

**Соценко Віталій Віталійович**, асистент, Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0003-4384-9373

### ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ І ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ДИСПЕРСНИМИ ЧАСТКАМИ ОКСИТЕТРАЦИКЛІНУ

Для формування епоксикомпозитних матеріалів використовували епоксидний зв'язувач DER-331 виробництва «Dow Chemical Comp» (Німеччина). Для зшивання епоксидного зв'язувача використано твердник холодного тверднення триетилентетрамін ТЕТА ( $q = 10$  мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли DER-331). У якості наповнювача використано антибіотик тетрациклінового ряду дисперсністю 5...10 мкм. Проведено комплексні дослідження адгезійних, фізико-механічних властивостей за результатами яких встановлено оптимальний вміст окситетрацикліну у реактопластичній матриці, який становить  $q = 0,5...1,5$  мас. ч. на 100 мас. ч. олігомеру DER-331 і 10 мас. ч. твердника ТЕТА. Такі композити характеризуються наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві становить  $\sigma_a = 40,0$  МПа, руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{зг} = 80,0$  МПа, модуль пружності при згині –  $E = 3,3...3,4$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 8,0$  кДж/м<sup>2</sup>. Висунуто припущення, що підвищення механічної міцності розроблених матеріалів пов'язано з помірною рухливістю сегментів та бокових груп макромолекул композиту, що забезпечує гнучкість основного ланцюга, а, отже, пружні характеристики полімерного матеріалу. Додатково проведено дослідження наповнених композитних матеріалів в умовах впливу перемінних температур. Аналізували динаміку зміни теплофізичних властивостей епоксикомпозитних матеріалів у різних температурних діапазонах ( $\Delta T = 303...473$  К). Показано, що композитні матеріали, які містять окситетрациклін за вмісту  $q = 0,5...1,5$  мас. ч. характеризуються поліпшеними теплофізичними характеристиками. Зокрема: теплостійкість за Мартенсом становить –  $T = 364$  К; термічний коефіцієнт лінійного розширення за діапазону температур ( $\Delta T = 303...323$  К) –  $\alpha = (2,25...2,68) \times 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>; температура склування –  $T_c = 352...356$  К; усадка –  $\Delta L = 0,29$  %.

Ключові слова: епоксидний композит, покриття, адгезійна міцність, ударна в'язкість, теплофізичні властивості

*Постановка проблеми.* Однією з проблем при експлуатації водного транспорту є корозія і обростання елементів силових агрегатів судна, а також його корпусу та надбудов. Тому, одним з найбільш широко розповсюджених методів захисту металоконструкцій від корозії чи обростання, є нанесення органічних полімерних покриттів. Найбільш поширеними засобами для підвищення корозійної стійкості, є фарби на основі епоксидних, кремнійорганічних, акрилових, поліефірних, та поліуретанових смол [1–3]. Для попередження корозійних процесів і обростання поверхонь транспорту, неметалеві зв'язувачі наповнюють певною кількістю органічних і неорганічних наповнювачів, модифікаторів, пасивуючих сполук. Водночас, на сьогодні існує значний науковий інтерес по розробленню матеріалів із високими показниками корозійної тривкості, які є екологічно чистими для морського середовища [4].

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Авторами показано [5], що біологічне обростання і корозія устаткування річкової і морської галузі (підводні і надводні частини корпусу суден, арматура і трубопроводи систем судна, підводні трубопроводи, буї, металоконструкції у портах, що контактують із водою) суттєво погіршує ефективність використання цих об'єктів та підвищує економічні витрати, які пов'язані з їх експлуатацією,

обслуговуванням та їх ремонтом. Тому, актуальним є використання епоксидних композитів і покриттів на їх основі модифікованих інгібіторами, або інгібувальними пігментами. Одними із ефективних інгібіторів, які доцільно використовувати для устаткування річкової і морської галузі є нанопористі алюмосилікатні мінерали (цеоліти). Їх використання забезпечує іонний обмін з катіонами металів, що попереджує утворення корозійних процесів, а також формування на металоконструкціях мікроорганізмів, які призводять до обростання металевих поверхонь. Водночас, авторами показано [6–9], що інгібувальна ефективність як чистих цеолітів так і іонномодифікованих є високою. Тому, виникає необхідність використання нових добавок, які забезпечать пригнічення розвитку популяції бактеріальних мікроорганізмів, що дозволить попередити обростання металоконструкцій, а також розвиток корозійних процесів на поверхнях устаткування річкової і морської галузі. При цьому на перших етапах розробки нових захисних покриттів існує необхідність проведення комплексних дослідження впливу вмісту активного наповнювача на адгезійні, фізико-механічні, теплофізичні властивості для забезпечення тривалої експлуатації покриттів без зміни їх властивостей.

