

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИНТЕЗОВАНОЇ ВИСОКОВОЛЬТНИМ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДОМ ПОРОШКОВОЇ ШИХТИ НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ СУДЕН

**Букетов А. В.**, д.т.н., завідувач кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: [buketov@tntu.edu.ua](mailto:buketov@tntu.edu.ua), ORCID: 0000-0001-9836-3296;

**Сизоненко О. М.**, д.т.н., головний науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, e-mail: [sizonenko43@rambler.ru](mailto:sizonenko43@rambler.ru), ORCID: 0000-0002-8449-2481;

**Безбах О. М.**, аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-8086-328;

**Букетова Н. М.**, докторант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-7670-6590;

**Липян Є. В.**, к.т.н., старший науковий співробітник відділу імпульсної обробки дисперсних систем Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, ORCID: 0000-0001-9483-1793

*У роботі показано перспективи використання нових матеріалів на полімерній основі. Враховуючи, що розроблені композити досить ефективно використовувати для захисту устаткування, яке експлуатують за підвищених температур, проведено дослідження стосовно визначення впливу природи і вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти на теплофізичні властивості епоксидних композитів. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні композитів вибрано епоксидний діановий олігомер. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Обґрунтовано вибір синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти для поліпшення теплофізичних властивостей розроблених матеріалів. Досліджено термічний коефіцієнт лінійного розширення і теплостійкість епоксикомпозитів. На основі проведених випробувань теплофізичних властивостей матеріалів, наповнених синтезованою високовольтним електророзрядом порошковою шихтою, встановлено допустимі межі температури, при яких можливо використовувати розроблені композити.*

**Ключові слова:** епоксидний композит, теплостійкість, термічний коефіцієнт лінійного розширення, усадка.

**DOI:** 10.33815/2313-4763.2019.2.21.142-153

**Постановка проблеми.** Сучасні судна флоту мають велику автономність плавання, високі ходові і морехідні якості. Енергоємність і насиченість суден численним та складним промисловим і технологічним обладнанням дозволяють успішно вирішувати завдання з видобутку та переробки морепродуктів, а також перевезення вантажів.

Виробнича діяльність промислових суден найчастіше відбувається в складних метеорологічних умовах при необхідності їх швартування у відкритому морі. Тому тільки добре організоване технічне обслуговування та ремонт суден промислового флоту можуть забезпечити планову тривалість їх перебування в експлуатації і виконання планових завдань.

Технічне обслуговування та ремонт суден необхідно виконувати для підтримки працездатності та технічного їх стану на необхідному рівні упродовж усього терміну експлуатації у міру зношування деталей чи елементів механізмів. Технічне обслуговування входить в прямі обов'язки судового екіпажу і виконується під час експлуатації судна.

Ремонти різних видів можуть виконувати як із виведенням судна з експлуатації, так і поєднувати з міжрейсовими стоянками та іншими видами планових простоїв судна. При цьому ремонт відрізняється від технічного обслуговування не тільки великим обсягом відновлювальних робіт, але й джерелами їх фінансування. Ремонти можуть виконуватися судноремонтними підприємствами (СПП), береговими ремонтними бригадами (БРБ),

судновими ремонтними бригадами (СРБ), базами технічного обслуговування (БТО) і судновим екіпажем (СЕ).

Під ремонтом судна розуміється комплекс операцій з відновлення справного або працездатного стану судна на певний період. Метою ремонту суден є усунення дефектів матеріальної частини судна, що виникли в результаті природного зносу, порушень правил технічної експлуатації або недостатньої надійності і проектних недоробок при виробництві судна.

Збільшення обсягів судноремонтного виробництва обумовлене наявністю в експлуатації різних типів як вітчизняних, так закордонних суден. У цих умовах скорочення тривалості заводських ремонтів і зниження їх вартості мають першорядне значення як фактори, які безпосередньо і суттєво впливають на ефективність і рентабельність експлуатації суден [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перспективним при капітальному чи поточному ремонті є застосування полімеркомпозитів [1-8]. Це дозволяє суттєво поліпшити фізико-механічні, теплофізичні, антикорозійні та інші експлуатаційні характеристики комплексів та механізмів під впливом статичних і динамічних навантажень. Актуальним є використання полімерних композитних матеріалів (КМ) на основі епоксидних зв'язувачів, дисперсних і волокнистих наповнювачів. Такі матеріали відзначаються доброю технологічністю при нанесенні на деталі зі складним профілем поверхні та підвищеними експлуатаційними, у тому числі і теплофізичними характеристиками, при вказаних критичних умовах роботи. Розроблення нових матеріалів з поліпшеними теплофізичними властивостями не можливе без наукових досліджень їх експлуатаційних характеристик. На жаль, не достатньо уваги приділено дослідженню впливу міжфазових явищ при структуроутворенні композитів на їхні властивості, особливо при науково-обґрунтованому введенні мікродисперсних наповнювачів. Фізичні і хімічні процеси при формуванні матеріалів на межі поділу фаз охоплюють увесь комплекс реакцій взаємодії макромолекул олігомеру з активними центрами на поверхні наповнювача. Це зумовлює формування матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які регулюються технологічними режимами формування композитів.

**Мета роботи** – дослідити вплив вмісту синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти на теплофізичні властивості епоксидних композитів для ремонту суден.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану порошкову шихту (СПШ). Формування наповнювача проводили високовольтним електророзрядним (ВЕР) синтезом. Для високовольтного електророзрядного синтезу наповнювача використовували дослідний стенд, детально описаний у роботі [9]. У вигляді вихідного матеріалу використовували суміш порошків наступного вихідного складу: Fe (75 %) + Ti (25 %). При дослідженні накопичена енергія одиничного розряду ( $W_1$ ) становила 1 кДж, а інтегральна питома енергія оброки ( $W_{\text{пит}}$ ) становила 25 МДж/кг.

У процесі досліджень виконували варіювання розподілом електричного поля та плазмових утворень у об'ємі розрядної камери шляхом використання різних типів

електродних систем (табл. 1 та рис. 1) [9–11]. У даній роботі використано 1-вістрійну конструкцію електронної системи.

