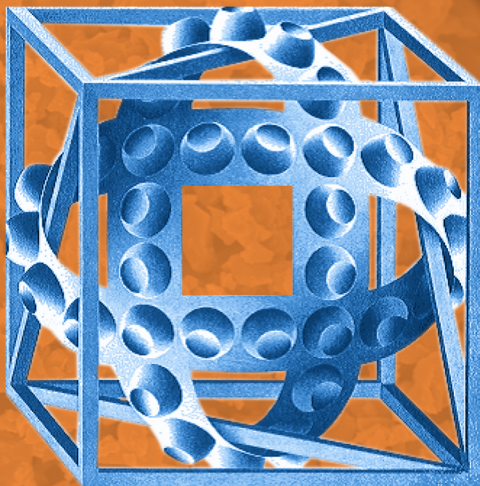




А.В. Букетов, С.О. Сметанкін, В.Л. Алексенко,  
К.Ю. Юренін, В.В. Соценко

**БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕПОКСИДНІ  
НАНОКОМПОЗИТИ З ПОЛІПШЕНИМИ  
ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

**Монографія**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Херсонська державна морська академія

**БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕПОКСИДНІ  
НАНОКОМПОЗИТИ З ПОЛПШЕНИМИ  
ДИЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Монографія

Херсон  
ХДМА  
2021

Рецензенти:

*П.О. Марущак* – доктор технічних наук, професор,  
проректор з наукової роботи Тернопільського національного  
технічного університету імені Івана Пулюя;

*Е.А. Лисенков* – доктор фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем  
Чорноморського національного університету імені Петра Могили;

*О.О. Сапронов* – доктор технічних наук, доцент,  
доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії  
Херсонської державної морської академії

*Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради  
Херсонської державної морської академії  
(протокол № 4 від 26 грудня 2020 року)*

**Багатофункціональні** епоксидні нанокompозити з поліпшеними  
Б 14 діелектричними властивостями для підвищення експлуатаційних характеристик  
транспортних засобів: монографія / Букетов А.В., Сметанкін С.О., Алексенко В.Л.,  
Юренін К.Ю., Соценко В.В. – Херсон : ХДМА, 2021. – 220 с.  
ISBN 978-966-2245-68-4

У монографії розглянуто та наведено необхідні експлуатаційні й технологічні характеристики, якими мають відзначатися полімерні зв'язувачі (матриця), що використовують при виготовленні захисних покриттів багатофункціонального призначення. Проведено аналіз існуючих полімерних матриць різної природи та складу. Проаналізовано основні напрямки підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів шляхом хімічної, фізичної та фізико-хімічної модифікації епоксидного зв'язувача, що дозволяє суттєво впливати на структуру композитів та змінювати їх властивості. Обґрунтовано вибір модифікатора та нанонаповнювача для формування композитних матеріалів з поліпшеними діелектричними властивостями.

Досліджено особливості впливу технічного вуглецю (нанодисперсної пігментної сажі) CARBON BLACK марки PowCarbon 2419G з дисперсністю  $24 \pm 2$  нм на реологічні, фізико-механічні, тепло-, діелектричні властивості розроблених композитів та оптимізовано склад модифікованих сажонаповнених композитних матеріалів. На основі проведених експериментів і отриманих результатів створено нові композитні матеріали і покриття на їх основі з прогнозованими фізико-механічними та електрофізичними властивостями для збільшення ресурсу роботи транспортних засобів.

Монографія призначена для широкого кола науковців, інженерно-технічних працівників і аспірантів, які займаються формуванням, дослідженням та практичним застосуванням епоксикомпозитних матеріалів, зокрема для відновлення елементів засобів транспорту, а також для студентів відповідних спеціальностей.

УДК 66.094.39:678.686:656

ISBN 978-966-2245-68-4

© Букетов А.В., Сметанкін С.О.,  
Алексенко В.Л., Юренін К.Ю.,  
Соценко В.В., 2021  
© ХДМА, 2021

