

УДК 667.64:678.026

АНТИКОРОЗІЙНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНОГО ЗВ'ЯЗУВАЧА ДЛЯ ЗАХИСТУ УСТАТКУВАННЯ МОРСЬКОГО ТА РІЧКОВОГО ТРАНСПОРТУ

О.О. Сапронов¹, А.В. Букетов², О.В. Лещенко³, В.Д. Нігалатій⁴

Досліджено корозійну тривкість розроблених епоксидних композитних захисних покриттів, наповнених двокомпонентним бідисперсним наповнювачем. Методом ІЧ-спектрального аналізу та оптичної мікроскопії досліджено структуру захисних покриттів, що дає змогу обрати матеріали для корозійного захисту устаткування морського та річкового транспорту. Додатково проведено дослідження корозійної тривкості матеріалів шляхом аналізу зміни опору та ємності з часом матеріалів у середовищі морської води. Встановлено, що модифіковане бензен-1,3-діаміном захисне покриття із вмістом двокомпонентного наповнювача ультрадисперсного алмазу і карбонату літію характеризується незначною зміною опору $\Delta R = 2 \text{ кОм}\cdot\text{см}^2$ в інтервалі усього часу дослідження ($\tau = 30$ діб). Це свідчить про підвищені антикорозійні властивості розробленого покриття.

Ключові слова: епоксидний композит, корозія, ІЧ-спектральний аналіз, опір, ємність

Постановка проблеми. На сьогодні досить поширені захисні покриття на основі алкідних смол і лаків, аміноформальдегідних та поліуретанових смол. При цьому основним недоліком таких покриттів є нестабільність властивостей під дією атмосфери та агресивних середовищ, складні умови формування, тривалий час полімеризації на повітрі, невисока адгезійна і когезійна міцність та ін. Тому значну увагу приділяють розробленню захисних покриттів, які характеризуються необхідним комплексом поліпшених властивостей, що забезпечує їх довготривалу експлуатацію в агресивних середовищах [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз праць [2-6] дає підстави констатувати, що завдяки поліпшеним адгезійним та когезійним властивостям, незначній усадці і технологічності при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю, епоксидні діанові олігомери марки ЕД-20 доцільно використовувати у вигляді зв'язувачів під час формування захисних покриттів. При цьому введення мінеральних дисперсних добавок в епоксидний зв'язувач зумовлює створення композитів сітчастої структури, що дає змогу направлено регулювати властивості покриттів, а отже, і забезпечувати довготривалу експлуатацію устаткування морського та річкового транспорту. Отже, розроблення та дослідження властивостей нових антикорозійних покриттів є актуальним завданням сучасного полімерного матеріалознавства, що є важливим для розвитку промисловості України.

Мета роботи – розробити антикорозійні епоксикомпозитні покриття для захисту технологічного устаткування морського та річкового транспорту.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача під час формування покриттів вибрано епоксидний діановий олігомер мар-

ки 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 дає змогу затверджувати матеріали за кімнатних температур. Зшивали композитні матеріали (КМ), вводячи твердник у композицію за стехіометричного співвідношення компонент за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20: ПЕПА – 100: 10. Як модифікатор використано бензен-1,3-діамін (ДБ). Формула бензен-1,3-діаміну має вигляд $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2$.

Як наповнювачі для експериментальних досліджень використано карбонат літію (Li_2CO_3), який застосовують для виробництва скла, пластмас, електроізоляційного фарфору, ситалів, а також у чорній металургії (десульфурація сталі) і карбонат нікелю (NiCO_3), який переважно застосовують у лакофарбовій промисловості для фарбування керамічних виробів. Також він є вихідним матеріалом для отримання інших сполук нікелю. Дисперсність наповнювачів становить $8 \dots 10 \text{ мкм}$.

Додатково використовували ультрадисперсний алмаз (УДА), отриманий методом детонаційного синтезу. Частки УДА з розміром $d = 4 \dots 6 \text{ нм}$ складаються з вуглецю ($80 \dots 88 \%$), який, в основному, знаходиться в алмазній фазі. Додатково у частках присутній кисень (10% і більше), водень ($0,5 \dots 1,5 \%$), азот ($2 \dots 3 \%$) і вогнетривкий залишок ($0,5 \dots 8,0 \%$), який складається з оксидів, карбідів та солей різних елементів, таких як Fe, Ti, Cr, Cu, K, Ca, Si, Zn, Pb і т.п. Епоксидний композит, наповнений дисперсними частками УДА і карбонатами, формували за технологією, описаною у працях [4, 5].

