолютних значень модуля пружності в склоподібному стані (при –100 °C) спостерігається ще більш різке зниження з підвищенням температури, що свідчить про подальше розпушення структури відповідних полімерів у склоподібному стані. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням вмісту ЕД збільшується щільність просторової сітки та кількість об'ємних ароматичних структур, які знижують ефективність міжмолекулярної взаємодії в склоподібному стані, внаслідок чого локальна молекулярна рухливість за рахунок руху фрагментів гідроксиуретанових ланцюгів буде «розморожуватися» при більш низьких температурах.

Як видно з рис. 2, найбільші значення $\text{tg}\delta=0,48\text{--}0,50$ у високоеластичному стані спостерігаються для ЕУ матеріалів при співвідношенні суміші ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч., тому дану композицію можна використовувати як основу для створення вібропоглинаючих мастик.

У попередніх дослідженнях авторами було встановлено [9, 23], що для ефективного зниження горючості сітчастих композицій можна використовувати вогнезахисну добавку поліфосфат амонію (ПФА) у кількості 25 мас.ч. У результаті динамічно-механічних та в'язкопружних досліджень встановлено, що мастика ЕД:ОЦК, яка наповнена ПФА та Аеросилом, має високі демпфуючі властивості ($\text{tg}\delta=0,45\text{--}0,47$) у високоеластичній області, тому з практичної точки зору даний матеріал може працювати як при низьких (від –60 °C), так і при помірних температурах (+60 °C).

Комплексна оцінка пожежної безпеки розробленої епоксидуретанової мастики показала, що розроблена епоксидуретанова мастика відноситься до групи важкогорючих матеріалів, при введенні антипірену знижується коефіцієнт димоутворення при горінні ($Dm=485\text{ м}^2/\text{кг}$), що дозволяє віднести розроблений матеріал до групи з помірною димоутворювальною здатністю (табл. 1). Це, очевидно, зумовлено високою адсорбційною здатністю отриманого коксу та особливостями процесу деструкції. Відповідно до здатності матеріалу займатися, поширювати полум'я по поверхні та виділяти тепло, розроблений матеріал відноситься до групи, що повільно поширюють полум'я по поверхні.

Однак до ПКМ, що використовуються для облицювання внутрішніх металевих поверхонь рухомого складу залізничного транспорту, висуваються дуже жорсткі вимоги не тільки по горючості, але і по ряду інших характеристик, пов'язаних з цим процесом. По-перше, ПКМ не повинні виділяти при горінні токсичних і подразнюючих дихальні шляхи речовин; по-друге, вони не повинні давати густий їдкий дим, який заважає орієнтуватися в палаючому приміщенні при пошуку шляхів порятунку. Тому для отримання важкогорючих полімерних мастик, що використовуються в замкнутому просторі, необхідні токсикологічні дослідження.

Токсикологічні дослідження мають на меті визначення показника токсичності HCL_{50} , який характеризується тим, що він визначає кількість матеріалу на одиницю об'єму закритого простору, в якому утворюються газоподібні продукти, які призводять до смерті 50 % досліджуваних тварин (згідно з ДСТУ 8829:2019).

З табл. 2 видно, що найменше значення HCL_{50} спостерігається в режимі тління і становить $55,6\text{ г}/\text{м}^3$ для розробленої мастики. Показано, що після затравки

піддослідних тварин газовими сумішами, які були отриманні шляхом спалювання зразків аналога на основі епоксидного олігомеру та розробленою епоксиуретановою мастикою, призвело до загибелі 50 % тварин, вміст HbCO в крові загиблих тварин становив 59,2–62,8 %. Отже, для всіх досліджуваних зразків полімерів, незалежно від їх хімічної природи та наявності антипіренів, головною токсичною дією продуктів згоряння є дія оксидів вуглецю. Відповідно до класифікації, згідно п.п. 6.16 ДСТУ 8829:2019 всі досліджувані матеріали віднесені до категорії помірнонебезпечних.