*Мета роботи* – дослідити вплив вмісту дисперсного окситетрацикліну на динаміку зміни властивостей епоксикомпозитних матеріалів.

*Матеріали та методика дослідження.* Для формування епоксикомпозитних матеріалів використано епоксидний олігомер DER – 331 (CAS No. 25085-99-8) виробництва «Dow Chemical Comp» (Німеччина). Для зшивання епоксидної композиції використовували твердник триетилтетраамін ТЕТА (CAS No. 112-24-3). Вміст останнього становив –  $q = 10$  мас.ч. (вказано на 100 мас.ч. епоксидної смоли DER-331).

Як наповнювач використано дисперсний (5–10 мкм) окситетрациклін (ОТ). Це антибіотик тетрациклінового ряду. Наповнювач характеризується широким спектром біоцидних властивостей і використовується проти великої кількості бактеріальних організмів. Окситетрациклін за своєю природою є ліпофільною речовиною і може легко проникати через клітину мембрану бактеріальних мікроорганізмів, що в свою чергу приводить до пригнічення розвитку їх популяції. Тому, доцільним є його використання у якості антибактеріального інгредієнту при формуванні епоксидної композиції, що забезпечить попередження обростання металоконструкцій транспорту. Молекулярна формула даного наповнювача –  $C_{22}H_{24}N_2O_9$ . Формування епоксидних композитів виконували у послідовності, описаній у працях [10–12].

У роботі досліджували: адгезійну міцність при відриві; руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні; ударну в'язкість, теплостійкість за Мартенсом, термічний коефіцієнт лінійного розширення, температуру склування, усадку за методиками описаними у працях [1–3].

*Результати досліджень та їх обговорення.* Попередньо у роботі досліджено адгезійні властивості полімерних композитів, наповнених дисперсним окситетрацикліном (ОТ). Вміст окситетрацикліну змінювали в межах  $q = 0,5 \dots 3,0$  мас. ч (рис. 1). При введенні дисперсного наповнювача за вмісту  $q = 0,5$  мас. ч. спостерігали максимальне підвищення адгезійної міцності з  $\sigma_a = 36,9$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 40,0$  МПа. Вважали що, встановлений максимум пов'язаний зі збільшенням енергії адсорбції, що за нашим припущенням приводить до зміни надмолекулярних структур навколо часток наповнювача. Введення ОТ за вмісту  $q = 1,0 \dots 3,0$  мас. ч. призводить до суттєвого зменшення адгезійної міцності, значення якого є меншим значення матриці –  $\sigma_a = 28,0 \dots 34,0$  МПа.

Встановлено, що введення часток наповнювача понад критичного вмісту ( $q = 0,5$  мас. ч.) спричиняє підвищення в'язкості системи і водночас зменшує ступінь його змочування. Це у свою чергу забезпечує утворення концентраторів напружень в об'ємі полімеру, утворенню дефектів і, як наслідок, зменшення адгезійної міцності.

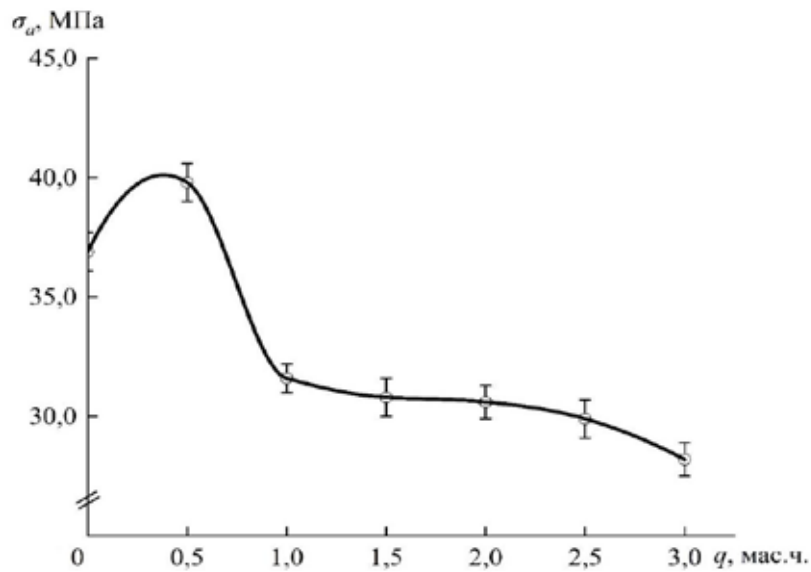


Рисунок 1 – Залежність адгезійної міцності при відриві ( $\sigma_a$ ) від вмісту наповнювача окситетрацикліну