Для дослідження хімічних зв'язків у сформованих захисних полімерних покриттях використовували ІЧ-спектральний аналіз. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки "IRAffinity-1" (Японія) у ділянці хвильових чисел $\nu = 400 \dots 2400 \text{ см}^{-1}$ однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектра за хвильовими числами $\lambda^{-1} = \nu$ здійснювали на діаграмі в межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа, інтенсивність пропускання, напівширину і площу смуги поглинання визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа – $\nu = \pm 0,01 \text{ см}^{-1}$, а при визначенні точності розташування піку – $\nu = \pm 0,125 \text{ см}^{-1}$. Фотометрична точність становила $\pm 0,2 \%$ при програмному управлінні щільною і тривалістю інтегрування $t = 10 \text{ с}$. Крок інтегрування $\Delta\lambda = 4 \text{ см}^{-1}$. Матеріал попередньо подрібнювали, висушували за температури $T = 373 \pm 2 \text{ К}$ впродовж часу $t = 20 \text{ хв}$, перемішували в агатовій ступці з порошком KBr, а далі на гідравлічному пресі із навантаженням $\sigma = 20 \text{ МПа}$ формували зразки за співвідношення: досліджувані матеріал – 1 мг , KBr – 300 мг .

Структуру КМ досліджували на металографічному мікроскопі моделі XJL – 17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG ($3,2 \text{ MegaPixels}$). Діапазон збільшення зображення змінювали у межах від $\times 100$ до $\times 1600$ разів. Безпосередньо у роботі зразки досліджували при збільшенні у $\times 250$, $\times 400$, $\times 600$ разів. Для оброблення цифрових зображень використовували програмне забезпечення "LevenhukToupView".

¹ ст. викл. О.О. Сапронов, канд. техн. наук – Херсонська державна морська академія, м. Херсон;

² проф. А.В. Букетов, д-р техн. наук – Херсонська державна морська академія, м. Херсон;

³ аспір. О.В. Лещенко – Херсонська державна морська академія, м. Херсон;

⁴ аспір. В.Д. Нігалатій – Херсонська державна морська академія, м. Херсон.

Корозійну тривкість захисних покриттів визначали методом, який передбачав експериментальні дослідження у лабораторних умовах, внаслідок чого аналізували зміну опору тагг ємності захисних покриттів у часі під впливом агресивного середовища морської води. Для вимірювання опору та ємності захисних покриттів використовували прилад RCL-метр типу Е7-22. Прилад під'єднували до вимірювальної комірки, у яку поміщали зразки у вигляді покриттів, нанесених на металеву основу. На покриття наклеювали скляні циліндри з діаметром $d = 25$ мм, які заповнювали морською водою. Упродовж 30 діб за температури $T = 293^{+2}$ К вимірювали опір та ємність покриттів, значення яких перераховували за формулами:

$$R_{кор} = R \cdot S, \text{ кОм}; \quad (1)$$

$$C_{кор} = C/S, \text{ пФ}; \quad (2)$$

$$S = \pi D^2/4, \text{ см}^2. \quad (3)$$

Для отримання середніх значень опору та ємності покриттів використано не менше 5 зразків, робоча площа яких становила $4,9 \text{ см}^2$.

Результати дослідження та їх обговорення. Для протикорозійного захисту технологічного устаткування морського та річкового транспорту, яке експлуатують в агресивних середовищах, досліджували розроблені захисні покриття на основі епоксидного зв'язувача з двокомпонентним бідисперсним наповнювачем, вміст якого попередньо визначали методом математичного планування експерименту.

Випробовували п'ять складів антикорозійних покриттів:

- матриця (контрольний зразок) (матрицю формували за такого співвідношення компонент – епоксидний олігомер ЕД-20 : твердник ПЕПА – 100 : 10);
- КМ 1 (композит формували за такого співвідношення компонент – зв'язувач : модифікатор бензен-1,3-діамін (БД) : ультрадисперсний алмаз (УДА) ($d = 4 \dots 6$ нм) : карбонат літію ($8 \dots 10$ мкм) – 100 : 0,25 : 0,05 : 0,5);
- КМ 2 (композит формували за такого співвідношення компонент – зв'язувач : модифікатор БД : УДА : карбонат літію – 100 : 1,5 : 0,08 : 3,0);
- КМ 3 (композит формували за такого співвідношення компонент – зв'язувач : модифікатор БД : УДА : карбонат нікелю ($8 \dots 10$ мкм) – 100 : 0,25 : 0,05 : 3,0);
- КМ 4 (композит формували за такого співвідношення компонент – зв'язувач : модифікатор БД : УДА : карбонат нікелю – 100 : 1,5 : 0,08 : 10,0).

