Пожежна безпека
Fire Safety
https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB
ISSN 2078-6662 (print), ISSN 2708-1087 (online)

UDC 614.841
DOI: 10.32447/20786662.42.2023.06
This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

В. В. Кочубей[1], О. І. Лавренюк[2], Б. М. Михалічко[2], Н. В. Чопик[1]
[1]Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна
[2]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1537-3953 – В. В. Кочубей
https://orcid.org/0000-0003-4509-2896 – О. І. Лавренюк
https://orcid.org/0000-0002-5583-9992 – Б. М. Михалічко
vita_kochubeu@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ КУПРУМ(II) ФЛУОРИДУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ДО ЗАЙМАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ

Вступ. Серед надзвичайно широкого асортименту антипіренів, які використовують з метою зниження горючості полімерних матеріалів на основі епоксидних смол, особливої уваги заслуговують сполуки металів. Проте, здебільшого, дослідники пропонують використовувати в ролі антипіренів інертні до полімеру металовмісні сполуки. Але враховуючи недоліки, притаманні таким антипіренам їх використання невпинно знижується. Натомість все більш популярними стають реакційноздатні металовмісні антипірени, які завдяки наявності в молекулярній структурі функціональних груп вступають в хімічні реакції з компонентами епоксидних композицій. В цьому аспекті доволі перспективними є комплексні сполуки перехідних металів. Втім, на даний час практично відсутні системні дослідження, спрямовані на виявлення послідовного впливу таких антипіренів на структуру, а відтак і на властивості отриманих матеріалів. Тому вкрай актуальними є дослідження, пов'язані з розширенням асортименту антипіренів такого класу та вивчення їх впливу на основні параметри, за якими оцінюють схильність до займання та горіння полімерних матеріалів.

Мета. Експериментально дослідити вплив купрум(II) флуориду на особливості перебігу процесів термоокисної деструкції та схильність до займання полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій.

Методи. Поведінку отриманих епоксиполімерів в умовах термоокисної деструкції вивчали методом дериватографії. Для характеристики стійкості епоксиполімерів до займання та самозаймання визначали температури займання та самозаймання згідно з ДСТУ 8829:2019.

Результати. Результати проведених дериватографічних досліджень свідчать про те, що інтенсивність термоокисної деструкції полімерів на основі модифікованих купрум(II) флуоридом епоксіамінних композицій суттєво нижча, аніж полімерів на основі немодифікованої композиції. Окрім того згоряння піролітичних залишків органічної складової полімеру на основі модифікованої композиції відбувається у значно вужчому температурному інтервалі, що є беззаперечним свідченням самозгасаючого ефекту горіння купрумвмісного полімеру. Найвищою стійкістю до займання та самозаймання характеризується композиція з вмістом 40 мас.ч. CuF_2 на 100 мас.ч. зв'язуючого, температура займання якої на 21ºС вища порівняно з немодифікованою композицією, а температура самозаймання вища на 33ºС.

Висновки. Використання як антипірену купрум(II) флуориду призводить до підвищення термоокисної стабільності та стійкості до займання епоксиполімерів. Такий ефект досягається завдяки утворенню міцних координаційних зв'язків що виникають між сіллю *d*-металу та амінним затвердником епоксидних смол в процесі просторового зшивання епоксіамінної композиції. Внаслідок цього швидкість деструкції полімеру суттєво знижується, оскільки на руйнування новоутворених зв'язків необхідно затратити додаткову енергію. У підсумку це позначається на зменшенні інтенсивності утворення летких горючих продуктів розкладу полімеру та їх дифузії в зону горіння, через що знижується швидкість їхнього окиснення.

Ключові слова: епоксіамінні композиції, антипірен-затвердник, купрум(II) флуорид, термоокисна деструкція, температура займання та самозаймання.