Гіпотеза дослідження стосовно оптимального підбору співвідношення олігомерів та наповнювачів для створення важкогорючої та віброзахисної мастики, що дозволить підвищити її вібродемпфуючі властивості та вогнестійкість для ефективного захисту структурних елементів вагонів, отримала своє підтвердження. При цьому, досягнутий рівень характеристик розробленої важкогорючої віброзахисної мастики свідчить про перспективність її подальшого використання для облицювання внутрішніх металевих поверхонь кузовів залізничного рухомого складу з метою забезпечення їхньої пожежної безпеки та акустичного комфорту.

Подальші дослідження в цьому напрямку можуть ґрунтуватися на більш детальному вивченню впливу наповнювачів різної природи (лускаті, сферичної форми), антипіренів, оптимізації співвідношення компонентів та підбір комплексу технологічних рішень при приготуванні та нанесенні мастики на структурні елементи вагонів. Загалом, розвиток цього дослідження може допомогти в розробці нових важкогорючих та віброзахисних матеріалів для широкого спектру застосувань, включаючи галузь автомобільного, морського та повітряного транспорту. У подальших дослідженнях важливо буде розглядати не лише властивості матеріалів, але й їхні експлуатаційні характеристики в реальних умовах застосування.

8. Висновки

1. Визначено вплив співвідношення реакційноздатних олігомерів та вогнезахисної добавки на в'язкопружні та демпфуючі властивості полімерної матриці. Встановлено, що композиції з епоксидним олігомером у кількості 20 мас.ч. характеризується найкращими показниками демпфуючої здатності ($\text{tg}\delta=0,97$), тому з практичної точки зору цей склад був використаний в якості основи для створення вогне- та віброзахисної полімерної мастики. Показано, що введення антипірену та тиксотропного наповнювача в систему реакційноздатних олігомерів на основі олігоєфірциклокарбонату марки Лапролат та епоксидіанового призводить до незначного підвищення температури склування (близько 3 °C), але сприяє зниженню механічних втрат на 33 % (від 0,97 до 0,65) порівняно з ненаповненими мастиками. У результаті динамічно-механічних та в'язкопружних досліджень встановлено, що розроблена епоксиуретанова мастика зі вмістом вогнезахисної добавки та тиксотропного наповнювача має високі демпфуючі властивості ($\text{tg}\delta=0,45\text{--}0,47$) у високоеластичній області, а тому з практичної точки зору, цей розроблений матеріал може працювати як при низьких (від -60 °C), так і при помірних температурах (до $+60$ °C).

2. Проведено комплексну оцінку пожежної безпеки розробленої епоксиуретанової мастики. Встановлено, що розроблена мастика відноситься до групи важкогорючих матеріалів, з повільним поширенням полум'я, має помірну димоутворювальну здатність, за показником токсичності відповідає класу помірнонебезпечних. Досягнутий рівень характеристик розробленої важкогорючої віброзахисної

мастики свідчить про перспективність її подальшого використання для облицювання внутрішніх металевих поверхонь кузовів залізничного рухомого складу з метою забезпечення їхньої пожежної безпеки та акустичного комфорту.

