

DOI: 10.18372/2310-5461.67.20242
УДК 629.1

А. В. Букетов, д-р техн. наук, професор
Херсонська державна морська академія
orcid.org/0000-0001-9836-3296
E-mail: buketov@tntu.edu.ua;

Д. В. Житник, д-р філософії
Херсонська державна морська академія
orcid.org/0000-0001-6579-3599
E-mail: danylzhynyk@gmail.com;

О. В. Тотосько, канд. техн. наук, доцент
Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя
orcid.org/0000-0001-6002-1477
E-mail: totosko@gmail.com;

К. М. Клевцов, д-р техн. наук, професор
Херсонська державна морська академія
orcid.org/0000-0001-8486-1104
E-mail: klevtsovkostyantyn@gmail.com;

О. В. Шарко, д-р техн. наук, професор
Херсонська державна морська академія
orcid.org/0000-0001-6400-8528
E-mail: mvsharko@gmail.com

УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ ВНАСЛІДОК ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОСТІЙКИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

Вступ

Полімерні композитні матеріали (КМ) знайшли широке застосування у водному транспорті у вигляді корозійно- і зносостійких композитів й адгезивів. Авторами [1-5] обґрунтовано, що саме застосування полімерних КМ на сучасних судах забезпечує підвищення їх енергоефективності. Авторами [6] доведено, що головним показником, який характеризує енергоефективність суден, є Індекс енергоефективності (ЕЕХІ), введений Міжнародною морською організацією (ІМО). Водночас, покращення енергоефективності, що оцінюється через ЕЕХІ, може досягати 15–20 % для суден, які використовують найсучасніші захисні полімерні покриття порівняно зі звичайними фарбами. Відзначено [7], що епоксидні композити з підвищеними теплофізичними характеристиками ефективно відводять тепло від критичних вузлів двигуна та вихлопної системи, підвищуючи ККД і зменшуючи втрати енергії. Легкі епоксидні сендвіч-панелі з теплоізоляційним наповнювачем значно знижують теплопередачу в житлові та технологічні приміщення судна, скорочуючи витрати енергії на кондиціонування та опалення. Важливим для управління енергоефективністю суден є застосування захисних покриттів з наперед заданими властивостями. Зокрема, покриття на основі епоксидних смол,

модифіковані мікрочастками і дискретними волокнами, створюють ефективний бар'єр на поверхнях, що підлягають впливу теплового поля, запобігаючи втратам тепла в навколишнє середовище [8, 9]. Також застосування епоксидних композитів з низьким коефіцієнтом теплового розширення для виготовлення корпусів теплообмінників підвищує їхню ефективність та довговічність, економлячи енергію.

Одним із основних критеріїв підвищення енергоефективності суден, а також управління нею, є використання композитів зі спеціальними наповнювачами (оксиди, карбіди металів) [7, 9], що дозволяє створювати конструкції, які одночасно є міцними, легкими і мають задані теплофізичні характеристики для оптимального теплового менеджменту. Епоксидні матеріали з підвищеною теплостійкістю дозволяють ізолювати компоненти силової установки, перенаправляючи теплову енергію для корисного використання (наприклад, для опалення), підвищуючи загальну енергоефективність. Нанесення епоксидних покриттів з високою емісійною здатністю на поверхні радіаторів та охолоджуючих пристроїв покращує тепловіддачу, сприяючи більш ефективному охолодженню обладнання. Створення герметичних ізоляційних шарів за допомогою епоксидних смол на стиках та з'єднаннях трубопроводів усу-

ває місцеві втрати тепла, оптимізуючи енерговитрати. Тобто, інтеграція епоксидних композитів із функцією пасивного теплового менеджменту в конструкцію судна дозволяє суттєво знизити навантаження на систему енергопостачання та загальне споживання палива. Це є суттєвою ознакою підвищення енергоефективності сучасних суден водного транспорту.

Постановка проблеми

Водночас у даний час науковцями постійно проводиться спектр досліджень з метою створення матеріалів з покращеними властивостями, у тому числі й теплофізичними. Для цього створюють нові технологічні схеми отримання матеріалів, проводять їх оброблення зовнішніми енергетичними полями на попередній стадії формування, вводять добавки різної фізичної природи [7-15]. Передбачали, що комплексне застосування епоксидних матеріалів із заданими теплофізичними характеристиками забезпечує суцільний тепловий контроль на судні, а це призводить до сукупної економії палива та електроенергії за рахунок мінімізації всіх видів теплових втрат.

