

## НОВІТНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПОВЕРХОНЬ СУДНОВИХ ВАНТАЖНИХ ТА ПАЛУБНИХ МЕХАНІЗМІВ

**Сапронов О. О.**, *д.т.н., доцент, заступник завідувача кафедри, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;*

**Шаранов В. Д.**, *асистент кафедри навігації і управління судном Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: vladsharanov609@gmail.com, ORCID: 0009-0005-4349-2185;*

**Воробйов П. О.**, *аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: Vorobyov020291@gmail.com, ORCID:0000-0003-4120-2023;*

**Сапронова А. В.**, *аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: sapronova.ane4ka@gmail.com, ORCID:0000-0002-4327-4293;*

**Настасенко В. О.**, *д.т.н., доцент, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: nastasenko2004@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0330-1138;*

**Палагній В. І.**, *старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vpalagniy@ukr.net.*

Для формування композитних матеріалів та захисних покриттів на їх основі використано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 і твердник поліетиленполіамін ПЕПА. Вибір різнодисперсних наповнювачів обумовлений наявністю активних груп на їх поверхні, комплексом поліпшених характеристик компонентів, що викликає науковий і практичний інтерес при використанні добавок для формування захисних покриттів. Оптимальний вміст різнодисперсних добавок у епоксидному зв'язувачі ЕД-20 визначено за допомогою математичного планування експерименту з використанням прикладного пакету STATGRAPHICS® Centurion XVI. Це дозволило спрогнозувати та отримати епоксидне покриття з комплексом поліпшених властивостей. Встановлено, що поліпшеними фізико-механічними властивостями характеризуються композитний матеріал наступного складу: суміш дискретних органічних волокон –  $q = 0,025$  мас.ч., антиагломеруюча добавка hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД- 20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такий епоксикомпозитний матеріал характеризується наступними властивостями: руйнівне напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 92,6$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 5,6$  ГПа. На основі математичного планування експерименту визначено варіанти покриттів, які випробовували на корозійну тривкість. Проведений аналіз зміни питомого опору і питомої ємності покриттів впродовж 30 діб під впливом різних агресивних середовищ (сірчана кислота і річкова вода) за температури  $T = 293 \pm 2$  К. Встановлено, що композитний матеріал, який містить у своєму складі: епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), СДОВ (0,025 мас.ч), HDBS (20 мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА (10 мас.ч.) за рахунок утворення дифузійного бар'єру в об'ємі захисного покриття характеризується найвищим значенням питомого опору і найменшим значенням питомої ємності у всіх агресивних середовищах. Це свідчить про покращенні антикорозійні властивості покриття. Візуальний аналіз дефектів, який проводили в природних умовах під впливом річкової води і змінних температур у діапазоні  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб дозволив підтвердити попередні експериментальні дослідження і визначити покриття з поліпшеними антикорозійними властивостями.

**Ключові слова:** епоксидна матриця, руйнівні напруження при згинанні, модуль пружності при згинанні, математичне планування експерименту, оптимізація наповнювача, корозія.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.048-058**

**Постановка проблеми.** Проблема антикорозійного захисту деталей транспорту полягає у тому, що значна кількість деталей, вузлів і агрегатів виготовляють із сталей та сплавів на основі заліза. На сьогодні сплави підвищеної корозійної стійкості також

знають руйнування у природних (повітря, природні водойми і ґрунти) та технологічних середовищах (нафта, кислоти, луги). Це у свою чергу призводить до значних фінансових витрат пов'язаних із захистом від корозії деталей транспорту, вартістю ремонтних робіт, а також збитками за рахунок тимчасового припинення нормального функціонування пошкодженого корозією обладнання чи транспорту [1–3].

**Аналіз останніх публікацій та досліджень.** Для надійного захисту деталей, вузлів і агрегатів транспорту, технологічного устаткування, металевих конструкцій актуальним є розробка нових композитних матеріалів та покриттів на їх основі з високим хімічним опором. Одним із способів підвищення стійкості захисних покриттів до агресивних природних і технологічних середовищ є введення у епоксидну матрицю різнодисперсних наповнювачів. Рациональне поєднання добавок різної фізико-хімічної природи і дисперсності забезпечить підвищення ступеня зшивання композитного матеріалу і відповідно дозволить поліпшити експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів. Враховуючи вищенаведене актуальним є дослідження впливу двох наповнювачів у комплексі на фізико-механічні і антикорозійні властивості композитних матеріалів і покриттів на їх основі [4–8].

**Мета роботи** – дослідити вплив волокнистого і дисперсного наповнювачів на властивості епоксидних захисних покриттів.

**Матеріали та методика дослідження.** Для формування захисних покриттів використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Це продукт на основі дигліциділового ефіру дифенілолпропана. Його характеристики: молекулярна маса  $M_{ED-20} = 340$  г/моль; функціональність епоксидних груп  $f_{EP} = 2,0$ ; вміст епоксидних груп – 20,0...22,5%; вміст гідроксильних груп – 1,25%; в'язкість  $\eta = 13...20$  Па·с; густина  $\rho = 1,160$  г/см<sup>3</sup> [1–4].

Для поліпшення властивостей захисних покриттів використовували два наповнювачі у комплексі (суміш дискретних органічних волокон і антиагломеруючу добавку Hydropho biervnsmittel), оптимальний вміст яких визначали методом математичного планування експерименту з використанням прикладного пакету STATGRAPHICS® Centurion XVI.

Суміш дискретних органічних волокон (СДОВ) характеризується наступним складом: шовк – 50 %, акрил – 45 %, поліамід – 5 %, з параметрами  $l = 9...15$  мм,  $d = 18...25$  мкм. Акрилові волокна забезпечують стійкість до атмосферного впливу (високий ступінь водовідштовхування), підвищують теплостійкість. Тоді, як волокна шовку забезпечують еластичність. Поліамід використовують як антикорозійний матеріал.

Зважаючи на схильність до агломерування дискретних волокон використовували антиагломеруючу добавку німецького виробництва Hydropho biervnsmittel (HDBS) (розміром часток 8...12 мкм), що додатково забезпечує стійкість до атмосферного впливу і морозостійкість.

Формування модифікованої епоксидної матриці виконували у послідовності, описаній у працях [5–7].

У роботі досліджували: руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні, корозійну стійкість, за методиками описаними у працях [1–7]. Корозійну стійкість досліджували двома методами: у лабораторних умовах аналізували зміну питомого опору і питомої ємності зразків у часі під впливом агресивних середовищ (річкова вода (р. Дніпро), сірчана кислота (ГОСТ 4204-77), використовуючи прилад RCL-метр типу E7-22 і у природних умовах під впливом річкової води і змінних температур у діапазоні  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб проводили якісний аналіз (наявність дефектів) і кількісний (зміна маси в інтервалі часу).

**Результати дослідження та їх обговорення.** Попередньо методом математичного планування експерименту визначали раціональний вміст основного наповнювача – суміші дискретних органічних волокон (СДОВ) та додаткового – антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel (HDBS). При оптимізації вмісту різних за природою наповнювачів

для формування захисного покриття використовували ортогональне центральне композиційне планування. Вміст основного та додаткового наповнювачів вибирали на основі комплексних досліджень фізико-механічних властивостей КМ [7, 9, 10]. Виходячи з результатів дослідження когезійної міцності КМ, у табл. 1 наведено основні рівні зміни вмісту компонентів СДОВ і HDBS.

Таблиця 1 – Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, $q$ , мас.ч.	Крок варіювання, $\Delta q$ , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
Суміш дискретних органічних волокон (СДОВ)	$x_1$	0,025	0,015	0,010	0,025	0,040
Антиагломеруюча добавка hydropho biervnsmittel (HDBS)	$x_2$	20	10	10	20	30

Математичну модель залежності властивостей  $y = f(x_1, x_2)$  шукали у вигляді рівняння регресії [11–13]. Таким чином отримали наступні рівняння регресії:

– при аналізі руйнівних напружень при згинанні ( $y_1$ ):

$$y_1 = 83,24 - 6,12x_1 - 2,83x_2 - 4,02x_1^2 - 4,37x_2^2 - 5,40x_1x_2; \quad (1)$$

– при аналізі модуля пружності при згинанні ( $y_2$ ):

$$y_2 = 5,39 - 0,25x_1 + 0,05x_2 - 0,28x_1^2 - 0,08x_2^2 - 0,28x_1x_2. \quad (2)$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена ( $G$ ), за методикою описаною у працях [11, 12]. Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. При цьому розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,158$ , а табличне значення критерію Кохрена:  $G_{табл} = 0,478$  (для  $y_1$ ). Відповідно розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,273$ , а табличне значення критерію Кохрена:  $G_{табл} = 0,478$  (для  $y_2$ ). Таким чином встановлено, що виконується умова  $G_{розр} = 0,158 \leq G_{табл} = 0,478$  (для руйнівних напружень при згинанні) і  $G_{розр} = 0,273 \leq G_{табл} = 0,478$  (для модуля пружності при згинанні) відповідно.

Надалі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту у відповідності до методики, описаній у працях [11–14]. Перевіривши значущість коефіцієнтів рівнянь регресії (1) та (2) встановлено, що рівняння залишається без змін для досліджуваних властивостей.

За критерієм Фішера [11–14] встановлено, що представлені рівняння адекватно описують склад композиції.

За методикою, описаною у працях [11–16], проводили перетворення, для отримання рівнянь регресії з натуральними значеннями змінних параметрів. При цьому отримано наступні рівняння регресії:

- руйнівні напруження при згинанні

$$\sigma_{зг} = 52,4815 + 1204,81q_1 + 2,3633q_2 - 17851,9q_1^2 - 0,0437q_2^2 - 36,0q_1q_2. \quad (3)$$

- модуль пружності при згинанні

$$E = 3,66852 + 82,963q_1 + 0,0841667q_2 - 1259,26q_1^2 - 0,00083q_2^2 - 1,833q_1q_2. \quad (4)$$

За допомогою рівнянь представлених у натуральних значеннях побудували графіки залежності вихідної величини (руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні) від вмісту добавок. Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 1, а, б.

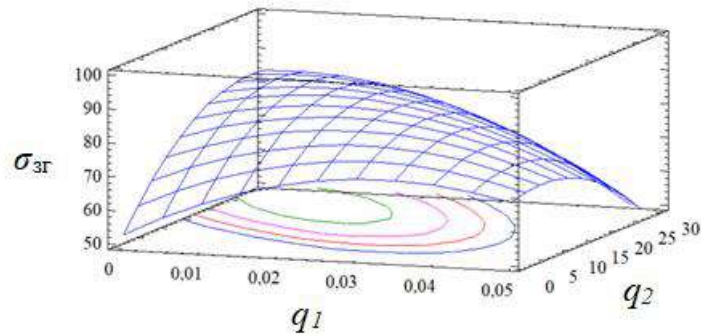


Рисунок 1, а – Розрахункова поверхня відгуку (руйнівні напруження при згинанні)  $\sigma_{зг} = f(q_1, q_2)$

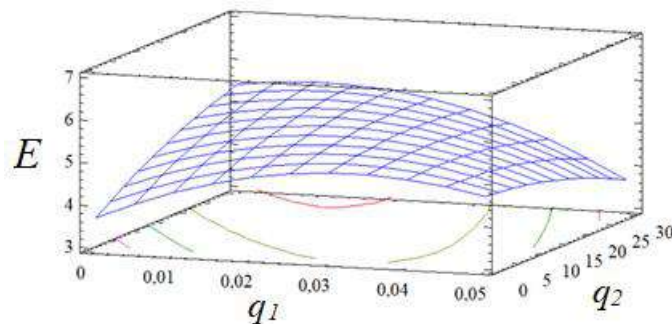


Рисунок 1, б – Розрахункова поверхня відгуку (модуль пружності при згинанні)  $E = f(q_1, q_2)$

Аналізуючи розраховану поверхню відгуку визначено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні характеризуються композити при вмісті наповнювачів: суміш дискретних органічних волокон (СДОВ) – 0,025 мас.ч., антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel (HDBS) – 20 мас.ч. ( $\sigma_{зг} = 92,6$  МПа). Максимальними показниками модуля пружності при згинанні – епоксидний композит за наступного вмісту добавок: суміш дискретних органічних волокон (СДОВ) – 0,010 мас.ч., антиагломеруюча добавка hydropho biervnsmittel (HDBS) – 30 мас.ч. ( $E = 5,8$  ГПа).

Враховуючи, що розроблені матеріали можливо використовувати у багатьох галузях промисловості, передбачено їх експлуатація у різних агресивних середовищах, зокрема річкова вода, сірчана кислота (ГОСТ 4204-77).

Значущим при розробці антикорозійних покриттів є здатність зберігати адгезійну та когезійну міцність під дією зовнішніх факторів (повітря із температурою від 233 К до 323 К ( $\pm 20$  К), відносна вологість до 95% при температурі 293 К ( $\pm 20$  К), ультрафіолетове випромінювання, знижений атмосферний тиск, роса, туман). Окрім того, важливою характеристикою корозійнотривкого покриття є проникнення агресивного середовища крізь полімер до основи. Тому, у роботі проводили дослідження корозійної тривкості у лабораторних і безпосередньо у природних умовах. У лабораторних умовах аналізували зміну питомого опору і питомої ємності розроблених матеріалів у часі під впливом агресивних середовищ (сірчана кислота, річкова вода).

У природних умовах під впливом річкової води і змінних температур у діапазоні  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб проводили якісний аналіз – досліджували покриття за зовнішніми ознаками (крайова корозія, відшарування покриття, розтріскування), а також кількісний – аналізували зміну ваги покриттів товщиною  $h = 130...150$  мкм і площею  $S = 27,5$  см<sup>2</sup>, які наносили на зразки зі сталі 45 методом пневматичного розпилення.

Методом математичного планування експерименту визначено склад добавок для формування епоксикомпозитних захисних покриттів. У лабораторних умовах випробовували чотири варіанти антикорозійного епоксикомпозитного покриття (АЕП):

- АЕП 1 – матриця (контрольний зразок);
- АЕП 2 (СДОВ (0,010 мас.ч.) + HDBS (30 мас.ч.);
- АЕП 3 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (20 мас.ч.);
- АЕП 4 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (10 мас.ч.).

Експериментально встановлено найменші показники питомого опору і найбільші показники питомої ємності у досліджуваних середовищах для епоксидної матриці (рис. 2). При цьому слід зауважити, що зниження опору (з  $\rho = 0,17 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  до  $\rho = 0,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  – у середовищі річкової води; з  $\rho = 0,20 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  до  $\rho = 0,17 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  – у середовищі сірчаної кислоти) спостерігали у період 5-ї доби випробовування. Отримані результати дослідження вказують про початкову стадію утворення корозії.