V. V. Kochubey[1], O. I. Lavrenyuk[2], B. M. Mykhalichko[2], N. V. Chopik[1]
[1]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[2]Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

THE USE OF COPPER(II) FLUORIDE TO INCREASE THE THERMAL STABILITY AND FLAME RESISTANCE OF EPOXY-POLYMERS

Introduction. Among the extremely wide range of flame retardants, which are used to reduce the combustibility of polymer materials based on epoxy resins, metal compounds deserve special attention. However, mainly, researchers suggest

using metallic compounds that are inert to the polymer as flame-retardants. However, taking into account the disadvantages inherent in such flame-retardants, their use is constantly decreasing. Instead, reactive metal-containing flame-retardants are becoming more and more popular, which, due to the presence of functional groups in the molecular structure, interact chemically with the components of epoxy composites. In this aspect, complex compounds of transition metals are quite promising. However, at present, there are practically no systematic studies aimed at disclosure of the consistent effect of such flame-retardants on the structure, and therefore on the properties of the obtained materials. Therefore, research related to the expansion of the range of flame-retardants of this class and the study of their influence on the main parameters, which are used to evaluate the propensity to ignition and burning of polymer materials, are extremely relevant.

Purpose. The purpose of the work is an experimental study of the influence of copper (II) fluoride on the course of thermos-oxidative destruction and the susceptibility to the ignition of polymer materials based on epoxy-amine composites.

Methods. The behaviour of the obtained epoxy polymers under the conditions of thermo-oxidative destruction was studied by the method of derivatography. To characterise the resistance of epoxy-polymers to ignition and self-ignition, the ignition and self-ignition temperatures were determined following DSTU 8829:2019.

Results. The results of derivatographic studies testify to the intensity of thermo-oxidative destruction of polymers based on epoxy-amine composites modified with copper (II) fluoride is significantly lower than that of polymers based on unmodified composition. In addition, the combustion of pyrolytic residues of the organic component of the polymer based on the modified composite occurs in a limited temperature range, which is indisputable evidence of the self-extinguishing effect of the combustion of the copper-containing polymer. The highest resistance to ignition and self-ignition is characterized by a composite with a content of 40 mass parts CuF2 per 100 mass parts binder; its ignition temperature is 21ºC higher compared to the unmodified composition, and the self-ignition temperature is 33ºC higher.

Conclusion. The use of copper (II) fluoride as a flame retardant leads to an increase in the thermo-oxidative stability and resistance to the ignition of epoxy polymers. This effect is achieved due to the formation of strong coordination bonds that arise between the d-metal salt and the amine-hardener of epoxy-resins in the process of spatial crosslinking of the epoxy-amine composite. As a result, the rate of destruction of the polymer is significantly reduced, since additional energy must be spent on the destruction of newly formed bonds. As a result, this affects the decrease in the intensity of the formation of volatile combustible products of polymer decomposition and their diffusion into the combustion zone, due to which the rate of their oxidation decreases.

Keywords: epoxy-amine composites, flame retardant-hardener, copper (II) fluoride, thermo-oxidative destruction, ignition and self-ignition temperatures.

Постановка проблеми. Серед надзвичайно широкого асортименту антипіренів, які використовують з метою зниження горючості полімерних матеріалів на основі епоксидних смол, особливої уваги заслуговують сполуки металів. Проте, здебільшого, дослідники пропонують використовувати в ролі антипіренів інертні до полімеру металовмісні сполуки. Їх застосування практично не відображається на якісному та кількісному складі продуктів термоокисної деструкції епоксиполімеру. Прикладами таких сполук є, насамперед, мінеральні наповнювачі (порошки металів, оксиди чи фториди деяких металів), які спроможні розкладатися за температур понад 1000°С. Антипіренова дія при застосуванні сполук цього класу реалізується завдяки необхідності нагрівання наповнювача до високої температури, що потребує додаткових затрат тепла. Втім, для суттєвого зниження горючості епоксидних смол необхідно вводити велику кількість таких антипіренів (понад 50%), що часто негативно позначається на вкрай важливих експлуатаційних властивостях матеріалів на їх основі.

Дещо ефективнішими є менш термостійкі наповнювачі (карбонати, гідрокарбонати та гідроксиди деяких металів), тобто які спроможні розкладатися за температур нижчих за 500°С. Їх дія полягає не лише в необхідності додаткових затрат тепла на нагрівання антипірену, а й можливості його розкладання в умовах термоокисної деструкції з виділенням негорючих газів [1, 2].