## ЗМІСТ

Передмова.....	5
Перелік умовних скорочень.....	7
<b>Розділ 1. Літературний огляд.....</b>	<b>8</b>
1.1. Вибір зв'язувача для полімерної матриці.....	8
1.2. Методи модифікації епоксидного зв'язувача.....	23
1.3. Фізико-хімічна модифікація епоксидного зв'язувача при створенні композитних матеріалів.....	29
<b>Розділ 2. Властивості та структура модифікованих епоксикомпозитів.....</b>	<b>38</b>
2.1. Вплив технології формування на адгезійні властивості і залишкові напруження вихідної і модифікованої епоксидної матриці.....	39
2.2. Визначення оптимальної кількості модифікатора при формуванні епоксидної матриці шляхом гідродинамічного суміщення компонентів за допомогою ультразвукової обробки.....	52
2.3. Вплив модифікатора на структуру і механічні властивості епоксидної матриці.....	64
2.4. Вплив температури на структуру і теплофізичні властивості модифікованих епоксидних композитів.....	72
2.5. Вплив модифікатора на енергію активації термічної деструкції епоксикомпозитів.....	87
2.6. Розробка автоматизованого модульного дилатометра з вертикальним розташуванням камер.....	97
<b>Розділ 3. Дослідження властивостей наповнених технічним нановуглецем епоксидних композитних матеріалів.....</b>	<b>107</b>
3.1. Дослідження реологічних властивостей сажонаповнених епоксидних нанокompозитів.....	110
3.2. Фізико-механічні властивості наповнених нанодисперсною сажею епоксидних композитів, сформованих способом механічного суміщення....	121
3.3. Фізико-механічні властивості наповнених нанодисперсною сажею епоксидних композитів, сформованих способом ультразвукового гідродинамічного суміщення.....	136

3.4. Теплофізичні властивості наповнених нанодисперсною сажею епоксидних композитів.....	144
3.5. Електрофізичні властивості наповнених нанодисперсною сажею епоксидних композитних матеріалів.....	156
<b>Розділ 4. Розроблення епоксидних нанокompозитів для захисних покриттів з підвищеними діелектричними та експлуатаційними характеристиками.....</b>	<b>168</b>
4.1. Оптимізація інгредієнтів при розробці захисних полімерних композитних покриттів багатофункціонального призначення.....	168
4.2. Електрофізичні властивості системи «епоксидна матриця – модифікатор – наносажа».....	184
4.3. Діелектричні властивості системи «епоксидна матриця – модифікатор – наносажа».....	190
4.4. Розробка і впровадження захисних покриттів різного функціонального призначення.....	193
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>199</b>

## ПЕРЕДМОВА

Полімеркомпозитні матеріали та захисні покриття на їх основі знаходять широке застосування у різних галузях промисловості в Україні та розвинутих країнах світу. Можливість створення багатофункціональних матеріалів з наперед заданими властивостями, які здатні значно знизити споживання металів і сплавів, зменшити масу конструкційних виробів, збільшити надійність деталей і підвищити їх довговічність, лише збільшує зацікавленість щодо інтенсивного дослідження й створення нових полімерних композитів. Одними із ефективних методів вирішення даного завдання є хімічна, фізична та фізико-хімічна модифікація полімерного зв'язувача, що передбачає створення матриці з необхідними властивостями, яка містить модифікатор за гомеопатичного вмісту. Значний вклад в теорію і практику розробки захисних композитних покриттів на основі епоксидних смол й вищезазначених методів їх модифікації внесли: Ю.С. Ліпатов, П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, О.О. Сапронов (Україна), М.А. Полтаранін, К.М. Мороз, В.Е. Мурадян, Е.А. Соколов (Росія), А.С. Taylor (Великобританія), Valéria D. Ramos, Vera L.P. Soares (Бразилія), Subhra Gantayat (Індія), Teng Ko Chen (Тайвань), Martin Lahn Henriksen (Данія).

Особливу увагу приділяють електрофізичним властивостям таких матеріалів. Традиційно, полімери вважаються електрично ізоляційними матеріалами через низьку концентрацію вільних носіїв заряду. Однак, електричні характеристики полімерів можуть бути поліпшені шляхом введення до їх складу електропровідного наповнювача. Отримані таким чином електропровідні полімерні композити поєднують поліпшені механічні та унікальні електрофізичні властивості завдяки провідним часткам введеної добавки. Значних успіхів у дослідженні та розробці електропровідних композитних матеріалів досягли наступні вчені: Є.П. Мамуня, Є.В. Лебедев, М.В. Юрженко, Е.А. Лисенков (Україна), Qiyan Zhang, Bao-Hua Guo (Китай), J. Macutkevici (Литва), P. Kuzhir (Білорусь), A. Celzard, V. Fierro (Франція), E. Stefanutti, A. Cataldo (Італія) та ін. Полімерні композити, які містять електропровідний наповнювач мають великий потенціал для застосування в різних областях, наприклад, при створенні сенсорів, антистатичному екрануванні, захисті від електромагнітного

випромінювання, а також в електроніці, аерокосмічній промисловості та транспортній галузі.