Література

1. Raja S., Tauseef S. M., Abbasi T., Abbasi S. A. Risk of fuel spills and the transient models of spill area forecasting. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2018. Vol. 18. P. 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1
2. Zhang J., Ji W., Yuan Z., Yuan Y. Pyrolysis, combustion, and fire spread characteristics of the railway train carriages: A review of development. *Energy and Built Environment*. 2023. Vol. 4(6). P. 743–759. doi: 10.1016/j.enbenv.2022.07.001
3. Lattimer B. Y., McKinnon M. A review of fire growth and fully developed fires in railcars. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42(6). P. 603–619. doi: 10.1002/fam.2514
4. Irikovich Z. O., Vyacheslavovich R. R., Mahmud W. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*. 2020. Vol. 9(2). P. 378–381. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005
5. Jagadeesh P., Puttegowda M., Rangappa S. M., Siengchin S. Role of polymer composites in railway sector: an overview. *Applied Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 15(2). P. 5745–5745. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005
6. Andronov V. A., Bukhman O. M., Danchenko Y. M., Skripinets A. V. Efficiency of utilization of vibration-absorbing polymer coating for reducing local vibration. *Науковий Вісник Національного Гірничого університету*. 2014. (6). С. 85–91.
7. Wei Z., Xi Z., Zhuo-fu W. Experiment study of performances of fire detection and fire extinguishing systems in a subway train. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. P. 393–402. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.147
8. Shcholokov E., Otrosh Y., Rashkevich N., Melezhyk, R. Simulation of human evacuation in case of fire using pathfinder software. *Mechanics and mathematical methods*. 2023. Vol. 2. P. 61–71 doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-61-71
9. Skripinets A., Saienko N., Hryhorenko O., Berezovskiy A. Development and Evaluation of the Possibility of Using Epoxyurethane Mastic in Railway Transport. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 273–281. Trans Tech Publications Ltd. URL: <https://www.scientific.net/MSF.1006.273>
10. Hohenwarter D. Experience Gained from Fire Tests According to EN 45 545-2 and DIN 5510-2 for Testing of Seats. *Problemy Kolejnictwa*. 2016. Z. 171. P. 27–38. URL: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-650169a0-2e94-41af-ac24-dd4776d03c48>
11. Saienko N. V., Demidov D. V., Bikov R. A., Younis B. N. Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708(1). 012103. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012103
12. Weibo H., Fengchang Z. Studies on the dynamic mechanical and vibration damping properties of polyether urethane and epoxy composites. *Journal of applied polymer science*. 1993. Vol. 50(2). P. 277–283. doi: 10.1002/app.1993.070500209
13. Plugin A. A., Plugin D. A., Pluhin O. A., Borziak O. S. The influence of the molecular structure of polyurethane on vibro- and electroinsulation properties of the tramway structures. in *proceedings of cee 2019: Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering*. Springer International Publishing. 2020. P. 346–353. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27011-7_44

14. Skripinets A., Saienko N., Bikov R., Maladyka I., Saienko L. Study of viscoelastic properties of epoxyurethane compositions for vibration protection of metal products. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684(1). 040024. doi: 10.1063/5.0133582
15. Skrypinets A. V., Danchenko Yu. M., Kabus O. V. A research on technological and physicochemical laws of manufacturing vibration-absorbing products based on epoxy-urethane polymer compositions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 3. 11(75). P. 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2015.43324
16. Perez J. The study of polymer materials by mechanical spectrometry. *Polymer Science*. 1988. Vol. 40(1). P. 102–135.
17. Roderique J. D., Josef C. S., Feldman M. J., Spiess B. D. A modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. *Toxicology*. 2015. Vol. 334. P. 45–58. doi: 10.1016/j.tox.2015.05.004
18. Hampson N. B. Carboxyhemoglobin: a primer for clinicians. *Undersea Hyperb Med*. 2018. Vol. 45(2). P. 165–171. URL: https://neilhampson.com/uploads/3/4/7/0/34704948/2018carboxyhemoglobin_primer_uhm.pdf
19. Tabian D., Bulgaru Iliescu D., Iov T., Barna B., Toma S. I., Drochioiu G. Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. *Journal of forensic sciences*. 2021. Vol. 66(3). P. 1171–1175. doi: 10.1111/1556-4029.14649
20. Özdemir A., Önder A. An environmental life cycle comparison of various sandwich composite panels for railway passenger vehicle applications. *Environ Sci Pollut Res*. 2020. №. 27. P. 45076–45094. doi: 10.1007/s11356-020-10352-8
21. Zeltmann S. E., Prakash K. A., Doddamani M., Gupta N. Prediction of modulus at various strain rates from dynamic mechanical analysis data for polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017. № 120. P. 27–34. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.062
22. Nashif A. D., Jones D. I. G., Henderson J. P. *Vibration damping*. John Wiley & Sons, 1991. 472 p.
23. Hryhorenko O., Saienko N., Lypovyi V., Harbuz S. Research of effectiveness of wood fire protection by modified epoxy polymers. In *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety*. 2020. Vol. 9. P. 125–128. Springer International Publishing. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41235-7_19