Спільною особливістю розглянутих антипіренів є виділення в процесі розкладання нелетких залишків оксидів металів. При горінні епоксиполімерів, що містять такі антипірени, на поверхні матеріалу утворюється оксидний шар, який залежно від структури може слугувати вогнезахисним бар'єром для полум'я. Але враховуючи недоліки, притаманні інертним антипіренам, їх використання невпинно знижується. Натомість все більш популярними стають реакційноздатні металовмісні антипірени, які завдяки наявності в молекулярній структурі функціональних груп вступають в хімічні реакції з компонентами епоксидних композицій [3]. В цьому аспекті доволі перспективними є комплексні сполуки перехідних металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомості щодо застосування молекулярних комплексів з метою зниження горючості полімерних матеріалів на основі епоксидних смол трапляються досить рідко. А ті незначні публікації стосуються в основному використання комплексних сполук з органічними лігандами. Зокрема, введення в епоксіамінну композицію молекулярних комплексів солей металів змінної валентності (кобальту, мангану, нікелю) з 3(5)-метилпіразолом як антипіренів дає змогу підвищити не лише вогнестійкість, а й

теплостійкість затверднених композицій зі збереженням на високому рівні фізико-механічних властивостей [4].

Досліджено [5] вплив комплексних сполук, отриманих шляхом взаємодії купрум(II) сульфату з водним розчином аміачної, моно- і діетаноламінових солей ціанурової та диалілізоціанурової кислот, на горючість епоксидної смоли ЕД-20, затвердненої 4,4'-диамінодифенілметаном. Модифікація епоксидних смол такими комплексами призводить до підвищення вогнестійкості епоксиполімерів, однак, не зважаючи на краще змішування зі смолою, кисневий індекс композицій з комплексами на основі диалілізоціанурової кислоти є нижчим, аніж у випадку застосування комплексів, отриманих з ціанурової кислоти.

Модифікація епоксидних смол комплексами солей Ce, Cr, Mn, Ni, Co з аліфатичними амінами свідчить про те [6], що найпомітніше збільшення кисневого індексу спостерігається лише при застосуванні як антипірену комплексу [Mn(*teta*)]Cl_2. Введення 0,08–0,24% мангану призводить до значного підвищення кисневого індексу без погіршення фізико-механічних показників. Проте теплостійкість за Віка знижується зі збільшенням кисневого індексу.

Ціла низка досліджень [7–9] присвячена використанню хелатних комплексів на основі солей купруму(II) з амінними затвердниками епоксидних смол для зниження горючості епоксиполімерних матеріалів. Найефективнішими виявилися комплекси, отримані на основі купрум(II) гексафлуорсилікату [Cu(*eda*)(*deta*)]SiF_6. Застосування їх як антипіренів в епоксіамінних композиціях дає змогу отримати важкогорючі матеріали з притаманним ефектом самозгасання в умовах горіння.

Отже, як свідчить огляд літературних джерел, комплексні сполуки є вкрай ефективними добавками, які сприяють зниженню пожежної небезпеки полімерних матеріалів на основі епоксидних смол. Втім, на даний час практично відсутні системні дослідження, спрямовані на виявлення послідовного впливу таких антипіренів на структуру, а відтак і на властивості отриманих матеріалів. Тому вкрай актуальними є дослідження, пов'язані з розширенням асортименту антипіренів такого класу та вивчення їх впливу на основні параметри, за якими оцінюють схильність до займання та горіння полімерних матеріалів.

Мета роботи. Експериментально дослідити вплив купрум(II) флуориду на особливості перебігу процесів термоокисної деструкції та схильність до займання полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій.

Експериментальна частина.

Епоксіамінні композиції, модифіковані купрум(II) флуоридом (табл. 1), отримували шляхом послідовного змішування зв'язуючого – епоксидіанового олігомеру ЕД-20, затвердника – поліетиленполіаміну та антипірену – купрум(II) флуориду. Перед введенням в композицію купрум(II) флуорид висушували з метою видалення кристалізаційної води [10]. Для затвердніння отриману композицію заливали у форми та залишали на добу за кімнатної температури. Паралельно готували композицію без додавання антипірену, затвердніння якої відбувалося в такому ж режимі.