Перспективним і доцільним є введення у епоксидну смолу нано-, мікро- і макродисперсних добавок, які забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів [6, 8]. Водночас не менш актуальним є наповнення епоксидної матриці модифікуючими добавками. Останні як правило є фізично і хімічно активними до взаємодії із макромолекулами епоксидної смоли, що дозволяє під час полімеризації створити міцнішу структуру гомогенної системи.

Суттєвий перепад температури, а також виникнення значних напруг під дією зовнішніх факторів призводять до передчасного виходу з ладу адгезивів під час рейсу суден [8, 15]. Для нівелювання вказаних вище негативних явищ вважали за доцільне застосовувати одно- чи багатошарові покриття на основі епоксидної смоли. При цьому важливим є на початковому етапі формувати матрицю з поліпшеними когезійними властивостями. З даною метою необхідно її модифікувати фізично активними добавками. Для цього вводять модифікатори за незначного вмісту, а далі у таку композицію вводять наповнювачі за оптимального вмісту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Авторами [9, 13] доведено, що перспективним є введення у епоксиолімери модифікуючих добавок, які забезпечують активацію процесів зшивання гомогенних композицій при їх полімеризації за підвищених чи звичайних температур. Цікавим є те, що введення у полімер таких добавок за незначного вмісту дозволяє суттєво під-

вищити показники когезійної міцності матеріалів [7–14]. Це безумовно позначається на покращенні їх теплофізичних властивостей. Враховуючи це, проведення досліджень у цьому напрямку є актуальним на сьогодні.

Авторами [9] виявлено, що кількість модифікатора у полімерах повинна бути не великою. Саме при незначному вмісту добавки отримують синергетичний ефект у підвищенні показників як фізичних та механічних, так і теплофізичних властивостей матеріалів. Водночас зауважимо, що важливим є визначення оптимальної концентрації модифікатора, що забезпечує максимальне переведення композиції у стан гель-фракції. У сою чергу це приводить до максимального підвищення показників когезійної міцності КМ.

У даному випадку вважали, що перспективним є застосування у вигляді модифікуючої добавки 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти. Така добавка відзначається наявністю активних груп, здатних взаємодіяти з ланцюгами епоксидної смоли на мікрорівні при структуроутворенні матеріалів. Даний фактор, на наш погляд, забезпечить покращення теплофізичних властивостей розроблених матеріалів для засобів водного транспорту, що передбачає збільшення їх енергоефективності.

Мета роботи – розробити нові модифіковані епоксиласти для підвищення енергоефективності засобів водного транспорту.

Матеріали та методи дослідження

При отриманні КМ вибрали епоксидну смолу (ISO 18280:2010). Для забезпечення необхідних властивостей матеріалів під впливом температури у смолу вводили модифікатор 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонову кислоту (ДАБК), яка має наступну хімічну формулу: $C_{13}H_{12}N_4O_2$. Затверджували композити твердником поліетиленполіаміном (TU 6-05-241-202-78).

У роботі досліджували такі властивості композитів.

Теплостійкість визначали, застосовуючи ISO 75-2.

Додатково аналізували коефіцієнт термічного розширення (КТР) КМ. Для цього використано дилатометр, який забезпечує фіксацію зміни параметрів зразків при підвищенні температури. Це дозволило проводити аналіз зміни параметрів зразків як при підвищенні, так і при зниженні температури. Як наслідок, отримано за допомогою необхідних обчислень досліджувані критерії теплофізичних властивостей розроблених матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Як зазначено вище, при випробовуванні теплофізичних характеристик КМ застосовували комплексний підхід. Зокрема, досліджували зміну відносних деформацій зразків при підвищенні і зниженні температури, надалі обчислювали КТР, показники температури склування і усадки. Паралельно випробовували теплостійкість КМ. У результаті знаходили необхідний вміст модифікатора у матеріалі матриці, що дозволяє формувати композит з максимальними показниками теплофізичних властивостей у комплексі.

Встановлено (рис. 1, табл. 1), що у температурній області 304–324 К наявність добавки у епоксисмоли приводить до зменшення КТР КМ у 2,1–3 рази (тобто, з $6,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для ненаповненої епоксисмоли до $(2,3\text{--}3,2) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для наповнених КМ). При цьому, максимально зменшується КТР (до $2,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) при формуванні композиту, у якого кількість модифікуючої добавки становить 0,25 мас.ч. Надалі при введенні модифікатора понад встановлене значення формуються матеріали із більшими значеннями КТР.