На сьогодні перспективним є створення композитних матеріалів з поліпшеними електрофізичними властивостями на основі епоксидних зв'язувачів, що містять порошкоподібні вуглецевмісні наночастки. Для цих цілей використовують різні модифікації вуглецю: аморфний вуглець, графіт, вуглецеві нанотрубки та ін. Серед них значний інтерес викликає технічний вуглець (сажа), який характеризується різною структурою, розмірами і фізичними властивостями часток. Тому вплив, який вони чинять на електричні властивості полімерної матриці, є неоднозначним і потребує подальшого вивчення. Також, композитні системи на основі епоксидного полімеру та сажі мають широкий потенціал для створення матеріалів із високою діелектричною проникністю та покращеними механічними властивостями, що дозволяє значно розширити область їх застосування. У зв'язку з цим актуальним завданням постає розробка нових композитних матеріалів з поліпшеними у комплексі діелектричними та експлуатаційними характеристиками на основі модифікованого зв'язувача та нанодисперсної сажі, що дозволить поєднати переваги наперед заданих інгредієнтів в одному композиті.

Монографія присвячена питанням встановлення основних закономірностей впливу обраних модифікатора та наповнювача на формування багатофункціональних епоксидних захисних покриттів, методам виготовлення розроблених матеріалів, які значно підвищують їх пріоритетні властивості, а саме механічні та електрофізичні показники. Завдяки цьому створено нові епоксикомпозитні матеріали та захисні покриття й технологію їх формування. Зокрема, запропоновано епоксикомпозитні матеріали антистатичного призначення з покращеними адгезійними, механічними та діелектричними характеристиками, які призначенні для підвищення експлуатаційно-ремонтних характеристик технологічного устаткування морського та річкового транспорту.

Автори висловлюють подяку керівництву Херсонської державної морської академії за надану можливість виконувати експериментальні дослідження у межах установи, а також членам наукової школи «Матеріалознавство, експлуатація та ремонт засобів транспорту» за допомогу при виконанні низки експериментів.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КМ	композитний матеріал
ПКМ	полімерний композитний матеріал
ФПКМ	функціональний полімерний композитний матеріал
ПЕПА	поліетиленполіамін
УЗО	ультразвукова обробка
$\sigma_a$	адгезійна міцність при відриві
$\tau$	адгезійна міцність при зсуві
$\sigma_z$	залишкові напруження
$E$	модуль пружності при згинанні
$\sigma_{z2}$	руйнівні напруження при згинанні
$W, W'$	ударна в'язкість
$T$	теплостійкість (за Мартенсом)
ТКЛР, $\alpha$	термічний коефіцієнт лінійного розширення
$T_c$	температура склування
$\delta$	усадка
$T_0$	початкова температура втрати маси (початок деструкції)
$T_k$	кінцева температура втрати маси (завершення деструкції)
$\varepsilon_m$	відносна втрата маси
ТГА	термогравіметричний аналіз
ДТА	диференціальний термічний аналіз
$T_n$	початкова температура екзо ефекту
$T_k$	кінцева температура екзо ефекту
$E_a$	енергія активації термічної деструкції
$\eta$	середня динамічна в'язкість
$\Delta E_p$	уявна енергія активації в'язкої течії
$T_m$	крутний момент
$T_h$	температура нагрівання
$E_d$	енергія руйнування
$\sigma_{AC}$	електропровідність при змінному струмі
$\sigma_{DC}$	електропровідність при постійному струмі
$\varepsilon_{eff}$	діелектрична проникність
$\varphi_c$	поріг перколяції
$tg\delta$	тангенс кута діелектричних втрат



Наукове видання

**Букетов Андрій Вікторович**  
**Сметанкін Сергій Олексійович**  
**Алексенко Віктор Леонідович**  
**Юренін Кирило Юрійович**  
**Соценко Віталій Віталійович**

**БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕПОКСИДНІ  
НАНОКОМПОЗИТИ З ПОЛІПШЕНИМИ  
ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Монографія

Відповідальний за випуск *Р. С. Врублевський, А. В. Букетов*  
Технічний редактор *В. В. Карпенко*  
Друк, фальцювальню-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Формат 60x84/16.  
Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 13,75  
Підписано до друку 21.01.2021  
Тираж 300 прим. Зам. № 65

Видавець і виготовлювач  
Херсонська державна морська академія,  
просп. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000  
Тел.: 49-20-20  
Ел. адреса: [rvv@ksma.ks.ua](mailto:rvv@ksma.ks.ua)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої  
справи до Державного реєстру  
К № 4319 від 10.05.2012