Таблиця 1 – Результати ВЕР-синтезу наповнювача

Вихідний склад	Склад після обробки	Електродна система	Діаметр після обробки, $d$ , мкм		
			$d_{\min}$	$d_{\max}$	$d_{\text{сер}}$
Fe (75 %) + Ti (25 %)	Fe (70 %) + Ti (10 %) + TiC (15 %) + Fe <sub>3</sub> C (5 %)	1	~1	112	11,5



Рисунок 1 – 1-вістрійна конструкція електродних систем

Використання різних електродних систем дозволило керувати розподілом інтенсивності впливу основних факторів ВЕР [9, 10]. Так, якщо у випадку використання 1-вістрійної системи більша частка накопиченої енергії трансформувалась у ударні хвилі, то використання 15-вістрійної системи дозволяє підвищити інтенсивність впливу термічних та струмових факторів.

Результати досліджень показали, що у результаті ВЕР-обробки відбулось подрібнення усіх оброблених часток та зміна їх фазового складу із синтезом високомодульних сполук TiC та Fe<sub>3</sub>C (табл. 1).

Епоксидні композити формували за такою технологією [1–4]: підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і часток наповнювача впродовж часу  $\tau = 10 \pm 0,1$  хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у композиті зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) і теплостійкість ( $T$ ) КМ. Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури (ГОСТ 15173-70).

**Результати досліджень та їх обговорення.** Експериментально встановлено (рис. 2), що теплостійкість вихідної немодифікованої епоксидної матриці становить  $T = 341$  К. Доведено (рис. 2), що наповнення епоксидного зв'язувача добавкою у вигляді мікродисперсного наповнювача СПШ навіть за незначного вмісту (у кількості

$q = 0,05$  мас.ч.) приводить до суттєвого підвищення теплостійкості КМ (від  $T = 341$  К (для епоксидної матриці) до  $T = 353$  К). У першу чергу це зумовлено міжфазовою взаємодією активних центрів на поверхні дисперсних часток із сегментами та боковими групами макромолекул епоксидного олігомеру. Методом ІЧ-спектроскопії підтверджено, що у процесі структуроутворення полімерних композитів виникають нові зв'язки між карбідами заліза і титану та гідроксильними і карбонільними групами епоксидної смоли. Це забезпечує поліпшення когезійної міцності епоксикомпозитів, що передбачає підвищення показників їх теплостійкості.

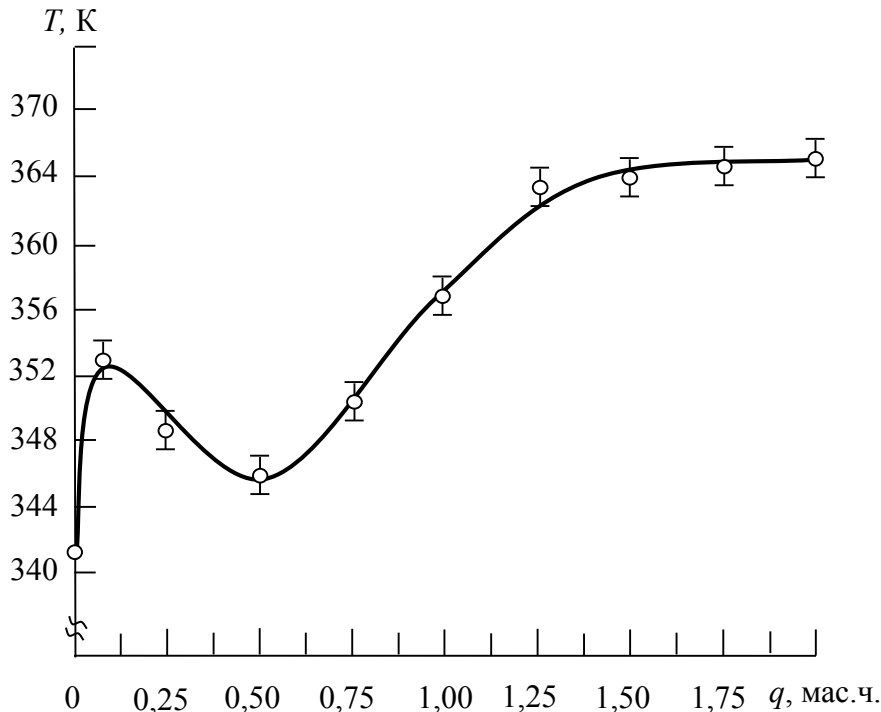


Рисунок 2 – Залежність теплостійкості (за Мартенсом) КМ від вмісту наповнювача СПШ

Встановлено (рис. 2), що введення добавки у діапазоні  $q = 0,25 \dots 0,75$  мас.ч. призводить до зменшення показників теплостійкості матеріалів від  $T = 353$  К (для КМ із вмістом часток у кількості  $q = 0,05$  мас.ч.) до  $T = 347 \dots 350$  К. На наш погляд, це зумовлено пластифікуючою дією добавки за даного вмісту, що позначається на когезійних властивостях матеріалів. При поясненні цього ефекту слід розглядати перебіг процесів міжфазової взаємодії на мезорівні. Тобто, при зшиванні епоксидних композитів навколо часток наповнювача формуються зовнішні поверхневі шари, ступінь гелеутворення у яких є більшим порівняно з аналогічною густиною полімеру у об'ємі. Однак, об'єм таких шарів є недостатнім виходячи з критичного вмісту наповнювача. При цьому формуються матеріали із невисоким вмістом гель-фракції, що зумовлює зменшення показників теплостійкості розроблених КМ.