Попередньо проводили дослідження структури розроблених захисних покриттів методом ІЧ-спектрального аналізу та оптичної мікроскопії. У зв'язку з тим, що під час аналізу ІЧ-спектрів досліджуваних КМ не виявлено утворення нових і руйнування існуючих зв'язків (рис. 1), порівнювали відносну площу піків ($S, \%$) для оцінки ступеня зшивання розроблених матеріалів (табл.).

Аналіз ІЧ-спектрів дозволив виявити смугу сильної інтенсивності при хвильовому числі $\nu = 590,22 \text{ см}^{-1}$, характеристику якої наведено у табл. При цьому варто зауважити, що серед наведених спектрів (див. рис. 1) найменшою відносною величиною площі піку характеризується спектр 2 ($S = 57,3 \%$) і спектр 5 ($S = 58,1 \%$) (КМ 1 і КМ 4), що свідчить про покращену взаємодію компонент зв'язувача з частками наповнювача, що, як наслідок, передбачає підвищення ступеня зшивання таких матеріалів. За рахунок формування структур-

ної сітки полімеру зі значною кількістю зв'язків відбуваються мінімальні коливання груп атомів і молекул. Тому на цих спектрах спостерігали найменші значення площі піків.

Особливу увагу потрібно звернути на смугу поглинання при хвильовому числі $\nu = 1516,05 \text{ см}^{-1}$. Наявність цієї смуги може опосередковано свідчити про взаємодію С-О груп наповнювачів з епоксидним зв'язувачем. При цьому, серед наведених спектрів найменшою відносно величиною площі піка ($S = 21,1 \%$) характеризується КМ 1. Додатково виявлено (див. рис. 1, спектр 2 і спектр 5), що при $\nu = 3541,31 \text{ см}^{-1}$ мінімальне значення відносної величини площі піків ($S = 68,9 \%$ і $S = 67,9 \%$) характеризуються матеріали КМ 1 і КМ 4. Це свідчить про додаткове зшивання -ОН груп компонент системи, що свідчить про підвищення показників фізико-механічних характеристик матеріалів.

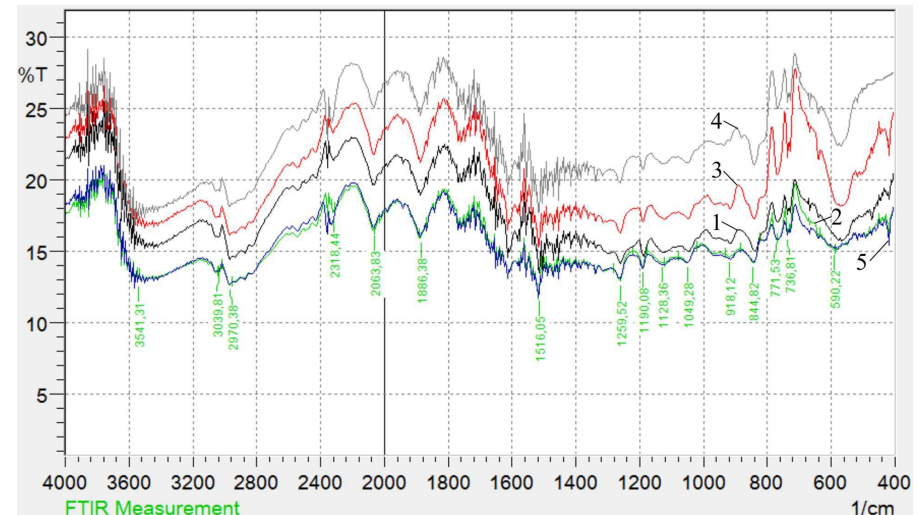


Рис. 1. ІЧ-спектри композитів: 1) матриця; 2) КМ 1; 3) КМ 2; 4) КМ 3; 5) КМ 4

Отже, наведені результати ІЧ-спектрального аналізу (див. рис. 1, табл.) дають змогу констатувати, що серед досліджуваних матеріалів відзначаються підвищеним ступенем зшивання КМ 1 і КМ 4. У цьому випадку спостерігали найменші значення відносної площі піків, що свідчить про поліпшені фізико-механічні властивості композитів.