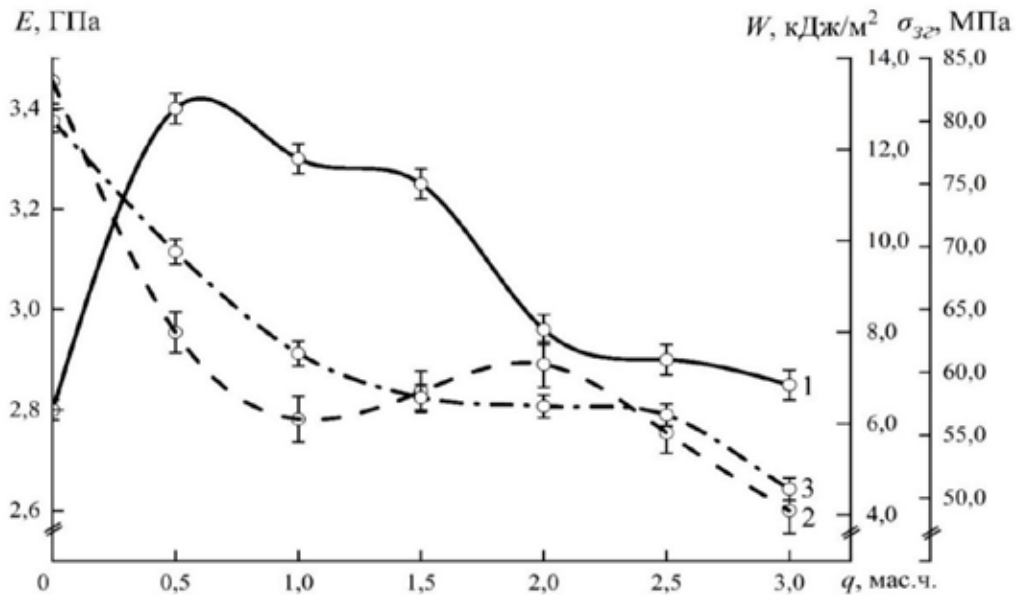
Додатково досліджено вплив вмісту дисперсного ОТ на фізико-механічні властивості КМ. Введення дисперсного наповнювача ОТ за вмісту  $q = 0,5 \dots 1,5$  мас. ч. забезпечує поліпшення пружних властивостей КМ, при цьому модуль пружності при згинанні підвищився з  $E = 2,8$  ГПа до  $E = 3,3 \dots 3,4$  ГПа (рис. 2, крива 1). Слід зазначити, що дані результати корелюють з попередньо дослідженими адгезійних властивостей. Враховуючи незначний вміст дисперсної добавки у епоксидному зв'язувачі і отримані значення когезійної міцності, припускали, що досліджуваний матеріал характеризується підвищеною пружністю. Вважали, що це пов'язано з помірною рухливістю сегментів та бокових груп макромолекул композиту, що забезпечує гнучкість основного ланцюга, а отже, пружні характеристики полімерного матеріалу. За рахунок цього матеріал може чинити опір деформуванню. Відповідно, збільшення вмісту добавки до  $q = 2,0 \dots 3,0$  мас. ч., призводить до зменшення значення модуля пружності при згинанні, до рівня не наповненої полімерної матриці –  $E = 2,8 \dots 3,0$  ГПа. Отримані результати дослідження можна пояснити обмеженням рухливості сегментів та бокових груп макромолекул композиту, що у свою чергу обмежує рухливість основного ланцюга за рахунок введення критичного вмісту наповнювача. Це у свою чергу призводить до підвищення жорсткості і крихкості таких композитів.

Паралельно досліджували залежність впливу вмісту дисперсного ОТ на ударну в'язкість та руйнівні напруження при згинанні. Максимальне значення даних характеристик ( $W = 13,5$  кДж/м<sup>2</sup> і  $\sigma_{3z} = 80,0$  МПа) спостерігали для епоксидної матриці (рис. 2, крива 2, 3). Тоді, як введення дисперсного окситетрацикліну призводить до зниження показників руйнівних напружень і ударної в'язкості.

З огляду на попередні результати дослідження модуля пружності при згинанні, можна констатувати про термодинамічну нестабільність гетерогенних полімерних систем. Тому, для отримання КМ з комплексом необхідних фізико-механічних властивостей доцільно у епоксидний зв'язувач вводити наповнювач ОТ за вмісту  $q = 0,5$  мас. ч. При цьому актуальним при формуванні захисних покриттів є посилення механічних характеристик шляхом комбінування різнодисперсних наповнювачів.

При використанні захисних покриттів у різних кліматичних умовах, необхідно враховувати вплив температури, що також впливає на термін експлуатації системи

«покриття-основа». Тому, надалі досліджували вплив дисперсного окситетрацикліну на теплофізичні характеристики епоксидних композитів (теплостійкість за Мартенсом, термічний коефіцієнт лінійного розширення, температура склування, усадка).



1 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 2 – ударна в'язкість ( $W$ );  
3 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ )

Рисунок 2 – Залежність модуля пружності при згинанні ( $E$ ), ударної в'язкості ( $W$ ) та руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) від вмісту окситетрацикліну

Встановлено, що результати дослідження теплостійкості за Мартенсом корелюють із динамікою адгезійної міцності і модуля пружності при згинанні досліджуваних КМ. Так, наприклад, введення окситетрацикліну за вмісту  $q = 0,5$  мас. ч. забезпечує підвищення теплостійкості з  $T = 359$  К (для епоксидної матриці) до  $T = 364$  К (табл. 1), що свідчить про активність дисперсного наповнювача. Тоді як введення ОТ за вмісту  $q = 1,0 \dots 3,0$  мас. ч. призводить до монотонного зменшення значення теплостійкості за Мартенсом.

Таблиця 1 – Теплофізичні властивості КМ

№	Характеристики	Вміст окситетрацикліну, $q$ , мас. ч.						
		матриця	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
1	Теплостійкість (за Мартенсом), $T$ , К	359,0	364,0	361,0	360,0	356,0	355,5	354,0
2	Температура склування, $T_c$ , К	320	352	356	350	348	340	334
3	Усадка, $\Delta L$ , %	0,35	0,29	0,38	0,54	0,42	0,46	0,51

Особливо важливим релаксаційним переходом у епоксикомпозитах є температура склування ( $T_c$ ). Встановлено, що найбільшою температурою склування  $T_c = 356 \dots 352$  К характеризуються КМ наповнені окситетрацикліном за вмісту  $q = 0,5 \dots 1,0$  мас. ч (табл. 1). Вважали, що отримані значення температури склування пов'язані із міжмолекулярною взаємодією структурних елементів, що забезпечує зменшення рухливості незалежних кінетичних елементів (макромолекул та сегментів) та додаткового ущільнення просторової сітки полімеру. Водночас такі композити характеризуються незначними значеннями усадки, що становить до  $\Delta L = 1\%$ . Це свідчить про зменшення ймовірності розтріскування і розшарування покриттів, за рахунок зменшення залишкових напружень, а отже, їх довговічність у процесі експлуатації.

На основі дилатометричних кривих (рис. 3, 4) додатково розраховували термічний коефіцієнт лінійного розширення. Показано (табл. 2), що із зростанням температури ТКЛР епоксикомпозитних матеріалів збільшується криволінійно, що пов'язано із релаксаційними процесами, які відбуваються при температурних переходах. Так, наприклад введення наповнювача ОТ за вмісту  $q = 0,5$  мас.ч. забезпечує зменшення ТКЛР епоксикомпозиту у температурному діапазоні  $\Delta T = 303 \dots 323$  К в 1,1 рази ( $\alpha = 2,25 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) відносно епоксидної матриці.

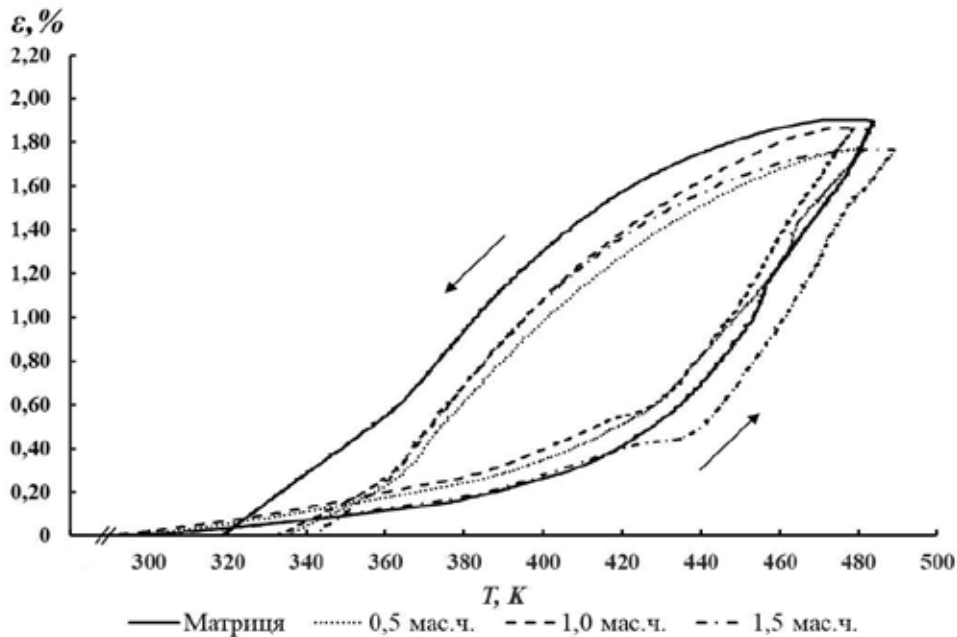


Рисунок 3 – Показники дилатометричних кривих епоксидної матриці залежно від зміни вмісту наповнювача окситетрацикліну

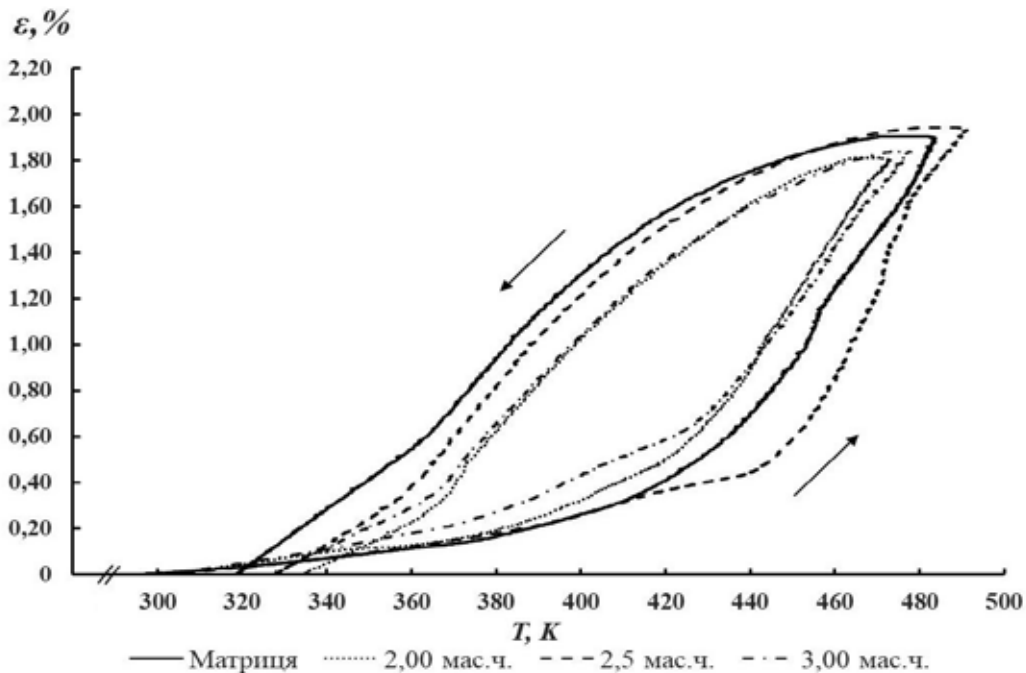


Рисунок 4 – Показники дилатометричних кривих епоксидної матриці залежно від зміни вмісту наповнювача окситетрацикліну

Таблиця 2 – Термічний коефіцієнт лінійного розширення наповнених окситетрацикліном композитів за різних температурних діапазонів випробувань