Додатково виявлено (табл. 1), що у температурній області 304–374 К уведення добавки приводить до значного зменшення показників КТР (з $6,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для ненаповненої епоксисмоли до $(2,6\text{--}2,9) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ для розроблених матеріалів). Зауважимо, що показники КТР розроблених матеріалів практично не відрізняються, позаяк різниця у їхніх показниках знаходиться у межах похибки експерименту. Відзначимо, що у даній області температурних досліджень мінімальні значення відзначено для КМ, який містить модифікатор відповідно за вмісту 0,25 мас.ч. ($2,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) і 1,5 мас.ч. ($2,6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

У температурній області 304–424 К (табл. 1) значення КТР знижуються у 1,9–2 разів. Водночас відмічено, що максимальні показники КТР ($5,6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) мають композити, наповнені добавкою за вмісту 0,25–0,5 мас.ч. Також відзначимо, що введення добавки у кількості 1 мас.ч. зумовлює зменшення КТР до значення $5,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Крім того, наповнення епоксидної смоли модифікатором за вмісту 1,5 мас.ч. сприяє формуванню КМ з показником КТР – $4,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

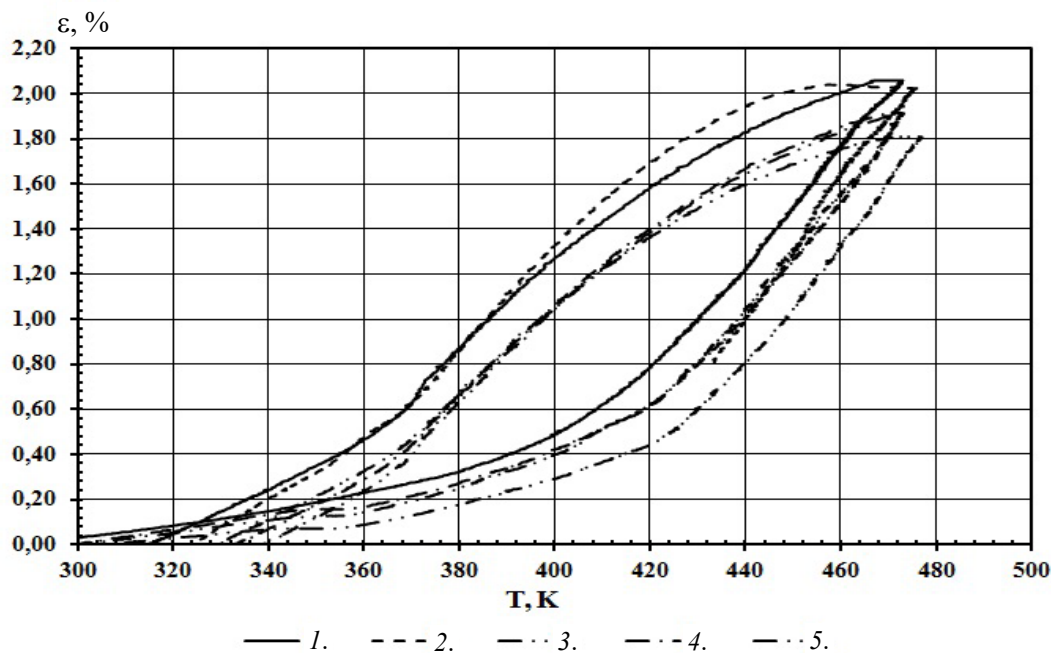


Рис. 1. Залежність деформації зразків під впливом температури:

1 – смола без наповнювача; 2 – смола з модифікатором (0,25 мас.ч.); 3 – смола з модифікатором (0,5 мас.ч.); 4 – смола з модифікатором (1 мас.ч.); 5 – смола з модифікатором (1,5 мас.ч.).

Враховуючи наведене вище встановили, що на етапі впливу незначних температур (304...324 К) найнижчими показниками КТР характеризуються композити з незначною концентрацією ДАБК. При цьому вважали, що за більшого температурного діапазону відбувалось додаткове тверднення композитів. Внаслідок цього на одиницю об'єму матеріалів формуються нові хімічні і фізичні зв'язки між структурними елементами інгредієнтів нововстворених композитів. Це сприяє

зменшенню КТР матеріалів, особливо за кількості ДАБК – 1–1,5 мас.ч.

