

УДК 667.64:678.026

DOI: 10.18372/0370-2197.4(93).16277

С. О. СМЕТАНКІН

*Херсонська державна морська академія***РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

*Розроблено, досліджено та описано склад захисних покриттів різного функціонального призначення з покращеними експлуатаційними характеристиками для підвищення надійності деталей засобів транспорту. В якості основного полімерного зв'язувача використовували діановий олігомер «ЕД – 20» з твердником поліетиленполіамін (ПЕПА), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Регулювання властивостей епоксидної матриці здійснювали шляхом хімічної, фізико-хімічної та фізичної модифікації. Хімічну модифікацію епоксидного зв'язувача проводили за допомогою синтезованого модифікатора 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенілен) біс (N, N – діетилдітіокарбамату) (СФЕК). У вигляді фізико-хімічної модифікуючої добавки застосовували технічний вуглець (нанодисперсному пігментну сажу) CARBON BLACK марки RowCarbon 2419G. У результаті проведених у роботі досліджень адгезійних, фізико-механічних, теплофізичних, діелектричних властивостей та електропровідності композитів розроблено ряд епоксикомпозитних матеріалів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей на основі алюмінієвих та низьковуглецевих сталей. Отримано струморозсіювальне й антистатичне захисне покриття з полііонними механічними властивостями. Нові композити і технології їх формування впроваджено на судні «Triumph IV» судновласної компанії «Avrey Commerce Ltd» (Сейшельські острови) при його ремонті ТОВ «Сігран» на території Херсонського суднобудівного судноремонтного заводу. Це забезпечило: підвищення корозійної і гідроабразивної стійкості деталей технологічного устаткування у 1,9...2,4 разів, зменшення періодичності відновлення дефектних ділянок деталей у 1,3...1,6 разів.*

**Ключові слова:** епоксидний олігомер ЕД-20, модифікатор, нанодисперсна сажка, захисне покриття, впровадження, технологія формування.

**Постановка проблеми.** На сучасному етапі розвитку галузі транспортних технологій актуальною проблемою залишається підвищення ресурсу роботи машин і механізмів. Оскільки у процесі експлуатації технологічного устаткування діють механічні навантаження різного характеру, агресивні середовища, високі та низькі температури, що в сукупності суттєво знижують міжремонтний ресурс експлуатації та економічність робочого обладнання. У багатьох сферах промислового виробництва, зокрема у машинно- та суднобудуванні для ремонтних заходів й підтримки різноманітних пристроїв в робочому стані активно використовують інноваційні полімерні композити [1, 3]. Відомо, що такі матеріали, порівняно з традиційними металами та сплавами, відзначаються підвищеними показниками когезійної, адгезійної міцності, незначними залишковими напруженнями та технологічністю нанесення на пошкоджені ділянки обладнання [4, 5]. Окремо слід звернути увагу на відносну дешевизну та доступність таких матеріалів, обумовлену не складним технологічним процесом їх виготовлення й достатньо розвинутою сировинною базою по всьому світу. Це, у свою чергу, дає можливість не лише підвищити експлуатаційні характеристики

технічних засобів, а й забезпечити значну економічність в процесі ремонтних робіт.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В той же час, полімерні зв'язувачі в «чистому» вигляді вже не відповідають вимогам багатьох сучасних областей виробництва, що динамічно розвиваються та потребують обов'язкового поєднання, в розроблених матеріалах, відразу кількох потрібних характеристик (механічних, термічних, електрофізичних) [1, 6, 7]. Тому, для досягнення даної мети використовують хімічні, фізичні та фізико-хімічні методи модифікації полімерних зв'язувачів, які у достатній мірі реалізують поставлені завдання і дають необхідний результат. Серед широкого спектру полімерних КМ, що використовують у якості основи для модифікації слід виділити епоксидний олігомер, котрий характеризується реакційноздатними епоксидними і гідроксильними групами. Така будова дає змогу активно вступати в хімічні реакції з багатьма твердниками та модифікуючими добавками різної природи [8-11]. Це суттєво збільшує варіативність в процесі обрання наповнювачів того чи іншого хімічного складу, що як правило, забезпечують в таких композиціях основні конструктивні і функціональні властивості КМ.

Отже, розроблення полімерних композитних матеріалів з поліпшеними і наперед заданими функціональними властивостями є актуальним завданням сучасного матеріалознавства і потребує подальших досліджень в цьому напрямку.

**Мета роботи** – розробити захисні покриття різного функціонального призначення з покращеними експлуатаційними характеристиками для підвищення надійності деталей засобів транспорту.

**Матеріали та методика дослідження.** Дослідження проводили з використанням у вигляді основного компонента для матриці епоксидного діанового олігомеру «ЕД – 20» (ГОСТ 10587-84), що містить 21% епоксидних груп [12, 14].

Регулювання властивостей зв'язувача здійснювали шляхом хімічної, фізико-хімічної та фізичної модифікації. Хімічну модифікацію епоксидного зв'язувача проводили за допомогою синтезованого модифікатора 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенілен) біс (N, N –діетилдітіокарбамату) (СФЕК), який містить різноманітні функціональні групи, а також вуглець і сірку, що здатні взаємодіяти з епоксидними або вторинними гідроксильними групами олігомеру. Модифікатор вводили в кількості від 0,10 до 2,00 мас.ч.

У вигляді фізико-хімічної модифікуючої добавки застосовували технічний вуглець (нанодисперсному пігментну сажу) CARBON BLACK марки PowCarbon 2419G (CAS NO.: 1333-86-4, EINECS NO.: 215-609-9), яка вироблена компанією «Black Diamond Material Science Co., Ltd. Розмір частинок порошку визначено виробником за допомогою методу електронної мікроскопії і становить  $24 \pm 2$  нм. Питома площа поверхні частинок становить  $145 \pm 20$  м<sup>2</sup>/г. Наповнювач вводили в кількості від 1,00 до 25,00 мас.ч.

Для зшивання епоксидних композицій використовували твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Твердник вводили у композицію в кількості 10 мас.ч. від епоксидного олігомера ЕД-20.

**Результати дослідження та їх обговорення.** У результаті проведених у роботі досліджень адгезійних, фізико-механічних, теплофізичних, діелектричних властивостей та електропровідності композитів розроблено захисні покриття різного функціонального призначення, склад яких наведено нижче.

**Покриття № 1.** Основне призначення – підвищення експлуатаційних характеристик деталей на основі низьковуглецевих сталей. Склад захисного покриття, *q*, мас.ч.:

- епоксидний діановий олігомер ЕД-20 100
- твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) 10
- модифікатор 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенілен) біс (N, N – диетилдитіокарбамат), C<sub>22</sub>H<sub>28</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 1,5

Основні властивості розробленого покриття наведено у табл. 1.

Таблиця 1

#### Властивості покриття

Властивість	Показник
Адгезійна міцність при відриві, $\sigma_a$ , МПа до сталеві основи марки Ст 3	41,9
Адгезійна міцність при зсуві, $\tau$ , МПа до сталеві основи марки Ст 3	8,6
Залишкові напруження, $\sigma_3$ , МПа	2,2
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{3z}$ , МПа	65
Модуль пружності при згинанні, <i>E</i> , ГПа	3,4
Ударна в'язкість, <i>W</i> , кДж/м <sup>2</sup>	11,4
Теплостійкість, <i>T</i> , К	359
Час повної полімеризації, $\tau$ , год	72...80

**Покриття № 2.** Основне призначення – підвищення експлуатаційних характеристик деталей на основі алюмінієвих сплавів. Склад захисного покриття, *q*, мас.ч.:

- епоксидний діановий олігомер ЕД-20 100
- твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) 10
- модифікатор 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенілен) біс (N, N – диетилдитіокарбамат), C<sub>22</sub>H<sub>28</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 1,75

Основні властивості розробленого покриття наведено у табл. 2.

Таблиця 2

#### Властивості покриття

Властивість	Показник
Адгезійна міцність, $\sigma_a$ , МПа до основи з алюмінієвих сплавів марки Д16 і марки АМг5	54,1...55,5
Залишкові напруження $\sigma_3$ , МПа	2,2
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{3z}$ , МПа	52
Модуль пружності при згинанні, <i>E</i> , ГПа	3,6
Ударна в'язкість, <i>W</i> , кДж/м <sup>2</sup>	9,7
Теплостійкість, <i>T</i> , К	358
Час повної полімеризації, $\tau$ , год	72...80

**Покриття № 3.** Основне призначення – підвищення експлуатаційних характеристик деталей на основі низьковуглецевих сталей та алюмінієвих сплавів. Зазначимо, що дане покриття є двошаровим, причому у вигляді адгезійного шару для низьковуглецевих сталей використовують покриття № 1, а

для алюмінієвих сплавів – покриття № 2. Тоді у вигляді поверхневого шару в обох випадках використовують матеріал наступного складу,  $q$ , мас.ч.:

- епоксидний діановий олігомер ЕД-20 100
- твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) 10
- нанодисперсна сажа CARBON BLACK марки PowCarbon 2419G 1,0

Основні властивості розробленого покриття наведено у табл. 3.

Таблиця 3

#### Властивості покриття

Властивість	Показник
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{32}$ , МПа	75,1
Модуль пружності при згинанні, $E$ , ГПа	2,1
Ударна в'язкість, $W$ , кДж/м <sup>2</sup>	10,3
Теплостійкість, $T$ , К	358
Час повної полімеризації, $\tau$ , год	72...75

**Покриття № 4.** Антистатичне покриття з поліпшеними механічними властивостями. Основне призначення – захист палуб, палубних механізмів та палубних гелікоптерних майданчиків суден, призначених для перевезення займистих рідин та газів (танкерів); також доцільно використовувати у вигляді антистатичного покриття підлоги в серверних приміщеннях, колцентрах та інших приміщень з чутливим електронним обладнанням.

Склад захисного покриття,  $q$ , мас.ч.:

- епоксидний діановий олігомер ЕД-20 100
- твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) 10
- модифікатор 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенолен) біс (N, N – диетилдитіокарбамат), C<sub>22</sub>H<sub>28</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 1,5
- нанодисперсна сажа CARBON BLACK марки PowCarbon 2419G 5,0

Основні властивості розробленого покриття наведено у табл. 4.

Таблиця 4

#### Властивості покриття

Властивість	Показник
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{32}$ , МПа	67,3
Модуль пружності при згинанні, $E$ , ГПа	1,7
Ударна в'язкість, $W$ , кДж/м <sup>2</sup>	8,4
Діелектрична проникність, $\epsilon'$ (від 100 до 100 кГц)	540...640
Електропровідність, $\sigma'$ , См/см (від 100 до 100 кГц)	3,56×10 <sup>-9</sup> ...7,87×10 <sup>-7</sup>
Час повної полімеризації, $\tau$ , год	72...75

**Покриття № 5.** Струмозрозсіювальне покриття. Основне призначення – покриття трубопроводів та устаткування для перекачування рідин, ємностей для зберігання займистих рідин та газів. Додатково покриття (в тому числі і для внутрішніх поверхонь) доцільно використовувати при формуванні пластикових корпусів, захисту радіочутливого радіоелектронного обладнання та облицювальних панелей для захисту від електромагнітного випромінювання чутливих електронних пристроїв та персоналу.

Склад захисного покриття,  $q$ , мас.ч.:

- епоксидний діановий олігомер ЕД-20 100
- твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) 10

- модифікатор 4,4 – сульфонілбіс (4,1 – фенілен) біс  
(N, N – диетилдитіокарбамат),  $C_{22}H_{28}N_2O_2S$  1,5
  - нанодисперсна сажа CARBON BLACK  
марки PowCarbon 2419G 25,0
- Основні властивості розробленого покриття наведено у табл. 5.

Таблиця 5

## Властивості покриття

Властивість	Показник
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{32}$ , МПа	31,4
Модуль пружності при згинанні, $E$ , ГПа	3,0
Ударна в'язкість, $W$ , кДж/м <sup>2</sup>	5,6
Діелектрична проникність, $\epsilon'$ (від 100 до 100 кГц)	10400...12600
Електропровідність, $\sigma'$ , См/см (від 100 до 100 кГц)	$7,37 \times 10^{-8} \dots 2,23 \times 10^{-5}$
Час повної полімеризації, $\tau$ , год	65...78

Технологія формування епоксидних композитів полягає у наступному. На початковому етапі необхідно підігрівати епоксидну смолу до температури  $T = 353 \pm 2$  К, витримувати її у тепловому полі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв. Далі гідродинамічно суміщають смолу з модифікатором і нанодисперсним наповнювачем впродовж  $\tau = 10 \pm 0,1$  хв, після чого проводять ультразвукове оброблення (УЗО) композиції впродовж  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв. Після охолодження суміші до кімнатної температури ( $\tau = 60 \pm 5$  хв) вводять твердник і перемішують композицію впродовж  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Таким чином формують композиції для адгезійного і поверхневого шарів.

Нанесення захисних покриттів на деталі технологічного устаткування виконують методом пневматичного розпилення адгезиву з товщиною кожного шару покриття – 0,10...0,15 мм. Поверхневий шар наносять через 1,5...2,0 год після полімеризації адгезійного шару за кімнатної температури.

Результати порівняльних випробувань властивостей розроблених і відомих матеріалів та захисних покриттів на їх основі свідчать про високі експлуатаційні характеристики та доцільність використання нових композитів для надійності технологічного устаткування (табл. 6).

Зазначимо, що розроблені композитні матеріали, покриття і технологію їх формування та нанесення впроваджено на судні «Triumph IV» судновласної компанії «Avrey Commerce Ltd» (Сейшельські острови) при його ремонті ТОВ «Сігран» на території Херсонського суднобудівного судноремонтного заводу ім. Комінтерну, що дозволило відмовитись від використання традиційних і відомих покриттів. Це забезпечило покращення експлуатаційних характеристик устаткування, а в подальшому – передбачає отримання значного економічного ефекту.

**Висновки.** Високу ефективність застосування розроблених матеріалів підтверджено випробуваннями у виробничих умовах з метою підвищення показників експлуатаційних характеристик деталей технологічного устаткування, які експлуатують в умовах впливу агресивних середовищ та динамічних навантажень.

Нові композити і технологію їх формування впроваджено на судні «Triumph IV» судновласної компанії «Avrey Commerce Ltd» (Сейшельські острови) при його ремонті ТОВ «Сігран» на території Херсонського суднобудівного судноремонтного заводу, що забезпечило: підвищення корозійної і гідроабразивної стійкості деталей

технологічного устаткування у 1,9...2,4 разів, зменшення періодичності відновлення дефектних ділянок деталей у 1,3...1,6 разів.

Таблиця 6

## Порівняльні показники властивостей розроблених і відомих покриттів

Показник	КМ 1	КМ 2	КМ 3	КМ 4	КМ 5	П 1	П 2
Адгезійна міцність, $\sigma_a$ , МПа	42	53...55	–	–	–	8	2,5
Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{32}$ , МПа	65	52	75	67	31	24	–
Модуль пружності при згинанні, $E$ , ГПа	3,4	3,6	2,1	1,7	3,0	0,6	0,2
Ударна в'язкість, $W$ , кДж/м <sup>2</sup>	11,4	9,7	10,3	8,4	5,6	–	–
Теплостійкість, $T$ , К	359	358	358	–	–	–	–
Діелектрична проникність, $\epsilon'$ (від 100 до 100 кГц)	–	–	–	540 ... 640	10400 ... 12600	320	450
Електропровідність, $\sigma'$ , См/см (від 100 до 100 кГц)	-	-	-	$3,6 \times 10^{-9}$ ... $7,9 \times 10^{-7}$	$7,4 \times 10^{-8}$ ... $2,2 \times 10^{-5}$	2,2... $2,4 \times 10^{-5}$	1,3... $1,5 \times 10^{-4}$
Час повної полімериз., $\tau$ , год	72...80	72...80	72...75	72...75	65...68	9	-

Примітка. КМ 1...КМ 5 – розроблені матеріали;

П 1 – антистатичне покриття ГУДЛАЙН PU-11 AS (ТУ 20.30.22-072-12288779-2017);

П 2 – струморозсіювальне антистатичне покриття MIPOLAM ACCORD EL7 (сертифікат відповідності № С-FR.ПБ04.В.00749)

## Список літератури

1. Колосов О.С., Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Івцький І.І., Куриленко В.М. Матеріали та технології для одержання функціональних полімерних композиційних матеріалів. Наукові нотатки. 2017. № 58. С. 184-192.

2. Красильникова О.А., Кольчурин А.И. Применение полимерных конструкционных материалов в судостроении. European research. 2016. №. 5 (16). С. 22-24.

3. Saprionov O., Buketov A., Saprionova A., Sotsenko V., Brailo M., Yakushchenko S., Maruschak P., Smetankin S., Kulinich A., Kulinich V., Poberezhna L. The Influence of the Content and Nature of the Dispersive Filler at the Formation of Coatings for Protection of the Equipment of River and Sea Transport. SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2020. Vol. 13(1). pp. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4271/05-13-01-0006>.

4. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Добротвор І.Г. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями. Тернопіль: Збруч, 2008. 208с.

5. Сапронов О.О., Рожков О.С., Лещенко О.В., Голотенко О.С. Дослідження адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, наповнених нанотрубками. Науковий вісник ХДМА. 2014. 2(11). С. 197-202.

6. Phua, J. L., Teh, P. L., Yeoh, C. K., & Voon, C. H. Functionalized carbon black in epoxy composites: effect of single- and dual-matrix systems. 2021. *Polymer Bulletin*. doi:10.1007/s00289-021-03775-x

7. Кулініч В.Г. Адгезійні та фізико-механічні властивості наповнених полістиролом «Оазис» полімерних композитних матеріалів для транспортної техніки. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. №2 (23). С. 80-91.

8. Savchuk P., Kashytskyi V., Malets V., Matrunchyk D, Kushniruk A. Influence of physical fields on functional properties of polymeric nanocomposites. *International Conference on Actual Problems of Engineering Mechanics*. Odessa. 2019. 968:176-182.

9. Iurzhenko M., Mamunya Y., Seytre G., Boiteux G., Lebedev E. The anomalous behavior of physical-chemical parameters during polymerization of organic-inorganic polymer systems based on reactive oligomers, *E-Polymers*. 2011.11(1): 1-8.

10. Mostovoy, A.S., Nurtazina, A.S., Burmistrov, I.N., Kadykova, Y.A.: Effect of Finely Dispersed Chromite on the Physicochemical and Mechanical Properties of Modified Epoxy Composites. *Russ. J. Appl. Chem.* 91. 2018. 1758–1766. <https://doi.org/10.1134/S1070427218110046>

11. Panarin, V.Y., Svavil'nyy, M.Y., Khomynych, A.I., Kindrachuk, M. V, Kornienko, A.O.: Creation of a Diffusion Barrier at the Interphase Surface of Composite Coatings Reinforced with Carbon Nanotubes. *J. Nano-and Electron*. 2017. Phys. 9.

12. Сметанкін С.О., Нігалатій В.Д., Шарко О.В., Наговський Д.А., Скирденко О.І. Модифіковані епоксидні композити для підвищення надійності і експлуатації та якості ремонту транспортної техніки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2015. №4(55). С. 203–208.

13. Букетов А.В., Кулініч А.Г., Гусев В.М., Сметанкін С.О., Яцюк В.М. Дослідження адгезійних властивостей модифікованих 4-амінобензойною кислотою полімерних композитних матеріалів. *Наукові нотатки*. 2018. № 63. С. 34-39.

14. Buketov A., Smetankin S., Lysenkov E., Yurenin K., Akimov O., Yakushchenko S., Lysenkova I. Electrophysical Properties of Epoxy Composite Materials Filled with Carbon Black Nanopowder. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020, Article ID 6361485, 7 pages. DOI: 10.1155/2020/6361485.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2021

**Сметанкін Сергій Олексійович** – PhD, доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, тел.050-95-66-361, e-mail: rabota.hdma.10@gmail.com.

S. A. SMETANKIN

## THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF PROTECTIVE EPOXY COMPOSITE COATINGS FOR VARIOUS FUNCTIONAL PURPOSES

The composition of protective coatings for various functional purposes with improved operational characteristics for improving of the vehicle part's reliability has been developed, investigated and described. Diane oligomer "ED - 20" with polyethylenepolyamine (PEPA) hardener, which allows materials to be cured at room temperatures, was used as the main polymer binder. The properties of epoxy matrix were amended by chemical, physical chemical, and physical modification. Chemical modification of the epoxy binder was performed by usage of the synthesized modifier 4,4 - sulfonylbis (4,1 - phenylene) bis (N, N - diethyldithiocarbamate) (SFEC). Carbon black (nanodispersed pigment black) CARBON BLACK PowCarbon 2419G was used as a physical chemical modifying additive. As a result of the studies carried out in the work on the adhesive, physical mechanical, thermal physical, dielectric properties and electrical conductivity of composites, a number of epoxy-composite materials have been developed for improving of the river and sea transport parts' performance characteristics based on aluminum and low-carbon steels. A current spreading and antistatic protective coating with improved mechanical properties was received. New composites and the technology, based on their formation were introduced on the vessel "Triumph IV" of the ship-owning company "Avrey Commerce Ltd (Seychelles)" during its repair by Sigran LLC on the territory of the Kherson shipyard. This provided an increasing of the technological equipment's parts' corrosion and water-abrasive resistance by 1,9...2,4 times, a decrease in the frequency of restoration of defective parts of parts by 1,3...1,6 times.