При цьому для розроблених композитних матеріалів АЕП 2, АЕП 3, АЕП 4 (рис. 2, а) спостерігали несуттєве зменшення питомого опору і у середовищі річкової води впродовж 30 діб дослідження. Водночас слід зазначити, що зміну питомої ємності спостерігали у період 5-ї доби дослідження (рис. 2, б). При цьому найменше значення питомої ємності –  $c = 11,0 \dots 12,0 \text{ пФ}/\text{м}^2$  характерне для композитного матеріалу (АЕП 3) наповненого СДОВ за вмісту 0,025 мас.ч. і HDBS – 20 мас.ч., що корелює із результатами питомого опору та свідчить про блокування процесу дифузії середовища річкової води (іонів води і кисню).

При дослідженні корозійної стійкості розроблених матеріалів у середовищі сірчаної кислоти спостерігали дещо зменшення показників питомого опору і збільшення питомої ємності (порівняно із середовищем води), що пов'язано із перебігом хімічних реакцій, які призводять до утворення гідроксильних іонів та підвищення рівня рН. Це у свою чергу супроводжується процесом хімічного руйнування зв'язків полімеру.

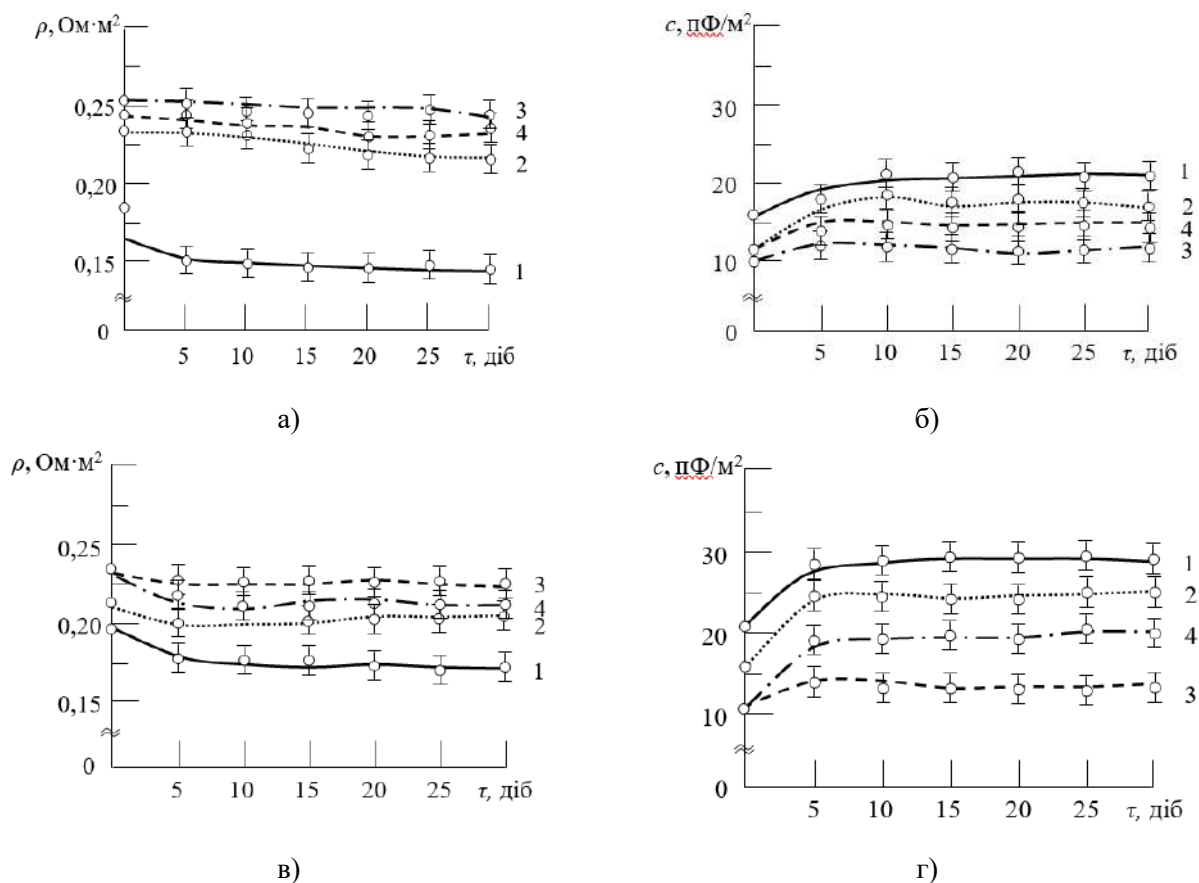


Рисунок 2 – Часова зміна питомого опору (а, в) та питомої ємності (б, г) антикорозійних епоксидних захисних покриттів при частоті 1 кГц у агресивних середовищах: а, б) річкова вода (р. Дніпро); в, г) сірчана кислота; 1 – матриця (контрольний зразок); 2 – АЕП 2 (СДОВ (0,010 мас.ч.) + HDBS (30 мас.ч.); 3 – АЕП 3 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (20 мас.ч.); 4 – АЕП 4 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (10 мас.ч.)

Встановлено, покриття АЕП 3, що містить у своєму складі наповненого СДОВ за вмісту 0,025 мас.ч. і HDBS – 20 мас.ч. характеризується найбільшим значенням питомого опору –  $\rho = 0,23 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  і найменшим значенням питомої ємності –  $c = 14,0 \text{ пФ/м}^2$  (рис. 2, в, г). Тобто, можна припустити, що оптимальне співвідношення добавок, які містять значну кількість активних -О-Н- і  $\text{NH}_2$  груп забезпечують підвищення ступеня зшивання та забезпечує сповільнення електрохімічних реакцій, внаслідок утворення дифузійного бар'єру в об'ємі захисного покриття.

Враховуючи наведені вище результати дослідження можна стверджувати, що найбільш агресивним середовищем є сірчана кислота, де розроблене покриття АЕП 3 характеризується підвищеними антикорозійними характеристиками.

При дослідженні корозійної стійкості розроблених матеріалів у природних умовах (рис. 3) використовували річкову (Дніпрову) воду. Дослідження проводили на гідробіологічній станції м. Херсон.

Якісний аналіз (рис. 3) у природних умовах (за діапазону температур  $\Delta T = (258...298) \pm 2 \text{ К}$ ) дозволяє констатувати про високу корозійну стабільність розроблених матеріалів на основі епоксидного зв'язувача з різними за природою добавками (АЕП 1; АЕП 2; АЕП 3) у агресивному середовищі при знакомінній температурі, позаяк крайової корозії, відшарування покриття, розтріскування не спостерігали. Спостерігали корозійне руйнування поверхні металу не захищеного захисним покриттям. Однак кількісний аналіз (табл. 2) дозволив встановити зміну маси покриттів після експериментальних досліджень. Вважали, що в середовищі річкової води відбувається сорбція води епоксидною матрицею, таким чином використання ненаповнених полімерів не є актуальним. У такому випадку можливе проникнення вологи на границю поділу фаз покриття – металева основа. Тоді, як раціональне ведення у полімерну матрицю волокнисто-дисперсної добавки сприяє підвищенню хімічної стійкості до агресивного середовища, що пояснюється зменшенням долі полімеру в об'ємі композиту.



I                      II                      III                      I                      II                      III  
 а)                      б)

Рисунок 3 – Дослідження корозійної стійкості:

- а) покриття до випробовування (I - АЕП 1; II - АЕП 2; III - АЕП 3);  
 б) покриття після 250 днів випробовування (I - АЕП 1; II - АЕП 2; III - АЕП 3)

Таблиця 2 – Корозійна стійкість ПКП після витримки протягом 250 діб у річковій воді при знакозмінній температурі (258...298) ± 2 К

Оптимальний вміст наповнювача, $q$ , мас.ч.	Зміна маси наповнених епоксикомпозитних покриттів в умовах впливу річкової води, %		
	До випробовування, $m_1$ , %	Після випробовування, $m_2$ , %	$\Delta m$ , %
АЕП 1 – матриця (контрольний зразок);	3,2	3,39	+0,19
АЕП 2 (СДОВ (0,010 мас.ч.) + HDBS (30 мас.ч.)).	3,2	3,25	+0,05
АЕП 3 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (20 мас.ч.));	3,4	3,42	+0,02
АЕП 4 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (10 мас.ч.));	3,1	3,15	+0,05

**Висновки.** На основі проведених комплексних досліджень встановлено наступне.

1. Методом математичного планування експерименту оптимізовано вміст різних за фізико-хімічною природою добавок у епоксидному зв'язувачі для отримання покриттів функціонального призначення. Встановлено оптимальний вміст основного (суміші дискретних органічних волокон) і додаткового (антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel) наповнювачів для формування композитів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Доведено, що введення суміші дискретних органічних волокон за вмісту  $q = 0,025$  мас.ч. та антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel за вмісту  $q = 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД- 20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА забезпечує формування матеріалу з такими властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 92,6$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 5,6$  ГПа.

2. Встановлено, що впродовж  $\tau = 30$  діб витримки у різних агресивних середовищах (сірчана кислота і річкова вода) найбільшим значенням питомого опору характеризується розроблений композитний матеріал АЕП-3, що містить у своєму складі: епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), СДОВ (0,025 мас.ч.), HDBS (20 мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА (10 мас.ч.) за рахунок утворення дифузійного бар'єру в об'ємі захисного покриття.

3. На основі кількісного і якісного аналізу корозійної стійкості розроблених покриттів у природних умовах ( $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб) встановлено, незначну зміну маси ( $\Delta m = 0,02\%$ ) та відсутність дефектів при випробовуванні матеріалу, що містить у своєму складі наступні компоненти: суміш дискретних органічних волокон –  $q = 0,025$  мас.ч. та антиагломеруючу добавку hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  мас.ч. Отримані результати випробовування у природних умовах корелюють із результатами дослідження корозійної стійкості у лабораторних умовах, що свідчить про високі показники антикорозійних властивостей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kashytskyi, V., Savchuk, P., Malets, V., Herasymiuk, Y., and Shcheglov, S., Examining the Effect of Physical Fields on the Adhesive Strength of Protective Epoxy Composite Coatings, *Eastern-European J. Enterp. Technol.* 2017. vol. 3, no. 12. pp. 16–22.
2. Dolgov, M. A., Zubrets'ka, N. A., Buketov, A. V., and Stukhlyak, P. D., Use of the Method of Mathematical Experiment Planning for Evaluating Adhesive Strength of Protective Coatings Modified by Energy Fields, *Strength Mater.* 2012. vol. 44, no. 1. pp. 81–86.
3. Сметанкін, С. О., Нігалатій, В. Д., Букетов, А. В., Шарко, О. В., Скирденко, О. І., Баглюк, Г. А. Розробка модифікованих полімерних композитів для ремонту деталей

енергетичних установок транспортних систем. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. Випуск 1. С. 252–261.

4. Buketov A. V., Saprionov O. O., Brailo M. V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler. *Strength of Materials*. 2014. Vol. 46, No 5. pp.717–723. doi: 10.1007/s11223-014-9605-z.

5. Сапронов О. О. Підвищення антикорозійних характеристик деталей суднових енергетичних установок за рахунок використання епоксикомпозитних покриттів. *Наукові нотатки*. 2014. Випуск 47. С. 176–181.

6. Elmore J. D., Kincaid D. S., Komar P. C., Nielsen, J. E. Waterborne epoxy protective coatings for metal. *Journal of Coatings Technology*. 2002. 74(8). pp. 63–72. doi:10.1007/bf02697969.

7. Buketov A. V., Saprionova A. V., Saprionov O. O., Buketova N. M., Sotsenko V. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Maruschak P. O., Panin S. V., Smetankin S. O., Kulinich A. G., Kulinich V. G. Influence of the structure of epoxy composite filled with discrete fibers on impact fracture of vehicle parts. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2020. Vol. 11. № 2. pp. 113–127. doi: 10.1615/CompMech ComputApplIntJ.2020031192).

8. Яцишин О. І., Червінський Т. І., Братичак М. М. Вивчення структурування епоксидної смоли ЕД-20 у присутності реакційноздатних олігомерів. Вісник Львівської політехніки. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2012. № 726. С. 467–471.

9. 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(2). P. 43–49.

10. Сапронова А. В. Вплив вмісту органічних волокон у епоксидному зв'язувачі на показники адгезійної та когезійної міцності покриттів транспортної техніки. *Науковий вісник ХДМА*. 2019. №1(20). С. 141–151.

11. Браїло М. В., Букетов А. В., Якущенко С. В., Dulebova L. Застосування методу планування експерименту при формуванні полімерного композиту з поліпшеними експлуатаційними характеристиками для його використання у засобах транспорту. *Наукові нотатки*. Випуск 60. 2017. С. 58–68.

12. Букетов А. В., Акимов А. В., Нигалатий В. Д., Браїло Н. В., Аль-Джавахери Али Андан Мансур. Применение методов математической статистики для оптимизации состава защитных покрытий. *Вестник Карагандинского государственного университета*. 2017. №1 (85). С. 17–27.

13. Браїло М. В., Якущенко С. В., Кобельник О. С., Букетова Н. М., Вороненко С. В. Створення нанопоповнених епокси-поліефірних композитних матеріалів для захисту елементів суднових технічних засобів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1 (22). С. 136–144.

14. Браїло М. В., Якущенко С. В., Фесенко І. П. Оптимізація вмісту ініціатора у поліефірній матриці за її фізико-механічними властивостями. *Наукові нотатки*. 2017. Випуск 57. С. 32–36.

15. Захаров Н. М., Алушкина Т. В. Оптимизация состава защитных покрытий на основе эпоксидных смол. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое обращение»*. 2009.

16. Букетов, А. В., Гусев, В. М., Кулініч, А. Г., Якущенко, С. В., Житник, Д. В.: Оптимізація вмісту інгредієнтів при формуванні захисних покриттів для підвищення ресурсу роботи транспортних засобів. *Науковий вісник ХДМА*. 2020. 2 (23). С. 58–67.



## REFERENCES

1. Kashytskyi, V., Savchuk, P., Malets, V., Herasymiuk, Y., and Shcheglov, S., Examining the Effect of Physical Fields on the Adhesive Strength of Protective Epoxy Composite Coatings, *Eastern-European J. Enterp. Technol.* 2017. vol. 3, no. 12. pp. 16–22.
2. Dolgov, M. A., Zubrets'ka, N. A., Buketov, A. V., and Stukhlyak, P. D., Use of the Method of Mathematical Experiment Planning for Evaluating Adhesive Strength of Protective Coatings Modified by Energy Fields, *Strength Mater.* 2012. vol. 44, no. 1. pp. 81–86.
3. Smetankin, S. O., Nigalatij, V. D., Buketov, A. V., Sharko, O. V., Sky`rdenko, O. I., Baglyuk, G. A. Rozrobka modyfikovany`x polimerny`x kompozytiv dlya remontu detalej energety`chny`x ustanovok transportny`x sy`stem. *Naukovy`j visny`k Xersons`koyi derzhavnoyi mors`koyi akademiyi.* 2016. Vy`pusk 1. S. 252–261.
4. Buketov A. V., Saprionov O. O., Brailo M. V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler. *Strength of Materials.* 2014. Vol. 46, No 5. pp.717–723. doi: 10.1007/s11223-014-9605-z.
5. Saprionov O. O. Pidvy`shhennya anty`koroziyny`x xaraktery`sty`k detalej sudnovy`x energety`chny`x ustanovok za raxunok vy`kory`stannya epoksy`kompozy`tny`x pokry`ttiv. *Naukovi notatky`.* 2014. Vy`pusk 47. S. 176–181.
6. Elmore J. D., Kincaid D. S., Komar P. C., Nielsen, J. E. Waterborne epoxy protective coatings for metal. *Journal of Coatings Technology.* 2002. 74(8). pp. 63–72. doi:10.1007/bf02697969.
7. Buketov A. V., Saprionova A. V., Saprionov O. O., Buketova N. M., Sotsenko V. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Maruschak P. O., Panin S. V., Smetankin S. O., Kulinich A. G., Kulinich V. G. Influence of the structure of epoxy composite filled with discrete fibers on impact fracture of vehicle parts. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal.* 2020. Vol. 11. № 2. pp. 113–127. doi: 10.1615/CompMech ComputApplIntJ.2020031192).
8. Yacy`shy`n O. I., Chervins`ky`j T. I., Braty`chak M. M. Vy`vchennya strukturuvannya epoksy`dnoyi smoly` ED-20 u pry`sutnosti reakcijnozdatny`x oligomeriv. *Visny`k L`vivs`koyi politexniki`.* *Ximiya, texnologiya rechovy`n ta yix zastosuvannya.* 2012. # 726. S. 467–471.
9. Buketov A. V., Saprionova A. V., Braila 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(2). P. 43–49.
10. Saprionova A. V. Vply`v vmistu organichny`x volokon u epoksy`dnomu zv'yazuvachi na pokazny`ky` adgezijnoyi ta kogeziynoyi micznosti pokry`ttiv transportnoyi texniki`. *Naukovy`j visny`k XDMA.* 2019. #1(20). S. 141–151.
11. Brayilo M. V., Brayilo M. V., Buketov A. V., Yakushhenko S. V., Dulebova L. Zastosuvannya metodu planuvannya ekspery`mentu pry` formuvanni polimernogo kompozy`tu z polipsheny`my` ekspluatacijny`my` xaraktery`sty`kamy` dlya jogo vy`kory`stannya u zasobax transportu. *Naukovi notatky`.* *Vy`pusk 60.* 2017. S. 58–68.
12. Buketov A. V., Aky`mov A. V., Ny`galaty`j V. D., Bray`lo N. V., Al`-Dzhavaxery` Aly` Andan Mansur. Pry`meneny`e metodov matematy`cheskoj staty`sty`ky` dlya opy`my`zacy`y` sostava zashhy`tny`x pokryty`j. *Vestny`k Karagandy`nskogo gosudarstvennogo uny`versy`teta.* 2017. #1 (85). S. 17–27.
13. Brayilo M. V., Yakushhenko S. V., Kobel`ny`k O. S., Buketova N. M., Voronenko S. V. Stvorenniya nanonapovneny`x epoksy`-poliefirny`x kompozy`tny`x materialiv dlya zaxy`stu elementiv sudnovy`x texnichny`x zasobiv. *Naukovy`j visny`k Xersons`koyi derzhavnoyi mors`koyi akademiyi.* 2020. # 1 (22). S. 136–144.
14. Brayilo M. V., Yakushhenko S. V., Fesenko I. P. Opy`mizaciya vmistu iniciatora u poliefirnij matry`ci za yiyi fizy`ko-mexanichny`my` vlasty`vostyamy`. *Naukovi notatky`.* 2017. *Vy`pusk 57.* S. 32–36.

15. Zaxarov N. M., Alushky`na T. V. Opty`my`zacy`ya sostava zashhy`tnyx pokryty`j na osnove epoksy`dnyx smol. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe obrashheny`ya». 2009.

16. Buketov, A. V., Gusyev, V. M., Kulinich, A. G., Yakushhenko, S. V., Zhy`tny`k, D. V.: Opty`mizaciya vmistu ingrediєntiv pry`formuvanni zaxy`sny`x pokry`ttiv dlya pidvy`shhennya resursu roboty` transportny`x zasobiv. Naukovy`j visny`k XDMA. 2020. 2 (23). S. 58–67.

**Сапронов А. А., Шаранов В. Д., Воробьев П. А., Сапронова А. В., Настасенко В. О., Палагний В. И. НОВЕЙШИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АНТИКОРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ СУДНОВЫХ ГРУЗОВЫХ И ПАЛУБНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

*Для формирования композитных материалов и защитных покрытий на их основе использованы эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20 и отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА. Выбор разнодисперсных наполнителей обусловлен наличием активных групп на их поверхности, комплексом улучшенных характеристик компонентов, что вызывает научный и практический интерес при использовании добавок для формирования защитных покрытий. Оптимальное содержание разнодисперсных добавок в эпоксидном связующем ЭД-20 определено с помощью математического планирования с использованием прикладного пакета STATGRAPHICS® Centurion XVI. Это позволило спрогнозировать и получить эпоксидное покрытие с комплексом улучшенных свойств. Установлено, что улучшенными физико-механическими свойствами характеризуются композитный материал следующего состава: смесь дискретных органических волокон –  $q = 0,025$  масс.ч., антиагломерирующая добавка hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  масс.ч. на 100 масс.ч. олигомера ЭД-20 и 10 масс.ч. отвердителя ПЭПА. Такой эпоксикомпозитный материал характеризуются следующими свойствами: разрушающее напряжения при изгибе –  $\sigma_{32} = 92,6$  МПа, модуль упругости при изгибе –  $E = 5,6$  ГПа. На основе математического планирования эксперимента определены варианты покрытий, которые испытывали на коррозионную стойкость. Проведен анализ изменения удельного сопротивления и удельной емкости покрытий в течение 30 суток под влиянием различных агрессивных сред (серная кислота и речная вода) при температуре  $T = 293 \pm 2$  К. Установлено, что композитный материал, содержащий в своем составе: эпоксидный олигомер (100 масс.ч.), СДОВ (0,025 масс.ч), HDBS (20 масс.ч.), отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА (10 масс.ч.) за счет образования диффузионного барьера в объеме защитного покрытия характеризуется высоким значением удельного сопротивления и минимальным значением удельной емкости во всех агрессивных средах. Это свидетельствует об улучшении антикоррозионных свойств покрытия. Визуальный анализ дефектов, проводимых в естественных условиях под влиянием речной воды и переменных температур в диапазоне  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К в течение  $\tau = 250$  суток позволил подтвердить предварительные экспериментальные исследования и определить покрытие с улучшенными антикоррозионными свойствами.*

**Ключевые слова:** эпоксидная матрица, разрушающие напряжения при изгибе, модуль упругости при изгибе, математическое планирование эксперимента, оптимизация наполнителя, коррозия.

**Sapronov O. O., Sharanov V. D., Vorobiov P. O., Sapronova A. V., Nastasenko V. O., Palagniy V. I. THE NEWEST POLYMER MATERIALS FOR ANTI-CORROSION PROTECTION OF THE SURFACES OF SHIP CARGO AND DECK MECHANISMS**

*Epoxy diane oligomer of ED-20 brand and polyethylene polyamine PEPA hardener were used for the formation of composite materials and protective coatings on their bases. The choice of dispersed fillers is due to the presence of active groups on their surface, a set of improved characteristics of the components, which is of scientific and practical interest in the use of additives for the formation of protective coatings. The optimal content of various additives in the epoxy binder ED-20 was determined by mathematical planning using the application package STATGRAPHICS® Centurion XVI. This allowed us to predict and obtain an epoxy coating with a set of improved properties. It was found that the composite material of the following composition are characterized by improved physical and mechanical properties: a mixture of discrete organic fibers –  $q = 0.025$  wt%, anti-agglomerating additive hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  wt%. per 100 wt%. by weight oligomer ED-20 and 10 wt% firm PEPA. Such epoxy composite material are characterized by the following properties: destructive bending stress –  $\sigma_{32} = 92.6$  MPa, flexural modulus –  $E = 5.6$  GPa. Based on the mathematical planning of the experiment, the variants of coatings that were tested for corrosion resistance were determined. The analysis of changes in resistivity and specific capacity of coatings for 30 days under the influence of various aggressive media (sulfuric acid and river water) at a temperature of  $T = 293 \pm 2$  K. It is established that the composite material containing: epoxy oligomer ED-20 (100 wt%), CDOW (0.025 wt%), HDBS (20 wt%), hardener polyethylene polyamine PEPA (10 wt%) due to the formation of a diffusion barrier in the volume of the protective coating is characterized by the*

*highest the value of resistivity and the lowest value of specific capacity in all aggressive environments. This indicates improved anti-corrosion properties of the coating. Visual analysis of defects, which was carried out in natural conditions under the influence of river water and variable temperatures in the range  $\Delta T = (258... 298) \pm 2 K$  for  $\tau = 250$  days allowed to confirm previous experimental studies and to determine coatings with improved anticorrosive properties.*

**Keywords:** *epoxy matrix, destructive bending stresses, modulus of elasticity in bending, mathematical planning of the experiment, filler optimization, corrosion.*

© Сапронов О. О., Шаранов В. Д., Воробйов П. О., Сапронова А. В., Настасенко В. О., Палагній В. І.

Статтю прийнято  
до редакції 20.09.21