Крім того відмічено, що КТР розроблених композитів у температурній області 304–474 К майже є однаковим і становить $(10,1\text{--}10,2) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Водночас дані показники є практично однаковими з аналогічним показником, характерним для ненаповненої епоксиматриці ($11 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Таким чином встановили, що у даній температурній області модифікатор не впливає на КТР компози-

тів. Передбачали, що для покращення КТР матеріалів, які експлуатують у даній температурній області, необхідно додатково вводити у полімер мікродобавки.

Порівняно з наведеними вище дослідженнями додатково аналізували показники усадки розроблених композитів. Доведено (рис. 2), що величина усадки ненаповненої епоксимагриці має зна-

чення 0,32 %. Уведення добавки забезпечує зменшення даного показника в середньому до 0,02 %. Отже встановлено, що наявність модифікатора за будь-якого вмісту (у контексті вибраних нами концентрацій) приводить до значного зниження усадки внаслідок структуроутворюючих процесів, які відбуваються при структуроутворенні матеріалів.

Таблиця 1

КТР композитів

Вміст ДАБК, мас.ч.	КТР, $\alpha \times 10^{-5}, K^{-1}$			
	Область фіксації результатів, $\Delta T, K$			
	304–324	304–374	304–424	304–474
0	6,4	6,9	10,0	11,0
0,25	2,4	2,7	5,6	10,2
0,5	2,7	2,9	5,6	10,2
1,0	3,2	2,9	5,3	10,1
1,5	2,7	2,6	4,8	10,1

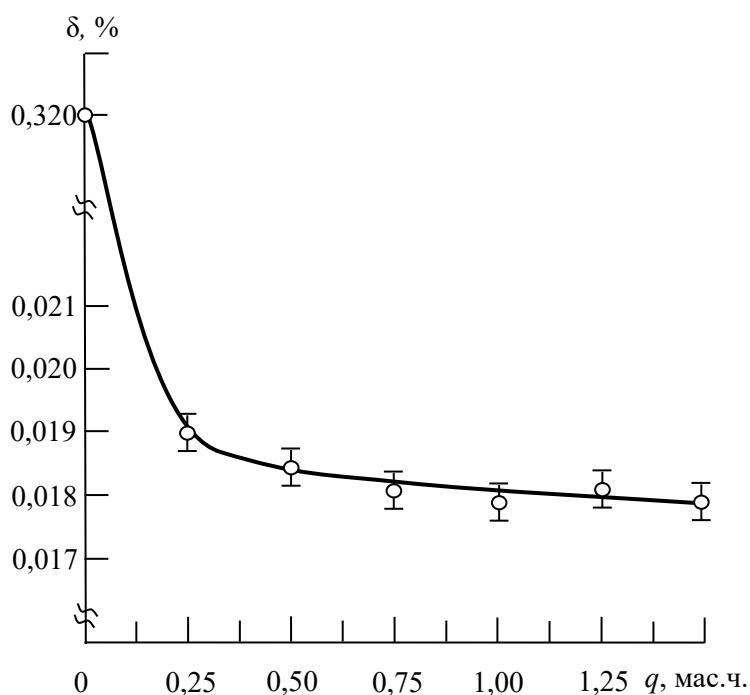


Рис. 2. Динаміка усадки зразків від кількості ДАБК

На основі аналізу зміни деформації зразків при підвищенні і зниженні температури додатково визначали температуру склування (T_l) модифікованих КМ. Виявлено (рис. 3), що T_l ненаповненої епоксимагриці має наступне значення – 327 К. Уведення ДАБК сприяє збільшенню зазначеної вище температури у результаті збільшення когезії композитів за рахунок додаткового зшивання композицій у присутності модифікуючої добавки. Максимальне значення температури склування відмічено для композиту, який наповнений ДАБК за вмісту 0,5 мас.ч. Даний композит має значення $T_l = 347$ К. Цей показник перевищує значення, характерне для ненаповненої епо-

ксимагриці на 20 К. Подальше зростання кількості добавки у КМ не забезпечує підвищення даного показника, що свідчить про недоцільність збільшення вмісту модифікатора у КМ.