**Key words:** epoxy oligomer ED-20, modifier, nanodispersed carbon soot, protective coating, implementation, formation technology.

### References

1. Kolosov O.E., Sivec'kij V.I., Sokol's'kij O.L., Ivic'kij I.I., Kurilenko V.M. Materiali ta tekhnologii dlya oderzhannya funkcional'nih polimernih kompozicijnih materialiv. Naukovi notatki. 2017. № 58. S. 184-192.
2. Krasil'nikova O.A., Kol'churin A.I. Primenenie polimernyh konstrukcionnyh materialov v sudostroenii. European research. 2016. №. 5 (16). S. 22-24.
3. Sapronov O., Buketov A., Sapronova A., Sotsenko V., Brailo M., Yakushchenko S., Maruschak P., Smetankin S., Kulinich A., Kulinich V., Poberezhna L. The Influence of the Content and Nature of the Dispersive Filler at the Formation of Coatings for Protection of the Equipment of River and Sea Transport. SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2020. Vol. 13(1). pp. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4271/05-13-01-0006>.
4. Stuhlyak P.D., Buketov A.V., Dobrotvor I.G. Epoksikompozitni materialy, modifikovani energetichnymi polyami. Ternopil': Zbruch, 2008. 208s.
5. Sapronov O.O., Rozhkov O.S., Leshchenko O.V., Golotenko O.S. Doslidzhennya adhezijnih i fiziko-mekhanichnih vlastivostej epoksikompozitiv, napovnenih nanotrubbkami. Naukovij visnik HDMA. 2014. 2(11). S. 197-202.
6. Phua, J. L., Teh, P. L., Yeoh, C. K., & Voon, C. H. Functionalized carbon black in epoxy composites: effect of single- and dual-matrix systems. 2021. Polymer Bulletin. doi:10.1007/s00289-021-03775-x
7. Kulinich V.G. Adhezijni ta fiziko-mekhanichni vlastivosti napovnenih polistirolom «Oazis» polimernih kompozitnih materialiv dlya transportnoi tekhniki. Naukovij visnik Hersons'koï derzhavnoi morskoi akademii. 2020. №2 (23). S. 80-91.
8. Savchuk P., Kashytskyi V., Malets V., Matrunchyk D, Kushniruk A. Influence of physical fields on functional properties of polymeric nanocomposites. International Conference on Actual Problems of Engineering Mechanics. Odessa. 2019. 968:176-182.



---

9. Iurzenko M., Mamunya Y., Seytre G., Boiteux G., Lebedev E. The anomalous behavior of physical-chemical parameters during polymerization of organic-inorganic polymer systems based on reactive oligomers, *E-Polymers*. 2011.11(1): 1-8.

10. Mostovoy, A.S., Nurtazina, A.S., Burmistrov, I.N., Kadykova, Y.A.: Effect of Finely Dispersed Chromite on the Physicochemical and Mechanical Properties of Modified Epoxy Composites. *Russ. J. Appl. Chem.* 91. 2018. 1758–1766. <https://doi.org/10.1134/S1070427218110046>

11. Panarin, V.Y., Svavil'nyy, M.Y., Khominych, A.I., Kindrachuk, M. V, Kornienko, A.O.: Creation of a Diffusion Barrier at the Interphase Surface of Composite Coatings Reinforced with Carbon Nanotubes. *J. Nano-and Electron.* 2017. Phys. 9.

12. Smetankin S.O., Nigalatij V.D., Sharko O.V., Nagovs'kij D.A., Skirdenko O.I. Modifikovani epoksidni kompoziti dlya pidvishchennya nadijnosti i ekspluatatsii ta yakosti remontu transportnoi tekhniki. *Visnik Hersons'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu*. 2015. №4(55). S. 203–208.

13. Buketov A.V., Kulinich A.G., Gusev V.M., Smetankin S.O., Yacyuk V.M. Doslidzhennya adgezijnih vlastivostej modifikovanih 4-aminobenzojnoyu kislotoyu polimernih kompozitnih materialiv. *Naukovi notatki*. 2018. № 63. S. 34-39.

14. Buketov A., Smetankin S., Lysenkov E., Yurenin K., Akimov O., Yakushchenko S., Lysenkova I. Electrophysical Properties of Epoxy Composite Materials Filled with Carbon Black Nanopowder. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020, Article ID 6361485, 7 pages. DOI: 10.1155/2020/6361485.