Вміст наповнювача, $q$ , мас. ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}$ , $K^{-1}$			
	Температурні діапазони випробування, $\Delta T$ , К			
	303...323	303...373	303...423	303...473
Матриця	2,50	2,74	4,96	9,78
0,5	2,25	2,51	4,17	9,16
1,0	2,36	2,86	4,28	9,26
1,5	2,68	2,63	4,22	9,17
2,00	2,87	2,84	4,37	9,71
2,50	3,27	3,14	4,73	9,97
3,00	2,58	3,78	4,94	9,59

Отримані результати вказують на активний вплив наповнювача, який забезпечує формування однорідної структурованої полімерної системи, а це у свою чергу приводить до раціонального перерозподілу теплового руху в об'ємі композиту, що і впливає на показники ТКЛР у склоподібному стані.

У температурному діапазоні  $\Delta T = 303...373$  К, що відповідає високоеластичному стану, найменше значення ТКЛР –  $\alpha = 2,51 \times 10^{-5} K^{-1}$  встановлено при введенні ОТ за вмісту  $q = 0,5$  мас.ч. При цьому значення ТКЛР за такого вмісту збільшуються у 1,1 рази (порівняно з попереднім діапазоном дослідження).

Збільшення у 1,8...2,0 рази значення ТКЛР розроблених епоксикомпозитних матеріалів у температурному у діапазоні  $\Delta T = 303...423$  К, свідчить, що такі композити переходять з високоеластичного у в'язкотекучий стан. При цьому найменше значення термічного коефіцієнту лінійного розширення –  $\alpha = 4,17 \times 10^{-5} K^{-1}$  спостерігали при введенні часток ОТ за вмісту  $q = 0,5$  мас.ч.

У температурному діапазоні  $\Delta T = 303...473$  К спостерігали збільшення лінійної деформації. При цьому у вказаному діапазоні температур найменший ТКЛР ( $\alpha = 9,16...9,26 \times 10^{-5} K^{-1}$ ) характерний для КМ із вмістом ОТ  $q = 0,5...1,5$  мас. ч.

*Висновки.* За результатами проведених досліджень адгезійних, фізико-механічних, тепло-фізичних властивостей епоксидних композитних матеріалів встановлено оптимальний вміст окситетрацикліну (5...10 мкм) для формування захисних покриттів.

1. Зважаючи на те, що адгезія захисних покриттів до металевої основи є основним з ключових факторів, які впливають на їх довговічність, приводить до попередження корозійних процесів металоконструкцій, актуальним є використання окситетрацикліну за вмісту  $q = 0,5$  мас.ч., позаяк значення адгезійної міцності при відриві становить –  $\sigma_a = 40,0$  МПа. Водночас отримане значення усадки –  $\Delta L = 0,29\%$ , свідчить про можливість довготривалої експлуатації за рахунок зменшення ймовірності розтріскування і розшарування покриттів.

2. Встановлено, що розроблені композити за вмісту окситетрацикліну  $q = 0,5...1,5$  мас. ч. характеризуються поліпшеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями. Такі композити характеризуються наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 80,0$  МПа, модуль пружності при згині –  $E = 3,3...3,4$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 8,0$  кДж/м<sup>2</sup>, теплостійкість за Мартенсом –  $T = 364$  К. Вважали, що підвищення механічної міцності розроблених матеріалів пов'язано з помірною рухливістю сегментів та бокових груп макромолекул композиту, що забезпечує гнучкість основного ланцюга, а, отже, пружні характеристики полімерного матеріалу.

3. Встановлено динаміку зміни термічного коефіцієнту лінійного розширення у склоподібному, високоеластичному, перехідному (високоеластичний-в'язкотекучий), в'язкотекучому температурних переходах (станах), що пов'язано із швидкістю перебігу

релаксаційних процесів. Доведено доцільність використання композитів із вмістом часток окситетрацикліну  $q = 0,5 \dots 1,0$  мас. ч. в умовах впливу змінних температур. Такі матеріали характеризуються найменшим значенням термічного коефіцієнту лінійного розширення у досліджуваних температурних діапазонах і значенням температури склування  $T_c = 352 \dots 356$  К.

Публікація містить результати досліджень, проведених у рамках НДДКР молодих вчених «Спрямоване керування структуроутворенням нановуглецевмісних полімерних композитів для підвищення експлуатаційних характеристик транспорту» (№ д. р. 0121U107610).

### Бібліографічний перелік

1. Букетов А.В. Відновлення засобів транспорту фулереновмісними епоксикомпозитами / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, М.В. Браїло та ін. Херсон : ХДМА, 2018. 164 с.
2. Букетов А.В. Метод підвищення ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту за рахунок використання модифікованих захисних антикорозійних покриттів / А.В. Букетов, С.О. Сметанкін, Т.В. Чернявська, та ін. Херсон : ХДМА, 2021. 126 с.
3. Buketov A. The Use of Complex Additives for the Formation of Corrosion- and Wear-Resistant Epoxy Composites / A. Buketov, O. Sapronov, M. Brailo and others. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019, Article ID 8183761, 5 pages.
4. Вестник Морского государственного университета. Серия Судостроение и судоремонт : сб. науч. тр. Вып. 47. Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2011. 106 с.
5. Kim In-Tae, et al. Effect of corrosion on the tension behavior of painted structural steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 133. 2017. Pp. 256–268.
6. Ahmed N.M. Electrochemical studies on the corrosion performance of new advanced anti-corrosive pigments / N.M. Ahmed, W.M. Abd El-Gawad, A.A. El\_Shami, E.M.R.Souaya. *Pigment & Resin Technology*, 2017. Vol. 46. No. 3. Pp. 181–193.
7. Pokhmurskii V.I. Aluminium Alloy Corrosion Inhibition by Chromate-Free Composition of Zinc Phosphate and Ion Exchanged Zeolite / V.I. Pokhmurskii, I.M. Zin, L.M. Bilyi, V.A. Vynar, Ya.I.Zin. *Surface and Interface Analysis*, 2013. V. 45. P. 1474–1478.
8. Pokhmurs'kyi V.I., Bilyi L.M., Zin' Ya.I., Voloshyn M.P. Inhibition of the Corrosion of Aluminum Alloy by a Composition of Ion-Exchange Pigments. *Mater. Sci*, 2016. V. 51. Pp. 638–643.
9. Kornii S.A. Quantum Chemical Analysis of the Electronic Structures of Inhibiting Complexes of Rhamnolipid with Metals / S.A. Kornii, V.I. Pokhmurs'kyi, V.I. Kopylets', I.M. Zin', N.R. Chervins'ka. *Mater. Sci*, 2017. Vol. 52(5). Pp. 609–619.
10. Sapronov O.O. Polymeric materials based on epoxy oligomer DER-331 and hardeners of different physical and chemical nature for repairing of gas production equipment / O.O. Sapronov, V.V. Sotsenko, B. Antonio, S.O. Smetankin, K.Yu. Yurenin. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 2020. Vol. 7(2). Pp. 54–60.
11. Сапронов О.О. Дослідження впливу вмісту модифікатора 2-бензофуран-1,3-діон на адгезійні та фізико-механічні властивості епоксидних композитів / О.О. Сапронов, В.В. Соценко, А.В. Сапронова, П.О. Воробйов, В.М. Яцюк. *Науковий вісник ХДМА*, 2021. № 1(24). С. 118–128.
12. Sapronov O. Development and Use of New Polymer Adhesives for the Restoration of Marine Equipment Units / O. Sapronov, P. Maruschak, V. Sotsenko and others. *J. Mar. Sci. Eng*, 2020. 8(7). P. 527.

### References

1. Buketov A.V. Restoration of vehicles with fullerene-containing epoxy composites / A.V. Buketov, O.O. Sapronov, M.V. Brailo and others. Kherson : KhDMA, 2018. 164 p.
2. Buketov A.V. The method of increasing the service life of river and sea transport equipment due to the use of modified protective anti-corrosion coatings / A.V. Buketov, S.O. Smetankin, T.V. Chernyavska and others. Kherson : KhDMA, 2021. 126 p.
3. Buketov A. The Use of Complex Additives for the Formation of Corrosion- and Wear-Resistant Epoxy Composites / A. Buketov, O. Sapronov, M. Brailo and others. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019, Article ID 8183761, 5 pages.
4. Bulletin of the Maritime State University. Series Shipbuilding and ship repair : sat. science tr. Issue 47. Vladivostok : Mor. Mr. Univ, 2011. 106 p.
5. Kim In-Tae, et al. Effect of corrosion on the tension behavior of painted structural steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, 133. 2017. Pp. 256–268.

6. Ahmed N.M. Electrochemical studies on the corrosion performance of new advanced anticorrosive pigments / N.M. Ahmed, W.M. Abd El-Gawad, A.A. El-Shami, E.M.R.Souaya. *Pigment & Resin Technology*, 2017. Vol. 46. No. 3. Pp. 181–193.
7. Pokhmurskii V.I. Aluminium Alloy Corrosion Inhibition by Chromate-Free Composition of Zinc Phosphate and Ion Exchanged Zeolite / V.I. Pokhmurskii, I.M. Zin, L.M. Bily, V.A. Vynar, Ya.I. Zin. *Surface and Interface Analysis*, 2013. V. 45. P. 1474–1478.
8. Pokhmurs'kyi V.I., Bilyi L.M., Zin' Ya.I., Voloshyn M.P. Inhibition of the Corrosion of Aluminum Alloy by a Composition of Ion-Exchange Pigments. *Mater. Sci*, 2016. V. 51. Pp. 638–643.
9. Kornii S.A. Quantum Chemical Analysis of the Electronic Structures of Inhibiting Complexes of Rhamnolipid with Metals / S.A. Kornii, V.I. Pokhmurs'kyi, V.I. Kopylets', I.M. Zin', N.R. Chervins'ka. *Mater. Sci*, 2017. Vol. 52(5). Pp. 609–619.
10. Saponov O.O. Polymeric materials based on epoxy oligomer DER-331 and hardeners of different physical and chemical nature for repairing of gas production equipment / O.O. Saponov, V.V. Sotsenko, B. Antonio, S.O. Smetankin, K.Yu. Yurenin. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 2020. Vol. 7(2). Pp. 54–60.
11. Saponov O.O. Study of the effect of the content of the modifier 2-benzofuran-1,3-dione on the adhesive and physical-mechanical properties of epoxy composites / O.O. Saponov, V.V. Sotsenko, A.V. Saponova, P.O. Vorobyov, V.M. Yatsyuk. *Scientific Bulletin of KhDMA*, 2021. No. 1(24). P. 118–128.
12. Saponov O. Development and Use of New Polymer Adhesives for the Restoration of Marine Equipment Units / O. Saponov, P. Maruschak, V. Sotsenko and others. *J. Mar. Sci. Eng*, 2020. 8(7). P. 527.

**Sotsenko Vitalii**, Assistant Professor, Kherson State Maritime Academy, ORCID: 0000-0003-4384-9373

### PHYSICO-MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES FILLED WITH DISPERSED PARTICLES OF OXYTETRACYCLINE

Epoxy binder DER - 331 manufactured by Dow Chemical Comp (Germany) was used to form epoxy composite materials. Cold-cured triethylenetetramine TETA hardener was used to crosslink the epoxy binder ( $q = 10$  pts. wt. by weight per 100 pts. wt. by weight of DER-331 epoxy resin). A tetracycline antibiotic with a dispersion of 5...10  $\mu\text{m}$  was used as a filler. Complex studies of adhesive, physical and mechanical properties were carried out, based on the results of which the optimal content of oxytetracycline in the reactoplastic matrix was established, which is  $q = 0.5...1.5$  pts. wt. per 100 pts. wt. by weight oligomer DER-331 and 10 pts. wt. Theta's stronghold. Such composites are characterized by the following properties: adhesive tensile strength is  $\sigma_a = 40.0$  MPa, destructive bending stresses –  $\sigma_{ben} = 80.0$  MPa, flexural modulus –  $E = 3.3...3.4$  GPa, toughness –  $W = 8.0$  kJ/m<sup>2</sup>. It has been suggested that the increase in mechanical strength of the developed materials is due to the moderate mobility of segments and side groups of composite macromolecules, which provides flexibility of the main chain and, consequently, the elastic characteristics of the polymeric material. Additionally, the study of filled composite materials under the influence of variable temperatures. The dynamics of changes in the thermophysical properties of epoxy composite materials in different temperature ranges ( $\Delta T = 303...473$  K) was analyzed. It is shown that composite materials containing oxytetracycline with a content of  $q = 0.5...1.5$  pts. wt. characterized by improved thermophysical characteristics. In particular: Martens heat resistance is –  $T = 364$  K; thermal coefficient of linear expansion over the temperature range ( $\Delta T = 303...323$  K) –  $\alpha = (2.25...2.68) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; glass transition temperature –  $T_g = 352...356$  K; shrinkage –  $\Delta L = 0.29\%$ .

Keywords: epoxy composite, coating, adhesive strength, toughness, thermophysical properties

Стаття надійшла до редакції 22.03.2022 р.