Додатково досліджували структуру композитів методом оптичної мікроскопії. Встановлено (рис. 2), що поверхня зламу КМ 1 за збільшення $\times 250$ здебільшого характеризується термодинамічно і кінетично врівноваженою структурою, де наявні переважно тільки незначні заглиблення. У разі збільшення $\times 400$ і $\times 600$ (див. рис. 2; б, в) можна констатувати про відсутність напруженого стану в об'ємі композиту, позаяк відсутні істотні дефекти структури, а також широкі лінії сколювання, що свідчить про підвищені показники фізико-механічних властивостей матеріалу. Водночас важливим є відсутність значної кількості мікротріщин, через які під час експлуатації захисного покриття проникають мо-

лекули води та агресивних йонів до металевої основи. Водночас під впливом динамічних навантажень чи знакозмінних температур значна кількість мікротріщин може переходити у магістральні, що призводить до розклинювання матеріалу та подальшого його набухання.

Табл. Характеристичні смуги поглинання (ν) епоксидних композитів і їх відносна площа піків (S) згідно з ІЧ-спектральним аналізом

Характеристика смуги		Відносна площа піків КМ				
Групи	ν , cm^{-1}	Матриця	КМ 1	КМ 2	КМ 3	КМ 4
		S, %	S, %	S, %	S, %	S, %
Пара бензол	590,22	59,3	57,3	72,5	82,7	58,1
-NH-, -CH- маятникові коливання, первинні аміни: -NH ₂ , CH ₂ -NH ₂	736,81	13,2	12,4	18,7	20,3	12,4
-NH-, -CH- маятникові коливання, первинні аміни: -NH ₂ , CH ₂ -NH ₂	771,53	16,8	15,6	17,8	19,8	14,9
-NH-, -CH-маятникові коливання, -C-C- валентні коливання, первинні аміни: CH ₂ -NH ₂ , CH-NH ₂ , епоксид-цикл,	844,82	20,4	19,8	22,4	23,4	19,8
-C-C-, -C-N-, -C-O- валентні коли-вання, епоксиди цикл, вторинні аміни: CH ₂ -NH-CH ₂ , первинні аміни: CH ₂ -NH ₂	1049,28	19,9	18,3	20,0	20,1	18,3
-OH- деформаційні коливання, -C-N-, -C-O- валентні коливання, епоксидцикл, первинні аміни: -NH ₂	1259,52	18,2	16,6	18,5	18,9	16,6
-NH- деформаційні коливання, вторинні аміни: -HN-R, CH-NH-CH, CH ₂ -NH-CH ₂ , карбонатна група C-O.	1516,05	23,4	21,1	23,4	23,5	21,1
Валентні коливання епоксидної групи, карбонільна група C=O	1886,38	51,2	48,9	51,8	52,1	49,0
-C≡N- валентні коливання, алкінна група: -C≡C-H	2063,83	51,0	48,7	52,0	52,5	48,7
-CH- валентні коливання, метило-вий радикал CH ₃ -C, метилен -CH ₂ -	2970,38	23,8	22,4	23,7	24,5	22,4
-CH-, -OH, -NH – валентні коли-вання, пара бензол	3039,81	18,3	16,8	18,3	18,3	16,8
-OH, -NH- валентні коливання	3541,31	70,1	68,9	70,1	70,1	67,9

Аналіз поверхні зламу КМ 2 за збільшення $\times 250$ дав змогу виявити також однорідність структури без наявних дефектів. Водночас аналіз поверхні зламу за збільшення $\times 400$ і $\times 600$ (див. рис. 2; д, е) дає змогу стверджувати про формування термодинамічно і кінетично невірної структури, позаяк виявлено її нерівномірність і наявність різних за величиною блоків полімера. Додатково виявлено заглиблення із значною кількістю мікротріщин, що може спричинити підпльову корозію у процесі експлуатації устаткування з покриттям.

Аналіз поверхні зламу зразків з КМ 3 (див. рис. 2; є-з) дозволив виявити лінії сколювання розгалуженого характеру з явно вираженими заглибленнями. Це свідчить про напружений стан системи і, відповідно, про невисокі захисні влас-

тості покриття. Поверхня зламу КМ 4 за збільшення $\times 250$ характеризується однорідністю структури, а за збільшення $\times 400$ і $\times 600$ (див. рис. 2; к, л) виявлено кратери, що характеризують підвищену в'язкість системи. Це свідчить про помірні показники фізико-механічних властивостей КМ.