Таблиця 1

Стехіометричний склад отриманих епоксіамінних композицій

Композиції	**Мольне співвідношення ЕД-20 : *epa* : CuF_2**	**Склад композиції, мас. ч.**		
		ЕД-20	***epa***	**CuF_2**
ЕД/*epa*	2,5 : 1 : 0	100	12	0
ЕД/*epa*-CuF_2(10)	2,5 : 1 : 1	100	12	10
ЕД/*epa*-CuF_2(30)	2,5 : 1 : 3	100	12	30
ЕД/*epa*-CuF_2(40)	2,5 : 1 : 4	100	12	40
ЕД/*epa*-CuF_2(50)	2,5 : 1 : 5	100	12	50

Поведінку отриманих епоксиполімерів в умовах термоокисної деструкції вивчали методом дериватографії [11]. За допомогою термогравіметричного аналізу (TG) визначали втрату маси зразків, диференційно-термогравіметричного (DTG) аналізу – швидкість втрати маси та диференційно-термічного аналізу (DTA) – теплові ефекти, які виникали під час перебігу певних процесів. Дослідження проводили на дериватографі Q–1500D системи F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey в атмосфері повітря. При цьому зразки масою 100 г нагрівали зі швидкістю 5ºС/хв. Як еталонну речовину використовували алюміній оксид.

Для характеристики стійкості епоксиполімерів до займання та самозаймання визначали температури займання та самозаймання. Відповідно до вимог ДСТУ 8829:2019 готували по 10 полімерних зразків отриманих епоксиполімерів у формі циліндра діаметром 45 мм масою 3 г. Зразки перед початком випробувань витримували в термошафі протягом 20 год за температури 60ºС, після чого охолоджували до температури навколишнього середовища.

Виклад основного матеріалу. Результати дериватографічних досліджень зразка полімеру, отриманого на основі модифікованої купрум(II) флуоридом епоксіамінної композиції, наведені на рис. 1. Як свідчать отримані результати, процес термолізу протікає впродовж п'яти стадій. Перша стадія термоокисної деструкції розпочинається за температури 20ºС і завершується за температури 144ºС. В цьому температурному інтервалі виділяються леткі продукти, які не взяли участь у формуванні просторової структури в процесі затвердіння композиції. На цій стадії на кривій DTA виявлено ендотермічний ефект, а за результатами термогравіметричного аналізу втрата маси становить 3,73%.

Перебіг другої стадії термолізу, в температурному діапазоні 144–298ºС, супроводжується термічним розкладанням полімерної композиції, паралельно з яким розпочинаються процеси деструкції та термоокиснення в самій епоксидній смолі. Саме перебіг цих процесів зумовлює появу екзоефекту на кривій DTA, максимум якого зафіксовано за температури 251ºС. При цьому втрата маси становить 14,51%. Варто зауважити, що максимум екзотермічного ефекту для полімеру без антипірену виявлений за температури 300ºС. Це може свідчити про те, що деструктивні та термоокисні процеси в зразку полімеру, отриманого на основі модифікованої купрум(II) флуоридом епоксіамінної композиції, розпочинаються за нижчих температур, аніж у зразку полімеру на основі немодифікованої композиції [12]. Проте сам екзотермічний ефект на цій стадії для композиції ЕД/*repa*-CuF_2 є менш інтенсивний порівняно з композицією ЕД/*repa*.

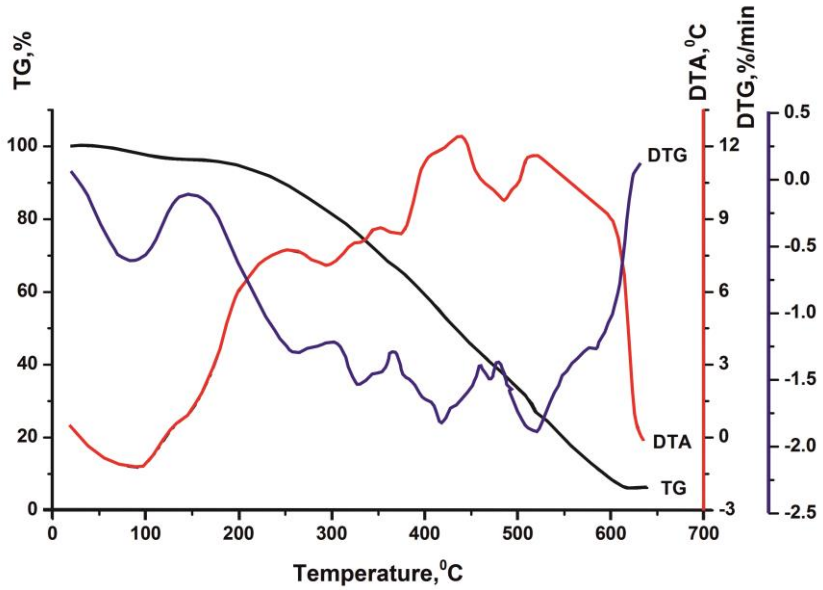


Рисунок 1 – Термограма епоксиполімеру, отриманого на основі композиції ЕД/*repa*-CuF_2

Глибокі процеси термоокиснення в епоксидній смолі і, як наслідок, згоряння летких продуктів деструкції, відбуваються на третій стадії термолізу, в області температур 298–367ºС. Цьому процесу на кривій DTA відповідає екзотермічний ефект з максимумом за температури 349ºС, а згідно з кривою TG втрата маси зразка становить 14,59%.

Четверта стадія термоокисної деструкції, яка протікає в діапазоні температур 367–486ºС супроводжується згорянням продуктів деструкції. На цій стадії спостерігається втрата маси зразка 30,15% та поява на кривій DTA яскраво вираженого екзотермічного ефекту з максимумом за температури 438ºС.

В області температур 486–629ºС, на п'ятій стадії термолізу, піролітичний залишок епоксиполімеру остаточно згоряє, що супроводжується стрімкою втратою маси зразка, яка становить 30,95%. На кривій DTA з'являється екзотермічний ефект з максимумом за температури 518ºС.

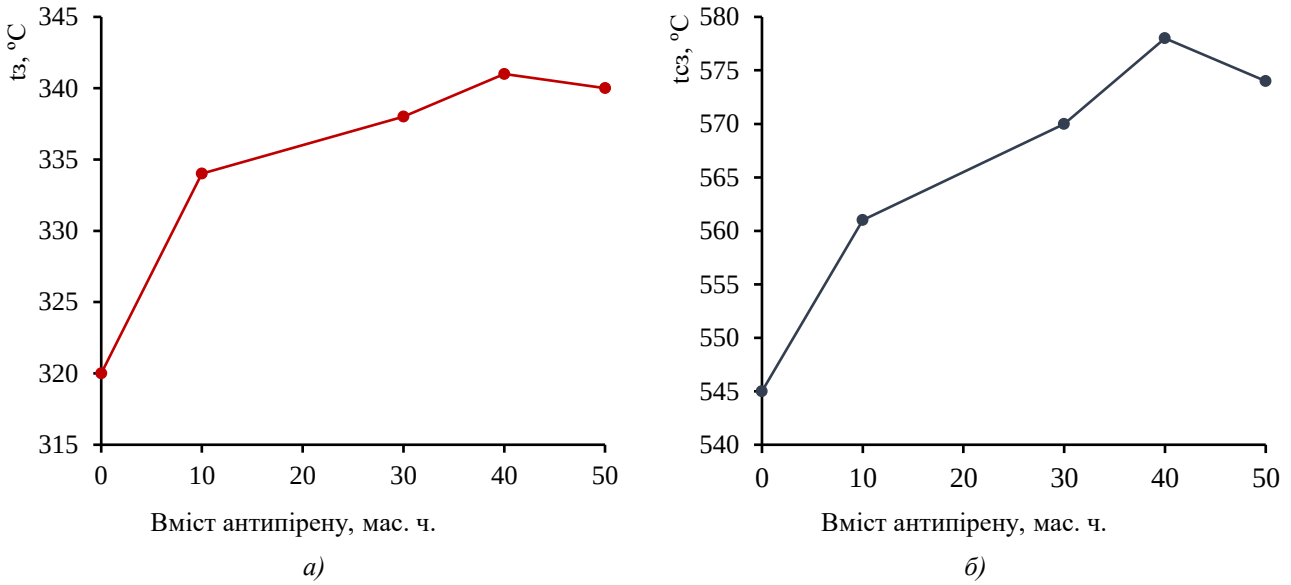
Аналіз отриманих експериментальних даних (табл. 2) дає підстави стверджувати, що піролітичні залишки органічної складової полімеру на основі модифікованої композиції згоряють у значно вужчому температурному інтервалі порівняно із зразком на основі немодифікованої композиції. Зокрема, повне згоряння органічної складової зразка полімеру на основі композиції, яка не містить антипірену, відбувається в діапазоні температур 460ºС–900ºС, а згоряння карбонізованого залишку полімеру на основі модифікованої купрум(II) флуоридом епоксіамінної композиції протікає в області температур від 486ºС–629ºС. Це є беззаперечним свідченням самозгасаючого ефекту горіння купрумвмісного полімеру.

Таблиця 2

Результати термолізу зразка епоксиполімеру на основі модифікованої купрум(II) флуоридом епоксіамінної композиції

Зразок	Стадія	Температурний інтервал, °С	Втрата маси, %
ЕД/*epa*-CuF_2	1	20–144	3,73
	2	144–298	14,51
	3	298–367	14,59
	4	367–486	30,15
	5	486–629	30,95

Отримані дані повністю узгоджуються із результатами визначення температур займання та самозаймання (рис. 2).



а) *б)*

Рисунок 2 – Залежність температури займання (*а*) та самозаймання (*б*) полімерних матеріалів на основі епоксіамінних композицій від вмісту купрум(II) флуориду

Так, найнижчі значення температури займання (320ºС) та самозаймання (545ºС) були визначені для полімеру на основі немодифікованої композиції ЕД/*epa*. При введенні в композицію купрум(II) флуориду температури займання та самозаймання зростають, досягаючи найвищого значення за вмісту антипірену 40 мас.ч. на 100 мас.ч. зв'язуючого. Відтак температура займання полімеру на основі композиції ЕД/*epa*-CuF_2(40) становить 341ºС, а температура самозаймання – 578ºС.

Висновки. Отже, використання як антипірену купрум(II) флуориду призводить до підвищення термоокисної стабільності та стійкості до займання епоксиполімерів. Такий ефект досягається завдяки утворенню в процесі просторового зшивання епоксіамінної композиції міцних координаційних зв'язків між сіллю *d*-металу та амінним затвердником епоксидних смол. Внаслідок цього швидкість деструкції полімеру суттєво знижується, оскільки на руйнування нових зв'язків необхідно затратити додаткову енергію. У підсумку це відображається на зменшенні інтенсивності утворення та дифузії в зону горіння летких горючих продуктів розкладу полімеру та зниженні швидкості їх окиснення.

Список літератури:

1. Longzhen Q., Jianping L., Rongcai X., Baojun Q. Structural Characteristics and Flame-Retardant properties of nanosized magnesium Hydroxide. Journal of Semiconductors, 2016. Vol. 24. P. 81–83.

2. Hornsby P.R. The application of magnesium hydroxide as a fire retardant and smoke-suppressing additive for polymers. Fire and Materials, 1994. Vol. 18(5). P. 269–276.

3. Aseeva R.M., Zaikov G.E. Flammability of polymeric materials. Advances in Polymer Science, 1985. Vol. 70. P. 171–229.

4. Darbynyan E.G., Matsoyan M.S., Sahakyan A.A., Elizyan M.A. Fire-resistant epoxy compositions. Armenian Chemical Journal, 1983. Vol. 4 (36). P. 268–69.

5. Yessayan G.T., Kazarian S.M., Ordian M.B. Cuproammoniacal (aminated) salts of cyanuric and diallylisocyanuric acids as combustion inhibitor ingredients. Armenian Chemical Journal, 1980. Vol. 4 (33). P. 290–294.

6. Ordian M.B., Rashidyan L.G., Ayvazian G.B. etc. Modification of the epoxide resin ED-20 hardened with mixtures of aromatic diamines by means of complexes obtained from certain metals with triethylenetetramine. Armenian Chemical Journal, 1978. Vol. 10 (31). P. 763–767.

7. Пархоменко В.-П.О., Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Перспективи застосування силіційумісних антипіренів для зниження горючості епоксидних композицій. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2017. № 15. С. 94–100.

8. Пархоменко В.-П.О., Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Роль антипірена-затвердника у формуванні самозгасаючих епоксіамінних композицій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. №1 (3). С. 84–89.

9. Lavrenyuk H., Mykhalichko B., Garanyuk P., Mykhalichko O. New copper(II)-coordinated epoxy-amine polymers with flame-self-extinguishment properties: Elaboration, combustibility testing, and flame propagation rate measuring. Fire and Materials. 2020. Vol. 44(6). P. 825–834.

10. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, 1997. 1341 p.

11. Paulik F., Paulik J., Erdey L. Derivatography: A complex method in thermal analysis. Talanta, 1966. Vol. 13 (10). P. 1405–1430.

12. Пархоменко В.-П.О., Кочубей В.В., Михалічко Б.М., Лавренюк О.І., Павловський Ю.П. Вплив купрум(ІІ) гексафлуорсилікату на термоокисну стійкість самозгасаючих епоксіамінних композицій. Пожежна безпека. 2017. №30. С. 132–136.

References:

1. Longzhen Q., Jianping L., Rongcai X., Baojun Q. Structural Characteristics and Flame-Retardant properties of nanosized magnesium Hydroxide. Journal of Semiconductors, 2016.Vol. 24. P. 81–83.

2. Hornsby P.R. The application of magnesium hydroxide as a fire retardant and smoke-suppressing additive for polymers. Fire and Materials, 1994. Vol. 18(5). P. 269–276.

3. Aseeva R.M., Zaikov G.E. Flammability of polymeric materials. Advances in Polymer Science, 1985. Vol. 70. P. 171–229.

4. Darbynyan E.G., Matsoyan M.S., Sahakyan A.A., Elizyan M.A. Fire-resistant epoxy compositions. Armenian Chemical Journal, 1983. Vol. 4 (36). P. 268–69.

5. Yessayan G.T., Kazarian S.M., Ordian M.B. Cuproammoniacal (aminated) salts of cyanuric and diallylisocyanuric acids as combustion inhibitor ingredients. Armenian Chemical Journal, 1980. Vol. 4 (33). P. 290–294.

6. Ordian M.B., Rashidyan L.G., Ayvazian G.B. etc. Modification of the epoxide resin ED-20 hardened with mixtures of aromatic diamines by means of complexes obtained from certain metals with triethylenetetramine. Armenian Chemical Journal, 1978. Vol. 10 (31). P. 763–767.

7. Parkhomenko V.-P.O., Lavrenyuk O.I., Mykhalichko B.M. Perspektyvy zastosuvannya sylitsiyumisnykh antypireniv dlya znyzhennya horyuchosti epoksydnykh kompozytsiy. Visnyk L′vivs′koho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttyediyal′nosti. 2017. № 15. S. 94–100.

8. Parkhomenko V.-P.O., Lavrenyuk O.I., Mykhalichko B.M. Rol′ antypirena-zatverdnyka u formuvanni samoz·hasayuchykh epoksiaminnykh kompozytsiy. Naukovyy visnyk: Tsyvil′nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2017. №1 (3). S. 84–89.

9. Lavrenyuk H., Mykhalichko B., Garanyuk P., Mykhalichko O. New copper(II)-coordinated epoxy-amine polymers with flame-self-extinguishment properties: Elaboration, combustibility testing, and flame propagation rate measuring. Fire and Materials. 2020. Vol. 44(6). P. 825–834.

10. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, 1997. 1341 p.

11. Paulik F., Paulik J., Erdey L. Derivatography: A complex method in thermal analysis. Talanta, 1966. Vol. 13 (10). P. 1405–1430.

12. Parkhomenko V.-P.O., Kochubey V.V., Mykhalichko B.M., Lavrenyuk O.I., Pavlovs′kyy Y.P. Vplyv kuprum(II) heksafluorsylikatu na termookysnu stiykist′ samozhasayuchykh epoksiaminnykh kompozytciy. Pozhezhna bezpeka. 2017. №30. S. 132–136.

© В. В. Кочубей, О. І. Лавренюк,
Б. М. Михалічко, Н. В. Чопик, 2023.

Науково-методична стаття.
Надійшла до редакції 04.05.2023.
Прийнято до публікації 16.05.2023.