У роботі експериментально встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача СПШ у епоксидному зв'язувачі при формуванні КМ з поліпшеними теплофізичними властивостями. Показано (рис. 2), що введення часток за вмісту  $q = 1,50 \dots 2,00$  мас.ч. забезпечує підвищення теплостійкості КМ від  $T = 341$  К (для епоксидної матриці) до  $T = 367 \dots 369$  К. При цьому максимум показників теплостійкості ( $T = 369$  К) КМ на кривій залежності « $T - q$ » спостерігали за вмісту наповнювача у кількості  $q = 2,00$  мас.ч. Надалі збільшення вмісту часток у КМ призводить до зменшення показників теплостійкості матеріалів. Можна стверджувати, що за критичного вмісту наповнювача у композиті ( $q = 2,00$  мас.ч.) формується міцнозшита структура полімеру зі значною кількістю хімічних зв'язків як у поверхневих шарах навколо часток, так і у об'ємі полімеру.

Це приводить до суттєвого підвищення теплостійкості композитів від  $T = 341$  К (для епоксидної матриці) до  $T = 369$  К.

Дослідженням усадки підтверджено результати наведених вище випробувань. Показано (рис. 3), що усадка вихідної матриці (при дослідженні у діапазоні температур  $\Delta T = 303 \dots 473$  К) становить  $\delta = 0,32$  %. Введення часток мікродисперсного наповнювача приводить до зменшення усадки КМ до значень  $\delta = 0,02$  %. Тобто, наявність добавки незалежно від її вмісту забезпечує суттєве зменшення усадки, що свідчить про суттєвий вплив наповнювача СПШ на формування структурної сітки композитів. А це, відповідно, поліпшує теплофізичні властивості розроблених матеріалів.

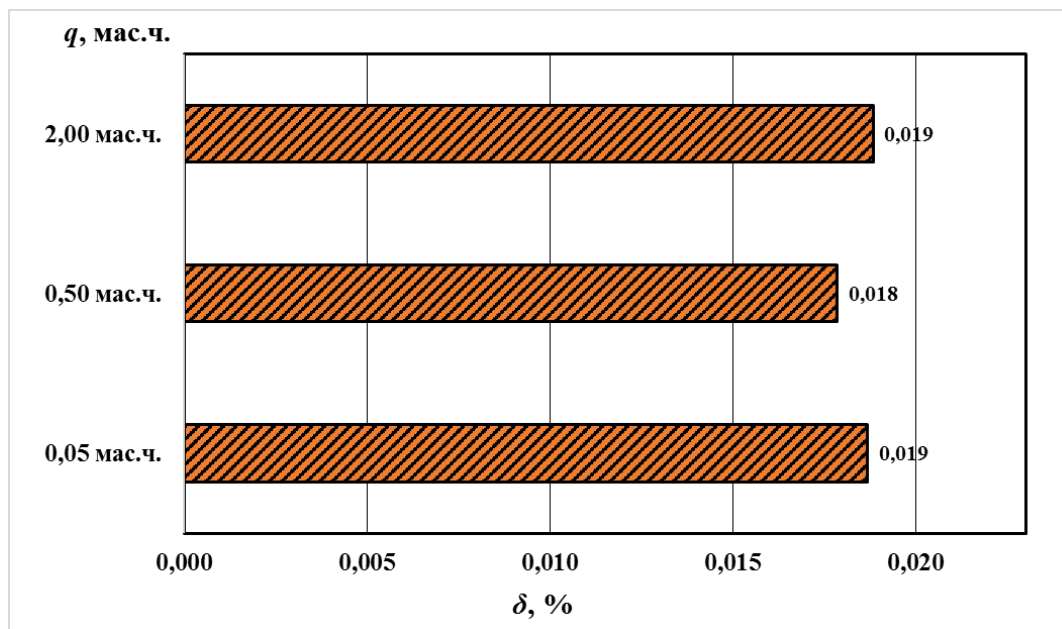


Рисунок 3 – Залежність усадки КМ від вмісту наповнювача СПШ

На наступному етапі досліджували термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) розроблених композитів (рис. 4). Доведено (табл. 2), що у діапазоні температурних випробувань  $\Delta T = 303 \dots 323$  К ТКЛР вихідної матриці становить  $\alpha = 6,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Введення наповнювача СПШ за незначної кількості забезпечує суттєве зменшення ТКЛР композиту (у 2,3 рази). Це свідчить про суттєвий вплив наповнювача на перебіг процесів зшивання і, як наслідок, на теплофізичні властивості розроблених матеріалів. Надалі збільшення вмісту часток добавки приводить до додаткового зменшення значень ТКЛР КМ. Зокрема показано (табл. 2), що наповнення КМ порошком СПШ у кількості  $q = 0,50 \dots 2,00$  мас.ч. приводить до зменшення ТКЛР у вибраному температурному діапазоні дослідження від  $\alpha = 6,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  до  $\alpha = (2,0 \dots 2,2) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Можна стверджувати, що даний діапазон вмісту часток наповнювача є оптимальним для формування КМ з поліпшеними теплофізичними властивостями.

У діапазоні температурних випробувань  $\Delta T = 303 \dots 373$  К спостерігали наступне. Введення часток незалежно від їх вмісту приводить також до суттєвого зменшення ТКЛР композитів (від  $\alpha = 6,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  до  $\alpha = (2,8 \dots 3,0) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) (табл. 2). Вважали, що у діапазоні температур, близьких до температури склування, важливе значення має поведінка полімеру як у поверхневих шарах навколо часток наповнювача, так і у об'ємі. У даному випадку, на наш погляд, вирішальне значення мають релаксаційні процеси і рухливість сегментів та бокових груп макромолекул при підвищенні температури. Наявність наповнювача у КМ має також важливе значення, адже ТКЛР КМ порівняно з матрицею зменшується у 2,3...2,5 разів, однак релаксаційні процеси у полімері значно нівелюють вплив кількості добавки на поведінку композитів в умовах впливу теплового поля.

Виходячи з наведеного вище, цікавим було провести аналіз зміни ТКЛР КМ у діапазоні температур, які вищі з температури склування розроблених матеріалів. Показано

(табл. 2), що у діапазоні температур  $\Delta T = 303 \dots 423$  К ТКЛР КМ зменшується від  $\alpha = 9,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  до  $\alpha = 5,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  за вмісту наповнювача в композиті у кількості  $q = 0,05$  мас.ч. Найменшим значенням ТКЛР з усього діапазону досліджуваних матеріалів спостерігали для КМ із вмістом часток у кількості  $q = 2,00$  мас.ч. При цьому формується матеріал, ТКЛР якого майже у 2 рази менший порівняно з епоксидною матрицею (ТКЛР зменшується від  $\alpha = 9,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  до  $\alpha = 5,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ).