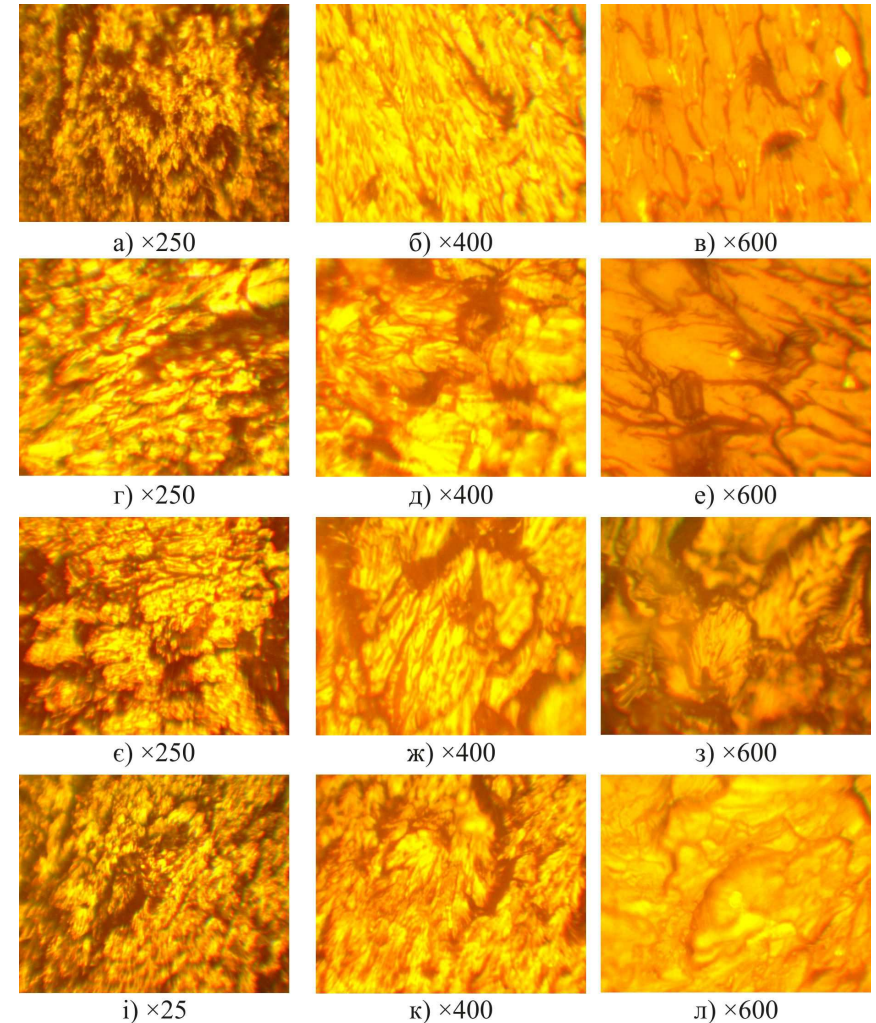


Рис. 2. Фрактограми зламу КМ:

а), б), в) КМ 1; г), д), е) КМ 2; є), ж), з) КМ 3; і), к), л) КМ 4

На завершальному етапі досліджували корозійну тривкість захисних покриттів на основі розроблених композитів. Експериментально доведено, що найменшими показниками опору ($R = 10,0 \dots 12,5 \text{ кОм}\cdot\text{см}^2$) у морській воді впродовж $\tau = 30$ діб досліджень відзначається матриця (рис. 3, а; крива 1). Найнижчі показники опору покриття з матриці та швидка тенденція його зни-

ження (показники опору значно зменшуються після 5 діб) опосередковано свідчать про початкову стадію утворення підплівкової корозії. Водночас, паралельно отримані значення ємності ($C = 3600 \dots 4500$ пФ/см²), які серед наведених КМ є найвищими (див. рис. 3, б; крива 1) і свідчать про набухання захисного покриття впродовж дослідження.