A. Skripinets¹, PhD, Senior Lecturer of the Department

N. Saienko², PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department

O. Hryhorenko², PhD, Associate Professor of the Department

K. Afanasenko², PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

O. Makarenko¹, PhD, Associate Professor of the Department

¹*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*

²*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

USE OF FIRE- AND VIBRATION-PROTECTIVE MASTICS IN RAILWAY TRANSPORT

A difficult combustible epoxyurethane mastic with increased vibration-damping properties and the necessary physical and mechanical properties has been developed for lining internal metal surfaces of railway rolling stock. Epoxyurethane network polymers were used as a polymer matrix. To reduce flammability, the fire-retardant additive ammonium polyphosphate was used, and a filler with a hydrophobized surface was used to impart thixotropic properties Aerosil. Dynamic mechanical spectroscopy using a dynamic relaxometer was used as a method for studying viscoelastic properties. The

study of viscoelastic properties was carried out in the ultra-low frequency range of 0.7–1.0 Hz, which minimizes the effect of external mechanical influences on changes in the structure of the polymer matrix in the temperature range from –100 to +100 °C. It has been determined that compositions based on oligester cyclo-cab modified with an epoxy diene oligomer are characterized by the best damping capacity ($\text{tg}\delta=0.97$). It has been established that the developed mastic composition containing a fire retardant and thixotropic additive has the highest damping capacity ($\text{tg}\delta=0.45\text{--}0.47$) in the highly elastic region; this composition can be used as a vibration-absorbing material, operable at temperatures from –60 °C up to +60 °C. It has been established that the developed mastic belongs to the group of difficult combustible materials, with slow flame propagation, moderate smoke generating ability and are moderately hazardous in terms of toxicity. The achieved level of characteristics of the difficult combustible vibration damping mastic testifies about the prospects of its further use for facing the internal metal surfaces of bodies of railway rolling stock in order to ensure their fire safety and acoustic comfort.

Keywords: epoxyurethane mastic, viscoelastic researches, damping, fire safety, toxicity, railway transport

Referense

1. Raja, S., Tauseef, S. M., Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2018). Risk of fuel spills and the transient models of spill area forecasting. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18, 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1
2. Zhang, J., Ji, W., Yuan, Z., Yuan, Y. (2023). Pyrolysis, combustion, and fire spread characteristics of the railway train carriages: A review of development. *Energy and Built Environment*, 4(6), 743–759. doi: 10.1016/j.enbenv.2022.07.001
3. Lattimer, B. Y., McKinnon, M. (2018). A review of fire growth and fully developed fires in railcars. *Fire and Materials*, 42(6), 603–619. doi: 10.1002/fam.2514
4. Irikovich, Z. O., Vyacheslavovich, R. R., Mahmud, W. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*, 9(2), 378–381. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005
5. Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Rangappa, S. M., Siengchin, S. (2022). Role of polymer composites in railway sector: an overview. *Applied Science and Engineering Progress*, 15(2), 5745–5745. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005
6. Andronov, V. A., Bukhman, O. M., Danchenko, Yu. M., Skripinets, A. V. (2014). Efficiency of utilization of vibration-absorbing polymer coating for reducing local vibration. *Naukovyy Visnyk Natsional'noho Hirnychoho universytetu*, 6, 85–91.
7. Wei, Z., Xi, Z., Zhuo-fu, W. (2016). Experiment study of performances of fire detection and fire extinguishing systems in a subway train. *Procedia Engineering*, 135, 393–402. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.147
8. Shcholokov, E., Otrosh, Y., Rashkevich, N., Melezhyk, R. (2023). Simulation of human evacuation in case of fire using pathfinder software. *Mechanics and mathematical methods*, 2, 61–71 doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-61-71
9. Skripinets, A., Saienko, N., Hryhorenko, O., Berezovskiy, A. (2020). Development and Evaluation of the Possibility of Using Epoxyurethane Mastic in Railway Transport. In *Materials Science Forum*, 1006, 273–281. Trans Tech Publications Ltd. Available at: <https://www.scientific.net/MSF.1006.273>
10. Hohenwarter, D. (2016). Experience Gained from Fire Tests According to EN 45 545-2 and DIN 5510-2 for Testing of Seats. *Problemy Kolejnictwa*, 171, 27–38. Available at: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-650169a0-2e94-41af-ac24-dd4776d03c48>
11. Saienko, N. V., Demidov, D. V., Bikov, R. A., Younis, B. N. (2019). Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1), 012103. URL: doi: 10.1088/1757-Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-20

899X/708/1/012103

12. Weibo, H., Fengchang, Z. (1993). Studies on the dynamic mechanical and vibration damping properties of polyether urethane and epoxy composites. *Journal of applied polymer science*, 50(2), 277–283. doi: 10.1002/app.1993.070500209

13. Plugin, A. A., Plugin, D. A., Pluhin, O. A., Borziak, O. S. (2020). The influence of the molecular structure of polyurethane on vibro- and electroinsulation properties of the tramway structures. in proceedings of cee 2019: Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. Springer International Publishing, 346–353. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27011-7_44

14. Skripinets, A., Saienko, N., Bikov, R., Maladyka, I., Saienko, L. (2023). Study of viscoelastic properties of epoxyurethane compositions for vibration protection of metal products. *AIP Conference Proceedings*, 2684(1), 040024. doi: 10.1063/5.0133582

15. Skrypinets, A. V., Danchenko, Yu. M., Kabus, O. V. (2015). A research on technological and physicochemical laws of manufacturing vibration-absorbing products based on epoxy-urethane polymer compositions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 11(75), 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2015.43324

16. Perez, J. (1988). The study of polymer materials by mechanical spectrometry. *Polymer Science*, 40(1), 102–135.

17. Roderique, J. D., Josef, C. S., Feldman, M. J., Spiess, B. D. (2015). A modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. *Toxicology*, 334, 45–58. doi: 10.1016/j.tox.2015.05.004

18. Hampson, N. B. (2018). Carboxyhemoglobin: a primer for clinicians. *Undersea Hyperb Med*, 45(2), 165–171. Available at: https://neilhampson.com/uploads/3/4/7/0/34704948/2018carboxyhemoglobin_primer_uhm.pdf

19. Tabian, D., Bulgaru Iliescu, D., Iov, T., Barna, B., Toma, S. I., Drochioiu, G. (2021). Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. *Journal of forensic sciences*, 66(3), 1171–1175. doi: 10.1111/1556-4029.14649

20. Özdemir, A., Önder, A. (2020). An environmental life cycle comparison of various sandwich composite panels for railway passenger vehicle applications. *Environ Sci Pollut Res*, 27, 45076–45094. doi: 10.1007/s11356-020-10352-8

21. Zeltmann, S. E., Prakash, K. A., Doddamani, M., Gupta, N. (2017). Prediction of modulus at various strain rates from dynamic mechanical analysis data for polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 120, 27–34. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.062

22. Nashif, A. D., Jones, D. I. G., Henderson, J. P. (1991). *Vibration damping*. John Wiley & Sons, 472.

23. Hryhorenko, O., Saienko N., Lypovyi, V., Harbuz, S. (2020). Research of effectiveness of wood fire protection by modified epoxy polymers. In *Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety*, 9, 125–128. Springer International Publishing. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41235-7_19

Надійшла до редколегії: 07.03.2024

Прийнята до друку: 13.04.2024