У найбільшому діапазоні досліджуваних температур ( $\Delta T = 303 \dots 473$  К) спостерігали наступне. ТКЛР матеріалів суттєво не відрізняється від аналогічного показника епоксидної матриці, позаяк відхилення значень складає  $\Delta\alpha = (0,1 \dots 0,6) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Можна констатувати, що за даної температури починаються процеси деструкції, а це, у свою чергу, призводить до суттєвого збільшення ТКЛР композитів незалежно від вмісту у них мікродисперсного наповнювача.

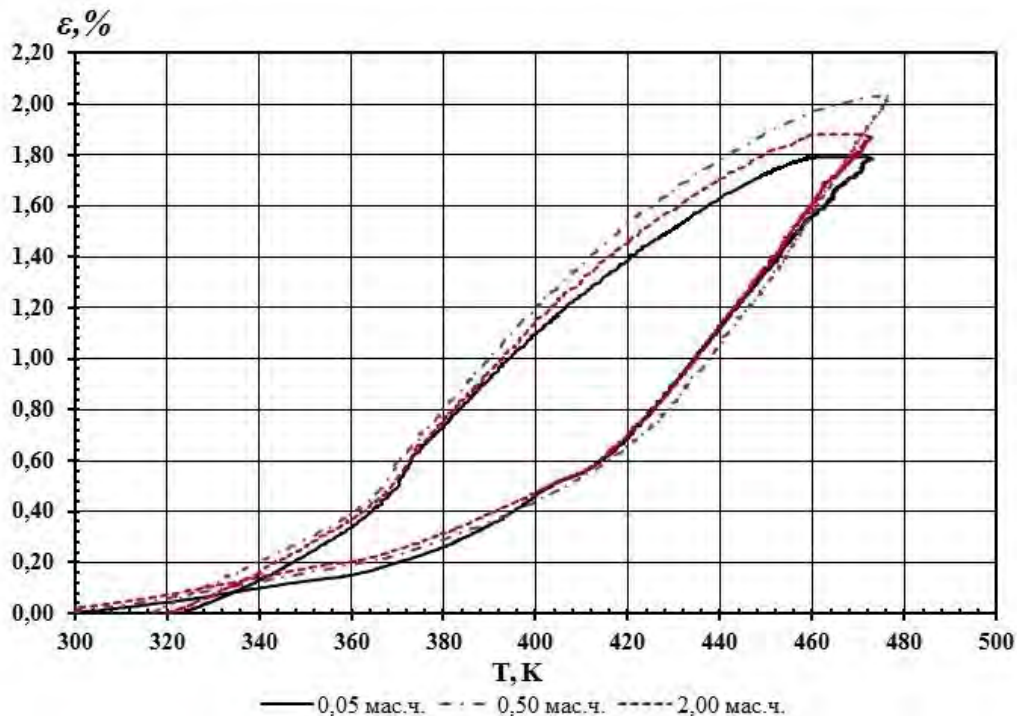


Рисунок 4 – Дилатометричні криві КМ із різним вмістом мікродисперсного наповнювача СПШ

Таблиця 2 – Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) КМ при різних температурних діапазонах дослідження

№	Вміст наповнювача СПШ, $q$ , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$			
		Температурні діапазони дослідження, $\Delta T, \text{ K}$			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	–	6,3	6,8	9,9	10,9
2	0,05	2,8	3,0	5,8	11,0
3	0,50	2,2	2,8	5,1	10,5
4	2,00	2,0	2,9	5,0	10,3

На основі дилатометричних кривих (рис. 4) розраховували температуру склування розроблених композитів. Попередньо встановлено [7], що температура склування епоксидної матриці становить  $T_c = 327$  К. Ведення мікрочасток у кількості  $q = 0,05$  мас.ч. забезпечує підвищення температури склування матеріалу до  $T_c = 335$  К, що свідчить про поліпшення когезійної міцності композиту порівняно з ненаповненим полімером. Композит, що містить частки СПШ у кількості  $q = 0,50$  мас.ч., характеризується дещо меншою температурою склування ( $T_c = 330$  К), хоча вона є вищою від аналогічного показника для полімерної матриці. При цьому встановлено, що найвищою температурою

склування ( $T_c = 336$  К) відзначається матеріал, який містить наповнювач у кількості  $q = 2,00$  мас.ч. Отримані дані добре узгоджуються з динамікою теплостійкості КМ залежно від вмісту наповнювача, що свідчить про достовірність отриманих результатів випробувань.

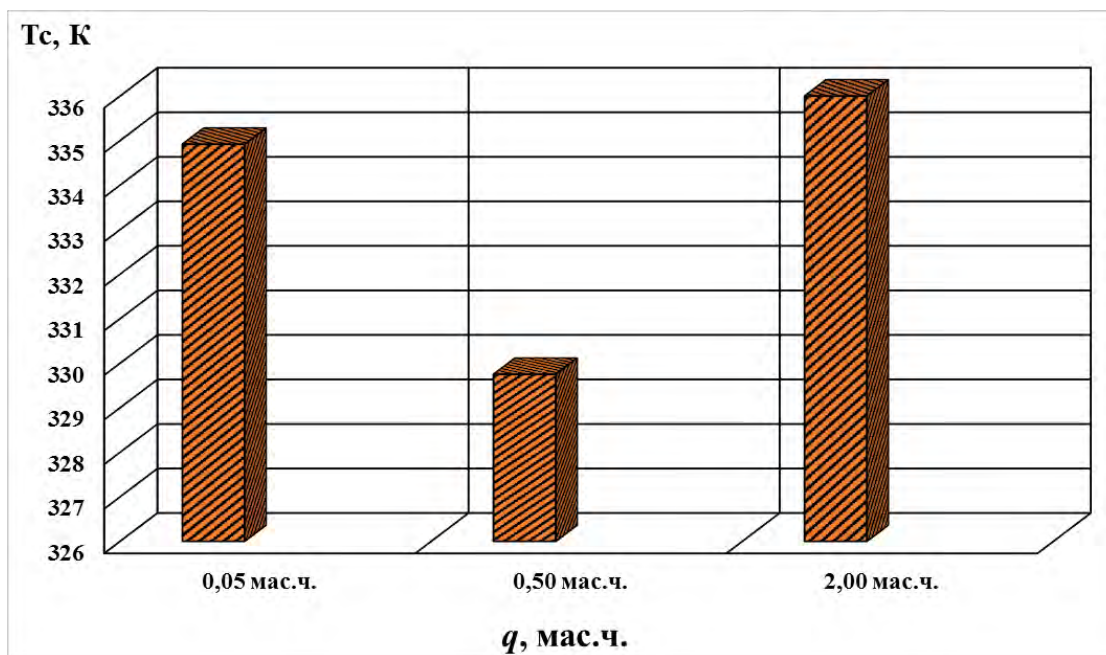
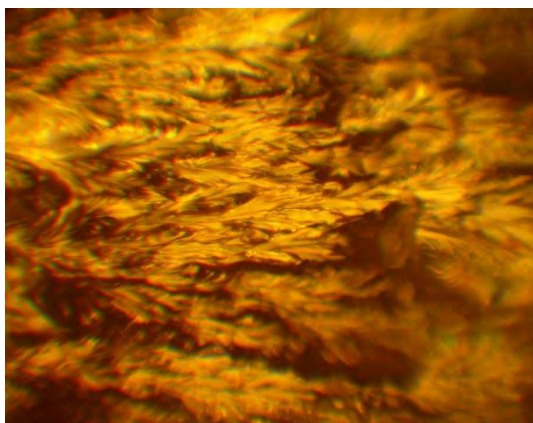


Рисунок 5 – Залежність температури склування КМ від вмісту наповнювача СПШ

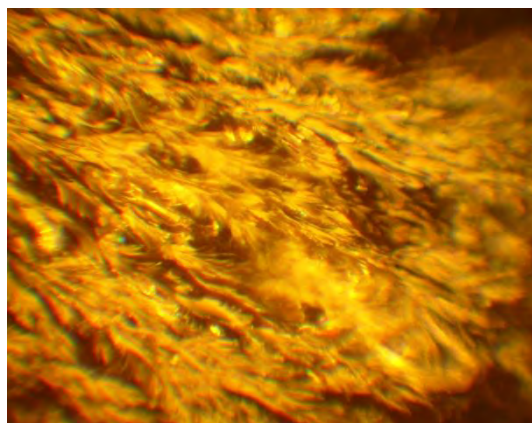
На завершальному етапі з метою додаткового підтвердження достовірності отриманих результатів досліджували фрактограми зламу розроблених композитів. Методом оптичної мікроскопії експериментально встановлено нерівномірність поверхні сколювання, наявність кратерів і заглиблень у зразках композитів, що містять наповнювач у кількості  $q = 0,05$  мас.ч. (рис. 6, а-г). Це свідчить про формування напруженого стану у таких гетерогенних системах, що приводить до передчасного руйнування фізичних і хімічних зв'язків у структурі розроблених композитів в умовах впливу теплового поля.

Для КМ з частками СПШ у кількості  $q = 0,50$  мас.ч. (рис. 6, д-ж) спостерігали наступне. Поверхня зламу таких зразків є розрихленою, відзначаються пелюсткові утворення, що свідчить про нерівномірність макроструктури у композитах. Відповідно, можна стверджувати про наявність градієнту напружень у КМ, що пришвидшує їх старіння, особливі під дією зовнішніх теплових навантажень.

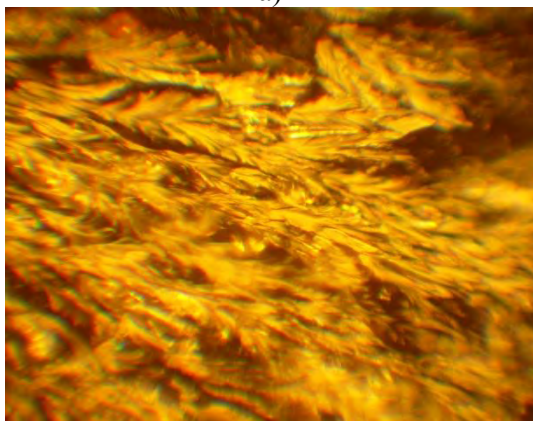
Навпаки, композит, який містить частки мікронаповнювача за критичного вмісту характеризується пологою поверхнею зламу (рис. 6, з-й). При цьому слід виокремити в'язкий характер руйнування матеріалу, що опосередковано свідчить про поліпшену його когезійну міцність. Отримані дані добре узгоджуються з результатами наведених вище експериментальних досліджень. Тобто, якісний аналіз фрактограм зламу підтверджує динаміку залежностей теплофізичних властивостей у комплексі від вмісту активної мікродисперсної добавки у епоксидній матриці.



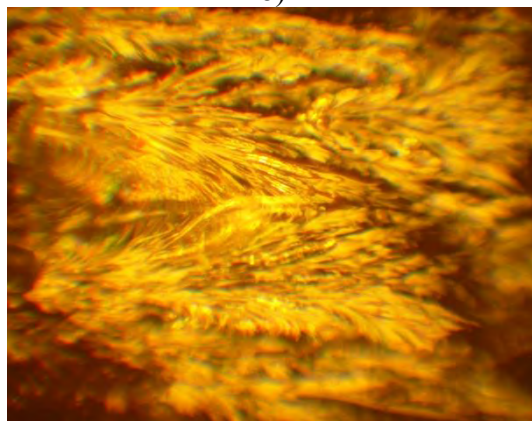
а)



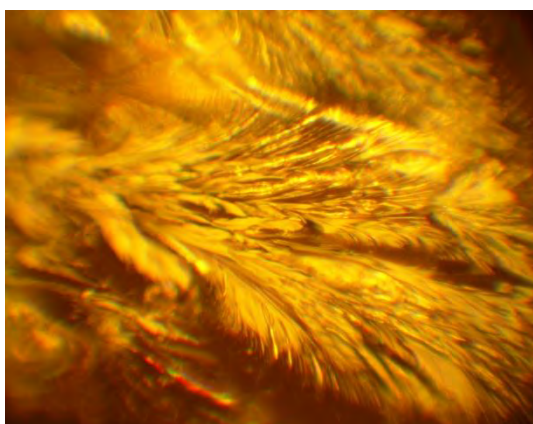
б)



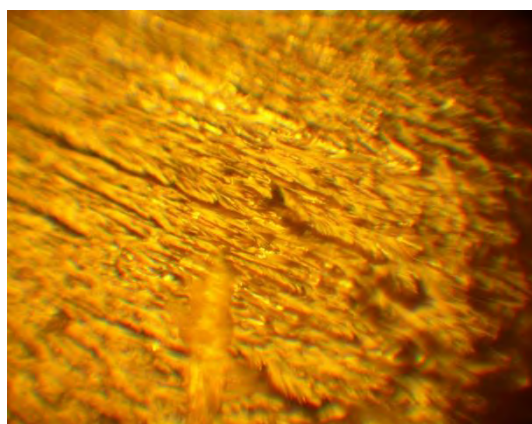
в)



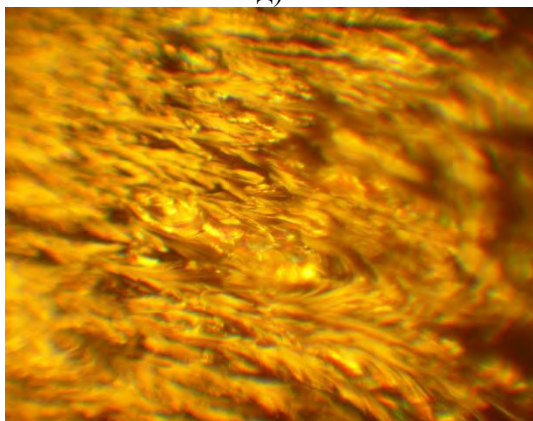
г)



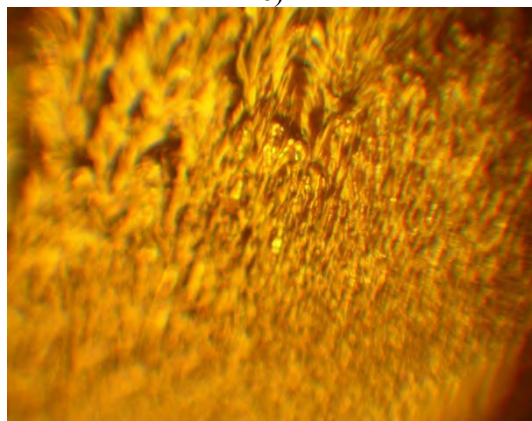
д)



е)



є)



ж)



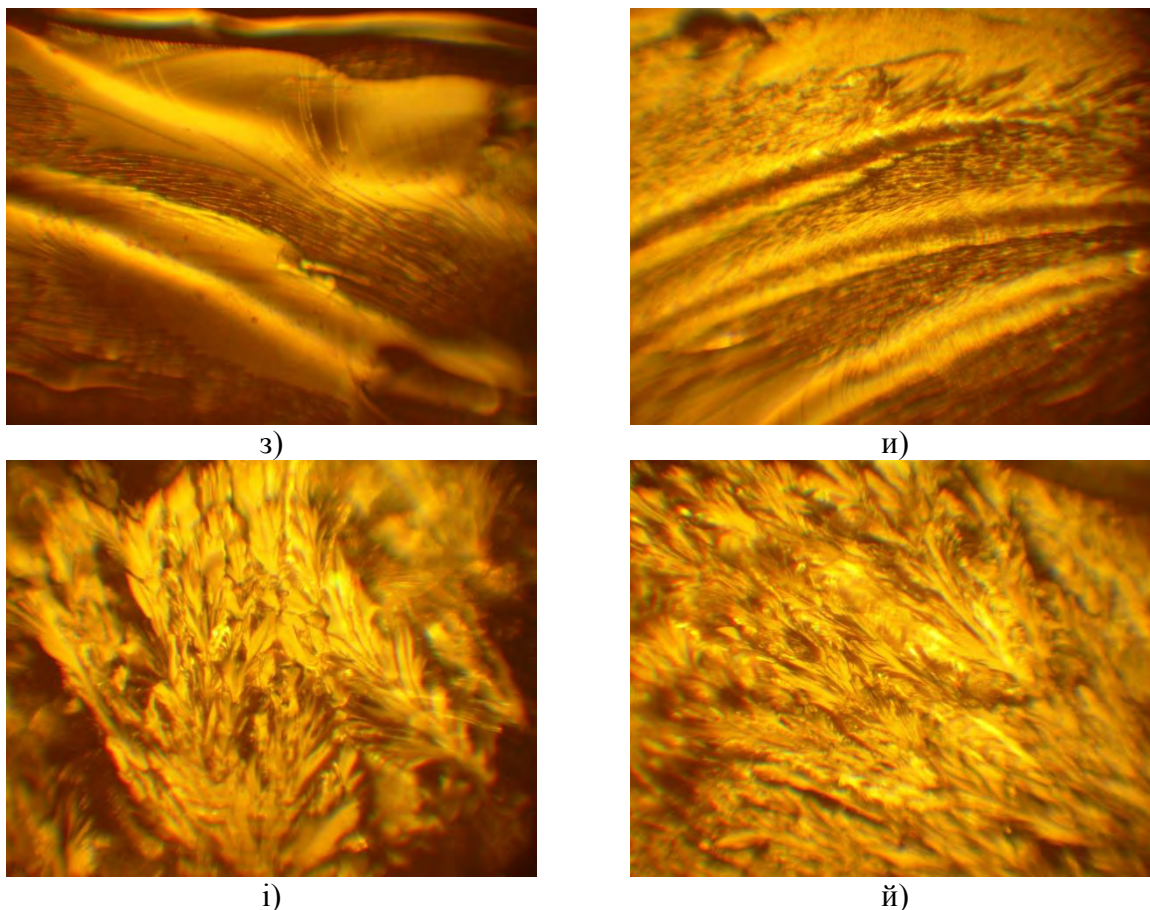


Рисунок 6 – Фрактограми зламу КМ із різним вмістом мікродисперсного наповнювача СПШ,  $q$ , мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 ( $\times 50$ ): а-г) 0,05; д-ж) 0,50; з-й) 2,00

**Висновки.** На основі результатів дослідження теплофізичних властивостей композитів залежно від вмісту мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової шихти можна констатувати наступне.

1. Експериментально встановлено критичний вміст мікродисперсного наповнювача синтезованої порошкової шихти у епоксидному зв'язувачі при формуванні композитів з поліпшеними теплофізичними властивостями. Доведено, що максимум показників теплостійкості ( $T = 369$  К) композитів на кривій залежності « $T - q$ » спостерігали за вмісту наповнювача у кількості  $q = 2,00$  мас.ч. Можна стверджувати, що за такого критичного вмісту наповнювача у композиті формується міцнозшита структура полімеру зі значною кількістю хімічних зв'язків як у поверхневих шарах навколо часток, так і у об'ємі полімеру.

2. За результатами дослідження термічного коефіцієнту лінійного розширення (ТКЛР) розроблених композитів доведено, що у діапазоні температурних випробувань  $\Delta T = 303 \dots 323$  К введення наповнювача синтезованої порошкової шихти у кількості  $q = 0,50 \dots 2,00$  мас.ч. приводить до зменшення ТКЛР від  $\alpha = 6,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  до  $\alpha = (2,0 \dots 2,2) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Можна стверджувати, що такий вміст часток є оптимальним для формування композитів з поліпшеними теплофізичними властивостями. Додатково встановлено, що у діапазоні температур  $\Delta T = 303 \dots 423$  К, які вищі за температуру склування матеріалів, найменшим значенням ТКЛР характеризуються композити із вмістом часток у кількості  $q = 2,00$  мас.ч. При цьому формується матеріал, ТКЛР якого майже у 2 рази менший порівняно з епоксидною матрицею (ТКЛР зменшується від  $\alpha = 9,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  до  $\alpha = 5,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ).

3. На основі дилатометричних кривих розраховували температуру склування розроблених композитів. Встановлено, що найвищою температурою склування відзначається матеріал, який містить наповнювач у кількості  $q = 2,00$  мас.ч. Формування такого композиту забезпечує збільшення температури склування від  $T_c = 327$  К (для

епоксидної матриці) до  $T_c = 336$  К. Отримані дані добре узгоджуються з динамікою теплостійкості композитів залежно від вмісту наповнювача, що свідчить про достовірність отриманих результатів випробувань.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Букетов А. В., Негруца Р. Ю., Яцюк В. М. Вплив модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'- карбонової кислоти на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних полімерних покриттів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ, 2019. Вип. 65. С. 30-38.
2. Buketov A. V., Saprionova A. V., Brailo M. V., Sotsenko V. V., Yurenin K. Yu., Antonio B. Polymer composites for improving the resource of pipeline transport. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5, Issue 2. P. 63–68.
3. Buketov A. V., Bezbakh O. M., Yatsyuk V. M., Negrutza R. Yu. The study of the impact of 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline) on adhesive properties of the epoxy matrix for protective coatings of transport means. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5, Issue 2. P. 45–51.
4. Букетов А. В., Сметанкин С. А. Влияние модификатора 4,4-сульфонилбис (4,1-фенилен)бис(п,п-диэтилдитиокарбамата) на адгезионные свойства эпоксидной матрицы. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2018. Т.24. № 2. С. 242–265.
5. Букетов А. В., Браїло М. В., Якущенко С. В., Яцюк В. М. Розроблення епоксиполіефірної матриці з поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями зі застосуванням ізоціанатного модифікатора. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2019. 55, № 2. С. 31–36.
6. Buketov A., Brailo M., Yakushchenko S., Saprionov O., Vynar V., Bezbakh O., Negrutza R. Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 63. N. 3. P. 171–182. <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.
7. Buketov A. V., Smetankin S. A., Akimov A. V., Kulinich A. G. Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction. *Funct. Mater.* 2019; 26 (2), 403-411. [doi.org/10.15407/fm26.02.403](https://doi.org/10.15407/fm26.02.403).
8. Buketov A., Saprionov O., Brailo M., Stukhlyak D., Yakushchenko S., Buketova N., Saprionova A., Sotsenko V. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8183761>.
9. Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. and other. Variation in the particle size of Fe-Ti-B<sub>4</sub>C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol 51, Issue 3. P. 129–136.
10. Syzonenko O., Sheregii E., Prokhorenko S. and other. Method of preparation of blend for aluminium matrix. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11, Issue 4. P. 171–173.
11. Сизоненко О. Н., Трегуб В. А., Тафтай Э. И. и др. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в слое порошка Ti в керосине. *Вісник українського матеріалознавчого товариства*. Київ, 2014. Вип. 7. С. 55–61.

### REFERENCES

1. Buketov, A. V., Negrutza, R. Yu. & Yatsiuk, V. M. (2019). Vplyv modyfikatora 2,4-dyaminoazobenzol-4- karbonovoi kysloty na adheziini vlastyvosti ta zalyshkovi napruzhennia zakhysnykh polimernykh pokryttiv. *Naukovi notatky*. Lutsk : LNTU, 65, 30–38.
2. Buketov, A. V., Saprionova, A. V., Brailo, M. V., Sotsenko, V. V., Yurenin, K. Yu., & Antonio B. (2018). Polymer composites for improving the resource of pipeline transport. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, Vol. 5, Issue 2, 63–68.

3. Buketov, A. V., Bezbakh, O. M., Yatsyuk, V. M. & Negrutza, R. Yu. (2018). The study of the impact of 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline) on adhesive properties of the epoxy matrix for protective coatings of transport means. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Vol. 5, Issue 2*, 45–51.
4. Buketov, A. V. & Smetankyn, S. A. (2018). Vliyanie modifikatora 4,4-sul'fonilbis (4,1-fenilen)bis(n,n-diehtilditiokarbamata) na adgezionnihe svoystva ehpoksidnoy matricih. *Mekhanika kompozicionnykh materialov i konstrukciy, 24, Is. 2*, 242–265.
5. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Yakushchenko, S. V. & Yatsiuk, V. M. (2019). Rozroblennia epokspoliefirnoi matrytsi z polipshenymy adheziinymy ta fizyko-mekhanichnymy vlastyvostrami zi zastosuvanniam izotsianatnoho modyfikatora. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv, 55, # 2*, 31–36.
6. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., Saprionov, O., Vynar, V., Bezbakh, O. & Negrutza R. (2019). Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, Vol. 63. N. 3*, 171–182. doi.10.3311/PPme.13161.
7. Buketov A. V., Smetankin S. A., Akimov A. V., Kulinich A. G. (2019). Epoxy composite modifications influence on the energy activation's of thermal destruction. *Funct. Mater; 26 (2)*, 403–411. doi.org/10.15407/fm26.02.403.
8. Buketov A., Saprionov O., Brailo M., Stukhlyak D., Yakushchenko S., Buketova N., Saprionova A., Sotsenko V. (2019). The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2019, Article ID 8183761, 5 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/8183761>.
9. Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. et al. (2012). Variation in the particle size of Fe-Ti-B<sub>4</sub>C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Vol 51, Issue 3. P. 129–136.
10. Syzonenko O., Sheregii E., Prokhorenko S. et al. (2017). Method of preparation of blend for aluminium matrix. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. Vol. 11, Issue 4. P. 171–173.
11. Sizonenko O. N, Tregub V. A., Taftayj Eh. I. et al. (2014). Modelirovanie i analiz ehlektrozaryadnykh processov v sloe poroshka Ti v kerosine. *Visnik ukrains'kogo materialoznavchogo tovaristva*. Kyiv, Vip. 7, 55–61.

**Букетов А.В., Сизоненко О. Н., Безбах О. М., Букетова Н. Н., Лыпян Е. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДОМ ПОРОШКОВОЙ ШИХТЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЕМОНТА СУДОВ**

В работе показаны перспективы использования новых материалов на полимерной основе. Учитывая, что разработанные композиты достаточно эффективно использовать для защиты оборудования, которое эксплуатируют при повышенных температурах, проведено исследование по определению влияния природы и содержания синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой шихты на теплофизические свойства эпоксидных композитов. В качестве основного компонента для связующего при формировании композитов выбран эпоксидный диановый олигомер. Для сшивания эпоксидных композиций использован отвердитель полиэтиленполиамин, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Обоснован выбор синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой шихты для улучшения теплофизических свойств разработанных материалов. Исследован термический коэффициент линейного расширения и теплостойкость эпоксидных композитов. На основе проведенных испытаний теплофизических свойств, наполненных синтезированной высоковольтным электроразрядом порошковой шихтой, установлены допустимые пределы температуры, при которых возможно использовать разработанные композиты.

**Ключевые слова:** эпоксидный композит, теплостойкость, термический коэффициент линейного расширения, усадка.

**Buketov A. V., Sizonenko O. M., Bezbakh O. M., Buketova N. M., Lypian Ye. V. RESEARCH OF THE IMPACT OF SYNTHESIZED BY HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL DISCHARGE POWDER CHARGE ON HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES USED FOR SHIP REPAIR**

*The prospects of polymer composites utilization for major overhaul or current repairs have been proven. This enables considerable improvement of stress-related, heat-transfer, anticorrosive and other operational properties of complexes and mechanisms under static and dynamic loads stress. The utilization of polymer composite materials (CM) based on epoxy binders, dispersed and fibrous fillers is of great importance. Such materials possess good handling properties, when applied to parts with intricate shape of surface, and high operational properties, including heat-transfer properties, under the specified operating contingencies. It proves to be impossible to develop new materials with improved heat-transfer properties without carrying out research of their operational characteristics. Unfortunately, insufficient attention has been paid to study the impact of interfacial phenomena in formation of composites on their properties, especially with microdispersed fillers introduction. Physical and chemical processes happening during formation of materials at the interface, cover the entire complex of reactions of interaction of oligomer macromolecules with the specific sites on the surface of the filler. This gives places to the formation of materials with high operational characteristics, which are controlled by technological modes of composites formation.*

*The prospects of polymer-based materials utilization have been proved in the current study. Taking into account the fact, that developed composites are quite effective when used for protection of equipment, which is operated at elevated temperatures, the research has been conducted in order to determine the impact of nature and content of synthesized by high-voltage electrical discharge powder charge on heat-transfer properties of epoxy composites. Epoxy dian oligomer has been selected to be the main component for the binder during composites formation. Polyethylenepolyamine hardener was used for crosslinking of epoxy compositions, which allows materials to be hardened at room temperatures. The selection of synthesized by high-voltage electrical discharge powder charge for improving the heat-transfer properties of developed materials has been proved. Thermal linear expansion coefficient and heat resistance of epoxy composites have been investigated.*

*The critical filler concentration has been established, the introduction of which reduces the thermal linear expansion coefficient of the developed composites when compared to the parent epoxy matrix. Thermal range analysis is of scientific and practical interest, which covers the glass transition area of polymer composites. It has been shown that at the given temperature range, the thermal linear expansion coefficient of the materials is also considerably lower when compared to the parent matrix.*

*In terms of conducted tests of heat-transfer properties of materials filled with the synthesized by high-voltage electrical discharge powder charge, the permissible temperature limits for developed composites utilization have been established.*

**Key words:** epoxy composite, heat resistance, thermal linear expansion coefficient, shrinkage.

© Букетов А. В., Сизоненко О. М., Безбах О. М., Букетова Н. М., Липян Є. В.

Статтю прийнято  
до редакції 3.09.19