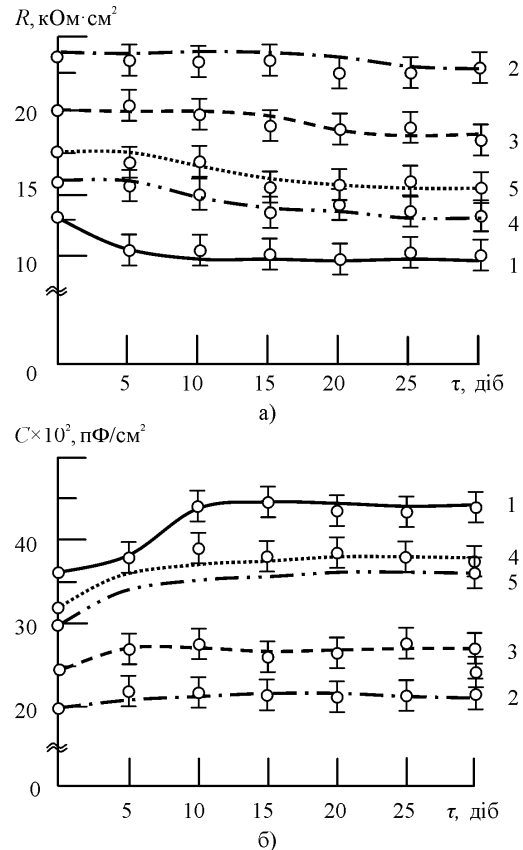


Рис. 3. Часова зміна опору (а) та ємності (б) захисних покриттів при частоті 1 кГц в агресивному середовищі морської води: 1) матриця (контрольний зразок); 2) КП 1; 3) КП 2; 4) КП 3; 5) КП 4

З метою запобігання негативним явищам щодо утворення підплівкової корозії та, як наслідок, набухання з подальшим відшаруванням і розтріскуванням захисного покриття у процесі експлуатації в епоксидний зв'язувач вводили двокомпонентний бідисперсний наповнювач. Цим самим забезпечували блокування траєкторії проходження молекул води та агресивних йонів до металевої основи.

Встановлено (див. рис. 3; крива 2-5), що введення часток наповнювачів приводить до покращення захисних властивостей покриттів. Зокрема, найбільшим значення опору ($R = 23,0 \dots 23,5$ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$) впродовж усього часу дослідження характеризується композитне покриття КП 1 із вмістом добавок (модифіка-

тор бензен-1,3-діамін – $q = 0,25$ мас.ч., ультрадисперсний алмаз – $q = 0,05$ мас.ч., карбонат літію – $q = 0,5$ мас.ч.). Це можна пояснити підвищеною когезійною міцністю епоксидного КМ з двокомпонентним наповнювачем, а різна дисперсність часток зумовлює ущільнення полімеру, який є бар'єром для проникнення агресивного середовища.

Варто звернути увагу на незначну зміну опору у вибраному інтервалі тривалості дослідження. Встановлено (див. рис. 3; крива 2), що опір змінюється у межах $\Delta R = 2$ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ впродовж 30 діб експериментального дослідження. Наведене вище опосередковано свідчить про відсутність напруженого стану у КП 1 і незначну кількість мікротріщин в об'ємі захисного покриття, що додатково узгоджується з результатами випробувань методом оптичної мікроскопії (див. рис. 2; а-в). Отже, введення у зв'язувач двокомпонентного наповнювача за критичного вмісту створює умови для уповільнення процесу дифузії зовнішнього середовища, що, як наслідок, забезпечує стабільність значень опору впродовж усього інтервалу дослідження. Додатково досліджено зміну ємності КП 1 і доведено, що динаміка опору та ємності у часі корелюють (див. рис. 3). Показано, що впродовж 30 діб дослідження в агресивному середовищі найнижчими значеннями ємності ($C = 2000 \dots 2200$ пФ/см²) характеризується КП 1. Це додатково підтверджує припущення про сповільнення процесу дифузії у захисному покритті.

Дещо нижчі значення опору виявлено під час дослідження захисного покриття КП 2. На початковому етапі дослідження значення опору становлять $R = 18 \dots 20$ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, а істотне зменшення R спостерігали після проведення експерименту впродовж часу $\tau = 15$ діб. Вважали, що це пов'язано із перебігом процесу дифузії морської води, внаслідок часткового набухання поверхневого шару захисного покриття, причиною чого може бути наявність мікротріщин чи пор в об'ємі матеріалу (див. рис. 2; д, е). При цьому зростання ємності від $C = 2500$ пФ/см² до $C = 2700$ пФ/см² спостерігали після витримки зразків в умовах впливу агресивного середовища впродовж часу $\tau = 5$ діб.