Дані результати досліджень аналізували в контексті динаміки теплостійкості матеріалів залежно від концентрації ДАБК. Доведено (рис. 3), що значення теплостійкості ненаповненої матриці становить 342 К. Наявність модифікатора при вмісті 0,25 мас.ч. забезпечує значне підвищення даного показника до 360 К (рис. 3). Подальше зростання вмісту модифікатора до 0,5–2 мас.ч. забезпечує несуттєве зниження теплостійкості матеріалів (356–358 К). Отримані ре-

зультати доводять, що наповнення композитів синтезованою добавкою за гомеопатичного вмісту сприяє перебігу релаксаційних процесів у ма-

теріалах. У сою чергу це забезпечує термостабільну рівновагу таких гомогенних систем, що й підвищує надалі їх теплостійкість.

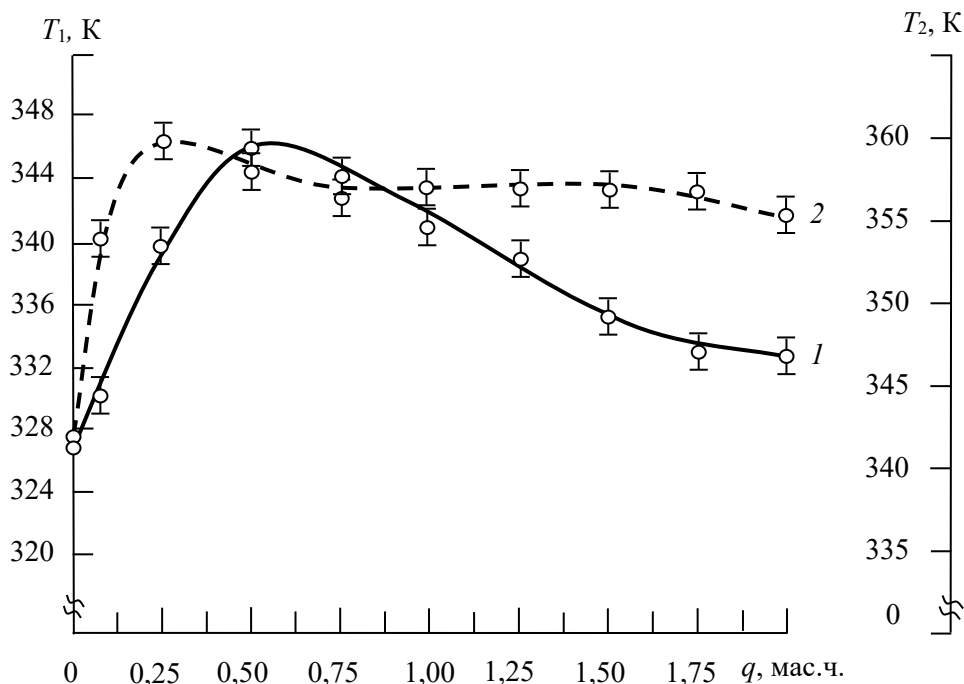


Рис. 3. Теплофізичні властивості КМ залежно від кількості ДБК:
1 – температура склування (T_1); 2 – теплостійкість (T_2)

Таким чином, комплексний аналіз проведених випробувань дозволяє констатувати наступне:

- під час випробувань КТР встановлено оптимальний вміст ДБК у епоксидній смолі, який має значення 1–1,5 мас.ч., і доведено, що такі композити відзначаються мінімальними показниками КТР;

- під час аналізу температури склування виявлено, що найвищі значення мають КМ із модифікатором ДБК у межах 0,5–1 мас.ч.;

- під час випробувань теплостійкості доведено, що найвищими показниками характеризуються КМ із модифікатором за вмісту 0,25 мас.ч.

Виходячи з цього, констатували, що поліпшеними теплофізичними властивостями характеризуються композити з модифікуючою добавкою у межах 0,5–1 мас.ч. Такі матеріали необхідно застосовувати у якості зв'язувача при отриманні покриттів для засобів водного транспорту.

Висновки

1. Встановлено, що для отримання композиційного матеріалу з підвищеними теплофізичними характеристиками у епоксидний полімер необхідно додавати модифікуючу добавку 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонову кислоту при концентрації 0,5–1 мас.ч. у присутності 100 мас.ч. епоксидного олігомеру. Це забезпечує зростання теплостійкості при порівнянні з ненаповненою епоксидматри-

цею з 342 К до 357–359 К, температури склування з 328 К до 344–347 К. Обґрунтовано, що це зумовлено інтенсифікацією релаксаційних процесів у розроблених матеріалах. Також, внаслідок наявності модифікуючої добавки у полімері на одиницю об'єму матеріалів формуються нові хімічні і фізичні зв'язки між структурними елементами інгредієнтів нововстворених композитів.

2. Доведено, що мінімальними значеннями коефіцієнту термічного розширення характеризуються композити, наповнені ДБК за вмісту 1–1,5 мас.ч. У температурній області випробувань – 304–424 К дані композити мають у 2 рази менші показники КТР стосовно ненаповненої матриці. Обґрунтовано, що дані композити необхідно застосовувати як вихідний зв'язувач при подальшому створенні захисних адгезивів для засобів водного транспорту.

У майбутньому заплановано проведення досліджень фізико-механічних властивостей розроблених матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Cho Soo Hyoun, Scott R., Paul V. Self-healing polymer coatings. *Advanced Materials*. 21 (6), 645–649 (2009) doi.org/10.1002/adma.200802008
- [2] Shaffer E. O., McGarry F. J., Lan Hoang. Designing reliable polymer coatings. *Polymer Engineering & Science*. 36 (18), 2375–2381 (1996) doi.org/10.1002/pen.10635

- [3] Momber A., Irmer M., Gluck N. Performance characteristics of protective coatings under low-temperature offshore conditions. Part 1: Experimental set-up and corrosion protection performance, *Cold Reg. Sci. Technol.* 127, 109–114 (2016) DOI:10.1016/j.coldregions.2016.04.
- [4] Diniz F. B., De Andrade G. F., Martins C. R., De Azevedo W.M. A comparative study of epoxy and polyurethane based coatings containing polyaniline-DBSA pigments for corrosion protection on mild steel. *Prog. Org. Coat.* 76 (5), 912–916 (2013) doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.02.010
- [5] Zhou C., Lu X., Xin Z., Liu J., Zhang Y. Hydrophobic benzoxazine-cured epoxy coatings for corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 76, 1178–1183 (2013) DOI:10.1016/j.porgcoat.2013.03.013
- [6] EEXI and CII – ship carbon intensity and rating system. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/eexi.aspx> (access data 24.08.2025)
- [7] Saponov O., Buketov A., Kim B., Vorobiov P., Saponova L. Increasing the Service Life of Marine Transport Using Heat-Resistant Polymer Nanocomposites. *Materials*. 17, 1503 (2024) doi.org/ 10.3390/ma17071503
- [8] Momber A., Irmer M., Gluck N. Performance characteristics of protective coatings under low-temperature offshore conditions. Part 2: Surface status, hoarfrost accretion and mechanical properties, *Cold Reg. Sci. Technol.* 127, 109–114 (2016) DOI:10.1016/j.coldregions.2016.04.
- [9] Buketov A. V., Shulga Yu. M., Fesenko I. P., Bezbakh O. M., and Pastukh O. A. Increasing the Lifetime of Water Transportation Vehicles by Using Multifunctional Composites with a Polymer Matrix, Ultradisperse Diamond, and Discrete Fibrous Filler. *Journal of Superhard Materials*. 46 (1), 40–54 (2024) DOI: 10.3103/S1063457624010027
- [10] Mohan P. A critical review. The modification, properties, and applications of epoxy resins. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 52, 107–125. (2012) doi.org/10.1080/03602559.2012.727057
- [11] Paluvai N. R., Mohanty S., Nayak S. K. Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 53. 1723–1758 (2014) DOI:10.1080/03602559.2014.919658
- [12] Akimov A. V., Buketov A. V., Saponov A. A., Yakushchenko S. V., Smetankin S. A. Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair. *Composites: Mechanics, Computations, Applications*. 10(2), 117–134 (2019) doi: 10.1615/CompMechComputApplIntJ.2018026989
- [13] Brailo M., Buketov A., Yakushchenko S., Vynar V., Kobelnik O. The investigation of tribological properties of epoxy-polyether composite materials for using in the friction units of means of sea transport. *Materials Performance and Characterization*. 7(1), 275–299 (2018) doi:10.1520/MPC20170161/available online atwww.astm.org).
- [14] Buketov A., Saponov O., Brailo M., Saponova A., Sotsenko V. The use of complex additives for the formation of corrosion- and wear-resistant epoxy composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 8183761 (2019) doi.org/10.1155/2019/8183761
- [15] Stukhlyak P. D., Buketov A. V., Panin S. V., Maruschak P. O., Moroz K. M., Poltaranin M. A., Vukherer T., Kornienko L. A., Lyukshin B. A. Structural fracture scales in shock-loaded epoxy composites. *Physical Mesomechanics*. 18 (1), 58–74 (2015) doi.org/10.1134/S1029959915010075

**Букетов А. В., Житник Д. В., Тотосько О. В., Клевцов К. М., Шарко О. В.
УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ
ВНАСЛІДОК ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОСТІЙКИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ**

Полімерні композитні матеріали широко використовуються у водному транспорті у вигляді корозійностійких та зносостійких композитів й захисних покриттів. Водночас, вчені зараз проводять низку досліджень для створення матеріалів з покращеними властивостями, зокрема теплофізичними. Актуальним на теперішній час є наповнення епоксидної матриці модифікуючими добавками. Останні, як правило, фізично та хімічно активні для взаємодії з макромолекулами епоксидної смоли, що дозволяє створювати міцнозшити структуру гомогенної системи під час полімеризації.

Вважалось, що перспективним є використання 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти як модифікуючої добавки. Така добавка характеризується наявністю активних груп, які можуть взаємодіяти з ланцюгами епоксидної смоли на мікрорівні під час структуроутворення матеріалів. Цей фактор забезпечує покращення теплофізичних властивостей розроблених матеріалів для морського й річкового транспорту.

У цій роботі оптимальну концентрацію модифікатора в епоксидній смолі було визначено за критеріями термічних характеристик. Встановлено, що для отримання композитного матеріалу з покращеними теплофізичними властивостями необхідно до епоксидного полімеру в присутності 100 мас.ч. епоксидного олігомеру додавати модифікуючу добавку 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонову кислоту в концентрації 0,5–1,5 мас.ч. Це забезпечує підвищення термостійкості порівняно з ненаповненою епоксидною матрицею з 342 К до 357–359 К, а температури склування з 328 К до 344–347 К. Обґрунтовано, що це пов'язано з інтенсифікацією релаксаційних процесів у розроблених матеріалах. Також, завдяки наявності модифікуючої добавки в полімері на одиницю об'єму матеріалів утворюються нові хімічні та фізичні зв'язки між структурними елементами складових композиту.

Ключові слова: транспорт; композит; властивості; експлуатація; полімер; покриття.

Buketov A., Zhytnyk D., Totosko O., Klevtsov K., Sharko O.
**ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT OF WATER TRANSPORT VEHICLES THROUGH
THE USE OF THERMOSTABLE EPOXY COMPOSITES**

Polymer composite materials are widely used in water transport in the form of corrosion- and wear-resistant composites. At the same time, scientists are currently conducting a range of research to create materials with improved properties, including thermal properties. The filling of the epoxy matrix with modifying additives is of current interest. The latter are usually physically and chemically active to interact with the macromolecules of epoxy resin, which allows for the creation of a strongly cross-linked structure of a homogeneous system during polymerization.

It was believed that the use of 2,4-diaminoazobenzene-4'-carboxylic acid as a modifying additive was promising. Such an additive is characterized by the presence of active groups that can interact with epoxy resin chains at the micro level during the structure formation of materials. This factor ensures the improvement of the thermophysical properties of the developed materials for water transport.

In this work, the optimal concentration of the modifier in epoxy resin was determined according to the criteria of thermal characteristics. It has been established that to obtain a composite material with improved thermal properties, it is necessary to add the modifying additive 2,4-diaminoazobenzene-4'-carboxylic acid at a concentration of 0.5–1.5 % to the epoxy polymer in the presence of 100% of the epoxy oligomer. This ensures an increase in heat resistance compared to the unfilled epoxy matrix from 342 K to 357–359 K, and the glass transition temperature from 328 K to 344–347 K. It is substantiated that this is due to the intensification of relaxation processes in the developed materials. Also, due to the presence of a modifying additive in the polymer, new chemical and physical bonds between the structural elements of the composite ingredients are formed per unit volume of materials.

Keywords: transport, composite, properties, operation, polymer, coating.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2025 р.

Прийнято до друку 10.09.2025 р.