Стосовно захисних покриттів КП 3 і КП 4 спостерігали таке. Для КП 3 (див. рис. 3, а; крива 5) значення опору у процесі дослідження змінюються в межах $R = 16,5 \dots 17,5$ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, для КП 4 (див. рис. 3, а; крива 4) – $R = 13,6 \dots 16,0$ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$. Додатково варто зауважити, що інтенсивне зменшення опору спостерігали після 5 діб експериментальних досліджень. Вважали, що причиною зменшення опору таких покриттів відносно КП 1 і КП 2 є наявність в об'ємі матеріалів мікро- та макротріщин (див. рис. 2; ж, з). Проникнення агресивного середовища в об'єм полімеру створює умови для поглиблення та подальшого розвитку магістральних макротріщин. Тому такі матеріали характеризуються незначними захисними властивостями. При цьому значення ємності досліджуваних покриттів становлять $C = 3000 \dots 3600$ пФ/см².

Порівняльний аналіз корозійної тривкості розроблених захисних покриттів дає підстави констатувати, що захисне покриття КП 1 забезпечує блокування шляху проходження молекул води та агресивних йонів до металевої основи. Водночас незначна зміна значень опору ($\Delta R = 2$ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$) впродовж усього часу дослідження ($\tau = 30$ діб) дає змогу констатувати про відсутність дефектів у за-

хисному покритті і його покращені антикорозійні властивості. Окрім цього, можна стверджувати, що захисні властивості покриттів КП 2, ПКП 3 і КП 4 є гіршими відносно КП 1 (але водночас кращими порівняно з вихідною епоксидною матрицею). Тому їх доцільно використовувати для підвищення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування, яке експлуатують у звичайних умовах, позаяк показники їх фізико-механічних характеристик є досить високими.

Висновки. У роботі розроблено антикорозійні епоксикомпозитні покриття для захисту технологічного устаткування морського та річкового транспорту.

Встановлено, що найбільшим опором і найменшими показниками ємності характеризується захисне покриття на основі епоксидної матриці (100 мас.ч.) із вмістом добавок (модифікатор бензен-1,3-діамін – $q = 0,25$ мас.ч., ультрадисперсний алмаз – $q = 0,05$ мас.ч., карбонат літію – $q = 0,5$ мас.ч.). Доведено, що після витримки в агресивному середовищі морської води зразків впродовж $\tau = 30$ діб опір покриття становить $R = 23,0 \dots 23,5 \text{ кОм} \cdot \text{см}^2$, що у 2 рази перевищує опір епоксидної матриці. Після витримки покриття у середовищі морської води впродовж $\tau = 30$ діб показники його ємності становлять $C = 2200 \text{ пФ/см}^2$, що у 2,1 раз менше, порівняно з ємністю епоксидної матриці. Тобто розроблене захисне покриття відрізняється поліпшеними антикорозійними властивостями.

Методом ІЧ-спектрального аналізу встановлено підвищений ступінь зшивання захисного покриття, характерною ознакою чого є зменшення відносної площі піків у діапазоні хвильових чисел $\nu = 400 \dots 4000 \text{ см}^{-1}$. Методом оптичної мікроскопії встановлено термодинамічно і кінетично врівноважену структуру матеріалу, де відсутні дефекти структури у вигляді агломератів, мікро- та магістральних тріщин, що свідчить про високі показники його фізико-механічних властивостей.

Література

1. Килимник А.Б. Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии : учебн. пособ. / А.Б. Килимник, И.В. Гладышева. – Тамбов : Изд-во ГТУ, 2008. – 80 с.
2. Розенфельд И.Л. Антикоррозионные грунтовки и ингибирование лакокрасочных покрытий / И.Л. Розенфельд, Ф.И. Рубинштейн. – М. : Изд-во "Химия", 1980. – 200 с.
3. Ліцов М. Застосування полімеризаційноздатних рідких систем і двошарових полімерних стрічок з активною поверхнею для протикорозійного захисту трубопроводів / М. Ліцов, А. Ліцов, О. Максимова // Фізико-хімічна механіка матеріалів : зб. наук.-техн. праць. – 2004. – Т. 1, № 4. – С. 396-400.
4. Сапронов О.О. Використання вrorинних енергоресурсів для підвищення адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксидних композитів / О.О. Сапронов, Н.М. Букетова // Наукові нотатки : зб. наук.-техн. праць. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ. – 2016. – С. – Вип. 53. – С. 154-161.
5. Сапронов О.О. Підвищення антикорозійних характеристик деталей судових енергетичних установок за рахунок використання епоксикомпозитних покриттів / О.О. Сапронов // Наукові нотатки : зб. наук.-техн. праць. – Луцьк : Вид-во ЛНТУ. – 2014. – Вип. 47. – С. 176-181.
6. Браїло М.В. Дослідження корозійної тривкості епоксикомпозитних покриттів з двокомпонентним наповнювачем для деталей судових енергетичних установок / М.В. Браїло, А.П. Бень, В.О. Скирденко, Г.В. Рудакова, О.В. Акімов // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.6. – С. 188-197.

Надійшла до редакції 19.09.2016 р.

Сапронов А.А., Букетов А.В., Лещенко А.В., Нигалатий В.Д. Антикоррозийные покрытия на основе эпоксидного связующего для защиты оборудования морского и речного транспорта

Исследована коррозионная стойкость разработанных эпоксидных композитных защитных покрытий, наполненных двухкомпонентным бидисперсным наполнителем. Методом ИК-спектрального анализа и оптической микроскопии исследована структура защитных покрытий, что дает возможность выбрать материалы для коррозионной защиты оборудования морского и речного транспорта. Дополнительно проведено исследование коррозионной стойкости материалов путем анализа изменения сопротивления и емкости со временем материалов в среде морской воды. Установлено, что модифицированное бензол-1,3-диамином защитное покрытие с содержанием двухкомпонентного наполнителя ультрадисперсного алмаза и карбоната лития характеризуется незначительным изменением сопротивления $\Delta R = 2 \text{ кОм} \cdot \text{см}^2$ в интервале всего времени исследования ($\tau = 30$ суток). Это свидетельствует о повышенных антикоррозионных свойствах разработанного покрытия.

Ключевые слова: эпоксидный композит, коррозия, ИК-спектральный анализ, сопротивление, емкость.

Sapronov A.A., Buketov A.V., Leshchenko A.V., Nigalatiy V.D. Anti-corrosion Coatings Based on Epoxy Binder to Protect the Equipment of Sea and River Transport

We have studied the corrosion resistance of the developed epoxy composite coatings, two-component filled bidisperse filler. By IR spectral analysis and optical microscopy we studied protective coatings structure that makes it possible to select the materials for corrosion protection of the equipment of sea and river transport. Additionally, in a study of corrosion resistance of materials by analyzing the changes in resistance and capacitance with time materials in seawater environment. It is found that the modified benzene-1,3-diamine protective coating containing a two-component filler ultrafine diamond and lithium carbonate is characterized by a slight change in resistance $\Delta R = 2 \text{ кОм} \cdot \text{см}^2$ whole study period interval ($\tau = 30$ days). This demonstrates the high anti-corrosion properties of the developed coating.

Keywords: epoxy composite, corrosion, IR-spectral analysis, resistance, capacitance.

УДК 534.1

НЕЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ СИСТЕМИ ГНУЧКЕ ТРУБЧАСТЕ ТІЛО-СУЦІЛЬНИЙ ПОТІК СЕРЕДОВИЩА, ЩО РУХАЄТЬСЯ ВЗДОВЖ НЬОГО

М.Б. Сокіл¹, І.І. Верхолд², Б.І. Сокіл³, О.І. Хитряк⁴

Досліджено динамічні процеси у трубчастому тілі, вздовж котрого рухається зі сталою швидкістю суцільний потік однорідного середовища за умови, що трубчасте тіло взаємодіє із пружною основою. Побудовано математичну модель нелінійних коливань вказаної системи. Вона є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку з частинними похідними, що містить мішану похідну лінійної і часової змінних. Наявність останньої частково враховує рух суцільного середовища вздовж трубчастого тіла і з нею пов'язані основні труднощі під час побудови розв'язку математичної моделі. В основу досліджень покладено базові результати динаміки позовжньо-рухомих суцільних середовищ та узагальнення на їх базі асимптотичних методів нелінійної механіки. Зазначене, в сукупності, дало змогу отримати співвідношення, які описують основні пара-

¹ доц. М.Б. Сокіл, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"

² доц. І.І. Верхолд, канд. техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного;

³ проф. Б.І. Сокіл, д-р техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного;

⁴ доц. О.І. Хитряк, канд. техн. наук – Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного