

**Воробйов Павло Олександрович**, аспірант, Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0003-4120-2023

## **ВПЛИВ ВМІСТУ ДИСКРЕТНИХ ВОЛОКОН У ЕПОКСИДНОМУ ЗВ'ЯЗУВАЧІ НА ПОКАЗНИКИ АДГЕЗІЙНОЇ ТА КОГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТІВ**

Для формування епоксикомпозитних матеріалів використовували епоксидний діановий зв'язувач марки ЕД-20. Для зшивання епоксидного зв'язувача використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах ( $q = 10$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Для підвищення показників адгезійної і когезійної міцності використано суміш дискретних волокон з параметрами:  $l = 15 \dots 30$  мм,  $d = 20 \dots 25$  мкм, що містить 52% бавовни, 48% поліестеру. У роботі співставлено результати дослідження адгезійної міцності при відриві, залишкових напружень та аналізу поверхні руйнування адгезійного з'єднання. Показано, що максимальним значенням адгезійної міцності ( $\sigma_a = 42,5$  МПа) і мінімальним залишкових напружень ( $\sigma_z = 1,5$  МПа) характеризуються матеріали, що містять суміш дискретних волокон за вмісту  $q = 0,25$  мас.ч. Для таких плівок характерне когезійне руйнування поверхні адгезійного з'єднання. Це пов'язано із взаємодією амідних і карбонільних груп дискретних волокон із епоксидним зв'язувачем. Проведено комплексні дослідження фізико-механічних властивостей, за результатами яких встановлено оптимальний вміст суміші дискретних волокон у реактопластичній матриці, який становить  $q = 0,50 \dots 0,75$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такі композити характеризуються наступними властивостями: ударна в'язкість –  $W = 12,7 \dots 13,2$  кДж/м<sup>2</sup>; руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{gr} = 56,0 \dots 62,0$  МПа, модуль пружності при згині –  $E = 3,15 \dots 3,30$  ГПа. Підвищення показників механічної міцності пов'язано із однорідністю структури полімеру, де наповнювач сприймає максимально можливу частку напруження, і перерозподіляє по об'єму матеріалу. Методом оптичної мікроскопії встановлено в'язкий характер руйнування для композитів з оптимальним вмістом волокнистого наповнювача, що вказує на підвищені показники механічної міцності.

Ключові слова: епоксидний зв'язувач, суміш дискретних волокон, бавовна, поліестер, адгезійна міцність, поверхня руйнування, характер руйнування, оптична мікроскопія

*Постановка проблеми.* З розвитком індустрії виготовлення полімерних матеріалів та розширенням областей їх застосування висувають підвищені вимоги до властивостей полімерних матеріалів і покриттів на їх основі, особливо тих, які використовують у транспортній галузі. При цьому розширення функціональності полімерних матеріалів можливо за рахунок використання спектру добавок (модифікаторів, наповнювачів, пластифікаторів), що дозволяють отримувати композитні матеріали функціонального призначення і покриттів на їх основі із спектром прогнозованих властивостей [1–3].

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Авторами праць [4–6] показано, що найпоширенішою речовиною для неметалевого зв'язувача є епоксидна смола. На основі епоксидних смол можливо виготовляти ґрунтівки, шпаклівки, мастики, просочувальні компаунди, герметики, клеї та композиції призначені для ремонтних робіт [7–9]. При цьому їх широкомасштабне виготовлення і застосування у багатьох галузях промисловості пов'язано із однією з переваг – можливістю створення елементів конструкції, захисних покриттів із заданими властивостями. При цьому поліпшити властивості епоксидних композитних матеріалів (КМ) можливо за рахунок введення в об'єм

полімерної матриці різних за фізико-хімічною природою і дисперсністю наповнювачів. Використання волокнистих добавок у якості армуючих матеріалів обумовлено поліпшенням комплексу властивостей при умові раціонального поєднання компонентів. Так, наприклад, армування полімерної матриці високоміцними вуглецевими, борними, органічними, скляними волокнами забезпечує підвищення питомої міцності, жорсткості, що у декілька разів перевищують традиційні метали і сплави, а також підвищення експлуатаційної надійності, корозійної тривкості [10; 11]. Технологічна лінія виробництва полімерних матеріалів, характеризується приблизно триразовою економією енергоресурсів (порівняно з металами і сплавами) на кожен кілограм КМ. Однак, не зважаючи на досягнення у галузі армованих композитних матеріалів, виникає необхідність розроблення нових композитів і покриттів на їх основі, які не поступаються за властивостями і вартістю вітчизняним та зарубіжним аналогам.

*Мета роботи* – дослідження особливостей впливу дискретного наповнювача у епоксидному зв'язувачі на властивості захисних покриттів.

*Методика дослідження.* Основним компонентом для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується комплексом покращених властивостей порівняно з іншими відомими реактопластами [1].

Для зшивання епоксидних композицій використовували твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-41-202-78), який дозволяє зшивати матеріали при кімнатних температурах [10; 11].

Як наповнювач використовували суміш дискретних волокон на основі бавовни і поліестеру: СДВБП (бавовна – 52%, поліестер – 48%) з параметрами  $l = 15 \dots 30$  мм,  $d = 20 \dots 25$  мкм.

Епоксидний композит, наповнений СДВБП, формували за такою технологією:

- попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20, підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і її витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв;
- дозування дискретного наповнювача (СДВБП);
- введення СДВБП у композицію у наступному співвідношенні – 50% добавки у епоксидний зв'язувач, 50% добавки у твердник ПЕПА;
- механічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дискретного наповнювача впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв;
- ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau_3 = 1,5 \pm 0,1$  хв;
- охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв;
- механічне суміщення твердника ПЕПА і дискретного наповнювача впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв;
- ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau_3 = 1,5 \pm 0,1$  хв;
- суміщення двох композицій (ЕД-20 з дискретним наповнювачем + ПЕПА з дисперсним наповнювачем) впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв.

Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Адгезійну міцність (при відриві) до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків

згідно ГОСТу 14760–69. Вимірювали силу відривання клейових з'єднань сталених зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  Н/с. Діаметр робочої частини сталених зразків при відриві становив  $d = 25$  мм.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [1]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,5$  мм формували на сталеній основі. Параметри основи: загальна довжина  $l = 100$  мм; робоча довжина  $l_0 = 80$  мм, товщина  $\delta = 0,3$  мм.

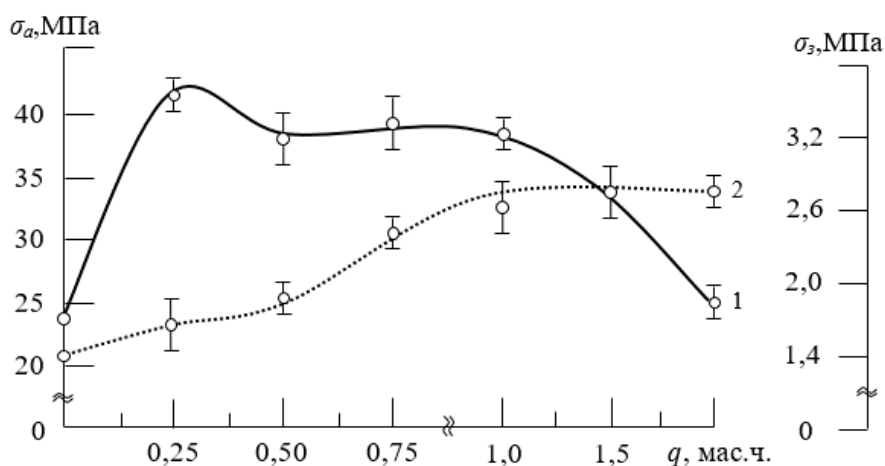
Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно ASTM D790-03. Параметри зразків: довжина  $l = 120 \pm 2$  мм, ширина  $b = 15 \pm 0,5$  мм, висота  $h = 10 \pm 0,5$  мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі згідно ASTM D6110-18 на маятниковому копрі МК-30 при температурі  $T = 298 \pm 2$  К і відносній вологості  $d = 50 \pm 5\%$ . Використовували зразки розміром  $l \times b \times h = (63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$  мм. Відстань між опорами  $l = 40 \pm 0,5$  мм.

Відхилення значень при дослідженні показників адгезійних і фізико-механічних властивостей КМ становило 4–6% від номінального.

Дослідження структури (топології) матеріалів проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від  $\times 100$  до  $\times 1600$  разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

*Експериментальні результати дослідження.* Попередньо досліджували вплив вмісту СДВБП на адгезійну міцність при відриві ( $\sigma_a$ ) і залишкові напруження ( $\sigma_s$ ) у КМ. Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач дискретного наповнювача за вмісту  $q = 0,25$  мас. ч. забезпечує монотонне підвищення адгезійної міцності при відриві КМ з  $\sigma_a = 24,4$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 42,5$  МПа (рис. 1, крива 1).



1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – залишкові напруження ( $\sigma_s$ )  
Рисунок 1 – Залежність адгезійної міцності ( $\sigma_a$ ,  $\tau$ ) і залишкових напружень ( $\sigma_s$ ) КМ від вмісту суміші дискретних органічних волокон

Руйнування такого адгезійного з'єднання приймає когезійний характер (рис. 2, а), що обумовлено значною активністю волокнистої складової. На основі аналізу праці [12] вважали, що співставлення значення адгезійної міцності і характеру відриву адгезійного з'єднання пов'язано із взаємодією амідних і карбонільних груп дискретних волокон із епоксидним олігомером ЕД-20, що у свою чергу забезпечує міцний адгезійний зв'язок із металевою основою. Додатково встановлено, що значення залишкових

напружень є більшими за епоксидну матрицю ( $\sigma_3 = 1,4$  МПа), але відносно невисоким –  $\sigma_3 = 1,5$  МПа, що позитивно впливає на термін експлуатації покриття.



$q$ , мас.ч.: а – 0,25; б – 0,75; в – 2,0

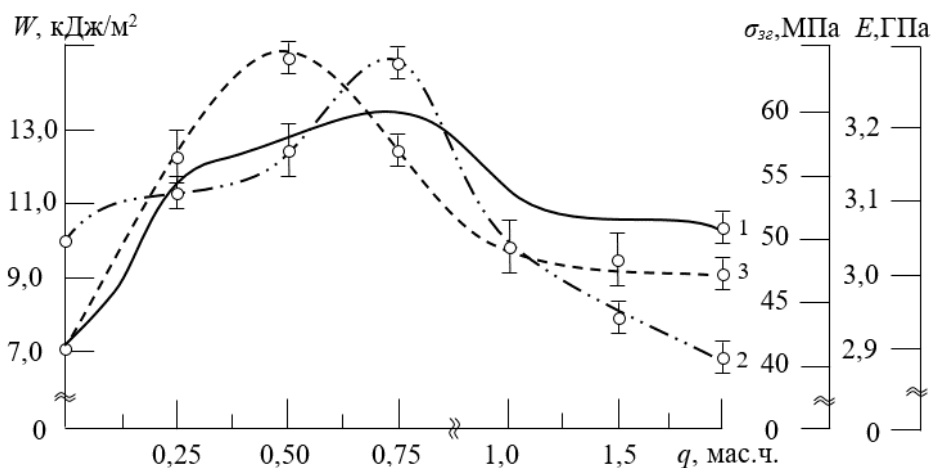
Рисунок 2 – Характер відриву (адгезійна міцність при відриві) епоксидних композитів із різним вмістом суміші дискретних волокон

Введення у епоксидний зв'язувач СДВБП за вмісту  $q = 0,50 \dots 0,75$  мас.ч. забезпечує незначне зменшення адгезійної міцності –  $\sigma_a = 37,0 \dots 38,0$  МПа, що пов'язано із зростанням в'язкості композиції та збільшення значення залишкових напружень –  $\sigma_3 = 1,9 \dots 2,5$  МПа, при цьому характер руйнування є змішаним (адгезійно-когезійний) (рис. 2, б). Збільшення вмісту дискретного наповнювача до  $q = 1,0 \dots 2,0$  мас.ч. призводить до монотонного зменшення показників адгезійної міцності. Вважали, що зменшення значення адгезійної міцності пов'язано із недостатнім змочуванням волокнистої складової зв'язувачем за рахунок підвищення в'язкості композиції. Внаслідок цього утворюються мікро дефекти у адгезивній плівці, через значні залишкові напруження –  $\sigma_3 = 2,5 \dots 2,7$  МПа. Це у свою чергу призводить до адгезійного характеру відриву (рис. 2, в).

При експлуатації нанесеного захисного покриття на деталі транспортних засобів необхідно враховувати вплив статичних, динамічних і навантажень ударного характеру. Тому, додатково проводили дослідження впливу вмісту суміші дискретних волокон на фізико-механічні властивості (ударна в'язкість, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні).

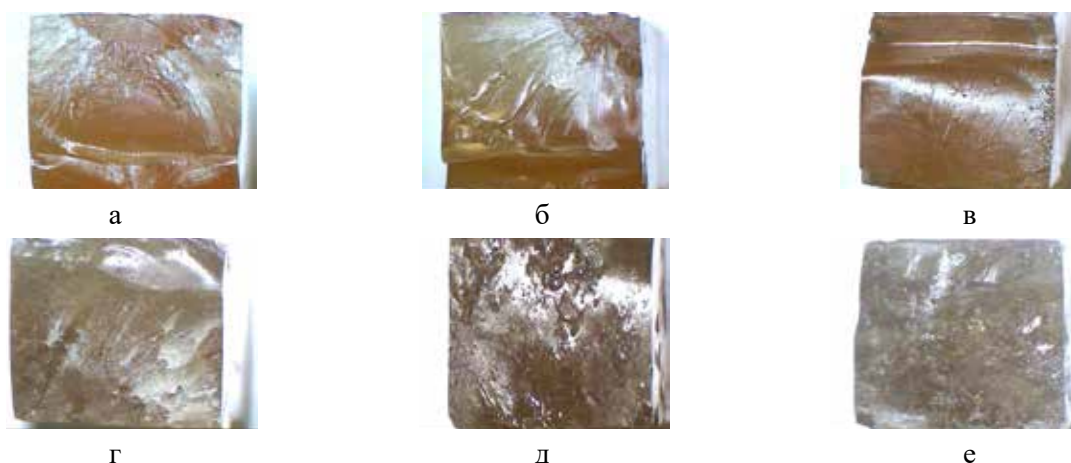
Встановлено, що значення ударної в'язкості епоксидної матриці становить  $W = 7,0$  кДж/м<sup>2</sup> (рис. 3, крива 1). Введення СДВБП за вмісту  $q = 0,25$  мас.ч. приводить до підвищення механічної характеристики у 1,6 рази ( $W = 11,5$  кДж/м<sup>2</sup>). Вважали, що за незначного вмісту волокнистої добавки відбувається її впорядкованість у об'ємі полімеру, що сприяє інтенсифікації процесу зшивання та забезпечує підвищення механічних характеристик композиту. Відповідно, поверхня руйнування таких матеріалів однорідного характеру, але з присутньою незначною крихкістю (рис. 4, а). Подібне руйнування характерне для ненаповненої матриці, де переважно площу руйнування займають крихкі ділянки.

Це дозволяє зробити припущення про недостатню кількість волокнистої добавки у об'ємі полімеру для забезпечення повноцінного армування КМ.



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

Рисунок 3 – Залежність фізико-механічних властивостей КМ від вмісту суміші дискретних волокон



$q$ , мас.ч.: а – 0,25; б – 0,50; в – 0,75; г – 1,0; д – 1,5; е – 2,0

Рисунок 4 – Поверхня зламу епоксидних композитів із різним вмістом суміші дискретних волокон приводить до підвищення значення руйнівних напружень при згинанні КМ з  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_{32} = 51,0$  МПа (рис. 3, крива 2). Тоді, як значення модуля пружності при згинанні також підвищується з  $E = 2,9$  ГПа до  $E = 3,15$  ГПа

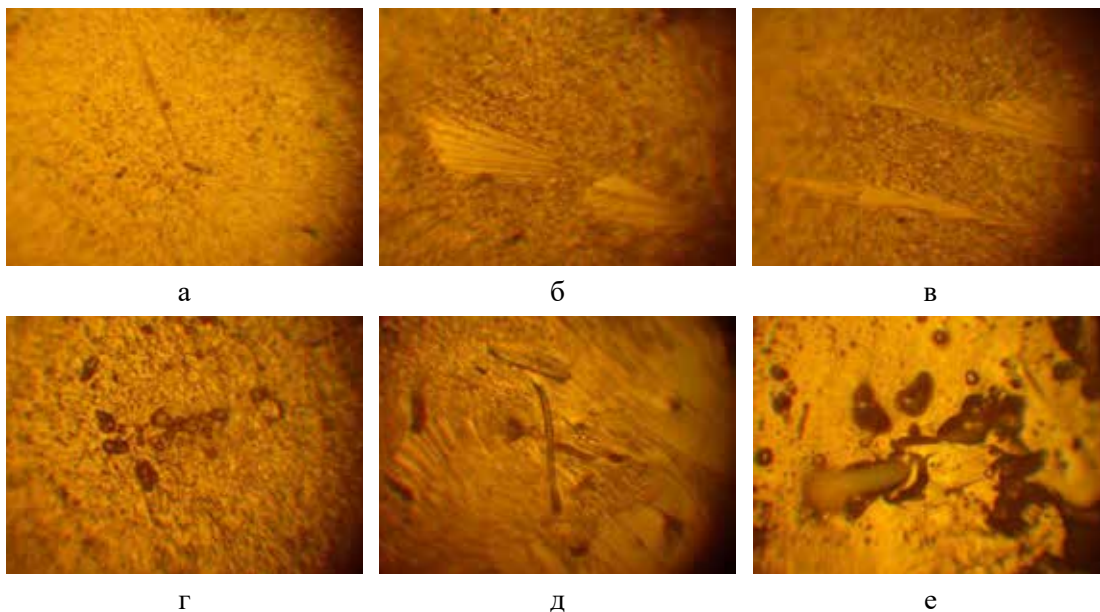
Введення СДВБП за вмісту  $q = 0,50$  мас.ч. забезпечує підвищення ударної в’язкості до  $W = 12,7$  кДж/м<sup>2</sup>. Поверхня руйнування таких матеріалів також однорідного характеру, з присутньою крихкістю (рис. 4, б). Введення СДВБП за вмісту  $q = 0,75$  мас. ч. забезпечує максимум на кривій залежності ударної в’язкості від вмісту волокнистої добавки –  $W = 13,2$  кДж/м<sup>2</sup>. При цьому спостерігали зміну характеру поверхні руйнування перехід із змішаного (в’язко-крихкого) (рис. 4, а-б) до в’язкого (рис. 4, в) без присутніх характерних дефектів. Вважали, що композити наповнені оптимальним вмістом наповнювача забезпечують впорядкованість структури розроблених матеріалів. При цьому волокнистий наповнювач сприймає максимально можливу частку напруження, що виникає у КМ під впливом навантаження ударного характеру (удару робочої частини маятникового копра) і перерозподіляє по об’єму полімеру. Це забезпечує максимальні показники ударної в’язкості.

Введення СДВБП за вмісту  $q = 1,0 \dots 2,0$  мас. ч. призводить до зниження ударної в'язкості до  $W = 10,8 \dots 11,0$  кДж/м<sup>2</sup> та зміну характеру поверхні руйнування КМ. Поверхня руйнування таких композитів має значну кількість крихких ділянок (рис. 4, г), помітне утворення повітряних включень (рис. 4, д), що пов'язано з недостатнім змочуванням волокнистої складової зв'язувачем і утворенням дефектів у вигляді мікро пор (рис. 4, е), що свідчить про наявність локальних залишкових напружень в матеріалі ( $\sigma_3 = 2,5 \dots 2,7$  МПа).

Встановлено (рис. 3, криві 1, 2) кореляційний зв'язок показників фізико-механічних властивостей ( $W$  і  $\sigma_{3z}$ ) при введенні СДВБП. Зокрема, ведення у епоксидний зв'язувач волокнистої добавки за вмісту  $q = 0,25$  мас.ч.

Методом оптичної мікроскопії встановлено однорідну структуру зламу таких композитів без присутніх дефектів (рис. 4, а).

Таким чином підтверджується раніше висунуте припущення про впорядкованість структури композитів за вказаного вмісту дискретного наповнювача. Подібну структуру зламу (рис. 5, б, в), де здебільшого переважає в'язкий характер руйнування спостерігали при введенні СДВБП за вмісту  $q = 0,50 \dots 0,75$  мас.ч. Значення руйнівних напружень при згинанні таких КМ становлять –  $\sigma_{3z} = 56,0 \dots 62,0$  МПа. Тоді, як значення модуля пружності при згинанні підвищується до  $E = 3,15 \dots 3,3$  ГПа.



$q$ , мас. ч.: а – 0,25; б – 0,50; в – 0,75; г – 1,0; д – 1,5; е – 2,0.

Рисунок 5 – Фрактограми зламу епоксидних композитів із різним вмістом суміші дискретних волокон

Введення СДВБП за вмісту  $q = 1,0 \dots 2,0$  мас. ч. призводить до монотонного зниження показників механічної міцності –  $\sigma_{3z} = 40,0 \dots 48,0$  МПа,  $E = 3,0$  ГПа. Відповідно структура зламу таких композитів квазіоднорідного характеру (рис. 5, г-е). Збільшення вмісту добавки з  $q = 1,0$  мас.ч. до  $q = 2,0$  мас. ч. призводить до збільшення кількості і розмірів дефектів у структурі полімеру, що пов'язано із зростанням в'язкості системи «зв'язувач-волокнистий наповнювач», зниження ступеня змочування. Таким чином структурні дефекти виступають концентраторами напружень при досягненні критичних значень яких відбувається руйнування матеріалів.

*Висновки.* У процесі проведення комплексних експериментальних досліджень впливу волокнистого наповнювача на показники адгезійної і когезійної міцності, встановлено наступне:

Для формування покриттів, які забезпечують високі показники адгезійної міцності доцільно використовувати композити, що містять суміш дискретних волокон на основі бавовни і поліестеру за вмісту  $q = 0,25$  мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас. ч. твердника ПЕПА. Встановлено, що когезійний характер руйнування адгезійної плівки і мінімальні значення залишкових напружень –  $\sigma_s = 1,5$  МПа вказують про міцний адгезійний зв'язок із металевою основою ( $\sigma_a = 42,5$  МПа). Це свідчить про те, що введення дискретних волокон у епоксидний зв'язувач за оптимального вмісту забезпечує хімічну взаємодію активних груп наповнювача (амідних і карбонільних) з макромолекулами та сегментами епоксидного олігомера.

Для формування покриттів, які забезпечують високі показники когезійної міцності доцільно використовувати композити, що містять суміш дискретних волокон на основі бавовни і поліестеру за вмісту  $q = 0,50 \dots 0,75$  мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас. ч. твердника ПЕПА. Такі композити характеризуються наступними властивостями: ударна в'язкість –  $W = 12,7 \dots 13,2$  кДж/м<sup>2</sup>; руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z_2} = 56,0 \dots 62,0$  МПа, модуль пружності при згині –  $E = 3,15 \dots 3,30$  ГПа. Підвищення механічної міцності пов'язано із зміною структури полімеру, а це у сою чергу забезпечує перехід в'язко-крихкого до в'язкого характеру зламу поверхні матеріалу, що свідчить про термодинамічну впорядкованість структури розроблених матеріалів.

### Бібліографічний перелік

1. Букетов А.В., Сметанкін С.О., Чернявська Т.В., Браїло М.В., Сапронов О.О., Соценко В.В., Соценко К.Ю., Кулінич В.Г., Якущенко С.В., Яцюк В.М. Метод підвищення ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту за рахунок використання модифікованих захисних антикорозійних покриттів : монографія. Херсон : ХДМА, 2021. 126 с.
2. Ходаковський О.В., Амелін М.Ю., Сметанкін С.О., Акімов О.В., Яцюк В.М. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2016. № 50(1222). С. 42–46.
3. Сметанкін С.О., Нігалатій В.Д., Шарко О.В., Наговський Д.А., Скирденко О.І. Модифіковані епоксидні композити для підвищення надійності експлуатації та якості ремонту транспортної техніки. *Вісник ХНТУ*. 2015. № 4(55). С. 203–2018.
4. Букетова Н.М. Особливості впливу дисперсного конвертерного шламу на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидних композитів. *Науковий вісник ХДМА*. 2015. № 2(13). С. 153–162.
5. Kashytskyi V., Savchuk P., Malets V., Herasyimiuk Y., Shcheglov S. Examining the effect of physical fields on the adhesive strength of protective epoxy composite coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/12(87). P. 16–22.
6. Buketov A., Maruschak P., Saponov O., Zinchenko D., Yatsyuk V., Panin S. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. 2016. Vol. 31(3). P. 333–342.
7. Syao O., Malysheva G. Properties and application of rubber-based sealants. *Polym. Sci. Ser. D* 7. 2014. P. 222–227.
8. Momber A.W., Fröck L., Marquardt T. Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020. 102699.
9. Saponov O., Maruschak P., Sotsenko V., Buketova N., Bertem A., Saponova A., Prentkovskis O. Development and Use of New Polymer Adhesives for the Restoration of Marine Equipment Units. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. 8(7). P. 527.
10. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Добротвор І.Г. Епоксидні матеріали, модифіковані енергетичними полями : монографія. Тернопіль : Збруч, 2008. 208 с.

11. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Чихіра І.В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів : монографія. Тернопіль : Крок, 2011. 201 с.
12. Сапронова А.В. Вплив вмісту органічних волокон у епоксидному зв'язувачі на показники адгезійної та когезійної міцності покриттів транспортної техніки. *Науковий вісник ХДМА*. 2019. №1(20). С. 141–151.

### References

1. Buketov A.V., Smetanin S.O., Chernyavska T.V., Brailo M.V., Sapronov O.O., Socenko V.V., Socenko K.Yu., Kulilich V.G., Yakushchenko S.V., Yatsyuk V.M. Method of increasing the life of equipment of river and sea transport by using modified protective anticorrosive coatings : monograph. Kherson : KhDMA, 2021. 126 s.
2. Khodakovskiy O.V., Amelin M.Yu., Smetanin S.O., Akimov O.V., Yatsyuk V.M. Study of the influence of paraminoazobenzene on the adhesive properties of the epoxy matrix for protective coatings of means of transport. *University of NTU "KhPI"*. 2016. No. 50(1222). P. 42–46.
3. Smetanin S.O., Nigalatiy V.D., Sharko O.V., Nagovskyi D.A., Skirdenko O.I. Modified epoxy composite to improve reliability of operation and quality of repair of transport equipment. *The newsletter of the HNTU*. 2015. № 4(55). P. 203–2018.
4. Buketova N.M. Peculiarities of influence of dispersion converter slurry on adhesive and physical-mechanical properties of epoxy composites. *Scientific Wonders of KhDMA*. 2015. No. 2(13). P. 153–162.
5. Kashytskyi V., Savchuk P., Malets V., Herasymiuk Y., Shcheglov S. Examining the effect of physical fields on the adhesive strength of protective epoxy composite coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/12(87). P. 16–22.
6. Buketov A., Maruschak P., Sapronov O., Zinchenko D., Yatsyuk V., Panin S. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. 2016. Vol. 31(3). P. 333–342.
7. Syao O., Malysheva G. Properties and application of rubber-based sealants. *Polym. Sci. Ser. D* 7. 2014. P. 222–227.
8. Momber A.W., Fröck L., Marquardt T. Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020. 102699.
9. Sapronov O., Maruschak P., Sotsenko V., Buketova N., Bertem A., Sapronova A., Prentkovskis O. Development and Use of New Polymer Adhesives for the Restoration of Marine Equipment Units. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. 8(7). P. 527.
10. Stukhlyak P.D., Buketov A.V., Dobrotvor I.G. Epoxy materials, modified by energy fields : monograph. Ternopil : Zbruch, 2008. 208 s.
11. Buketov A.V., Stukhlyak P.D., Chikhira I.V. Properties of modified ultrasound epoxy plastics : monograph. Ternopil : Krok, 2011. 201 s.
12. Sapronova A.V. The influence of the content of organic fibers in the epoxy bond on the indicators of adhesion and cohesion strength of the coatings of transport equipment. *Scientific Wonders of KhDMA*. 2019. № 1(20). S. 141–151.

**Vorobiov Pavlo**, Graduate Student, Kherson State Maritime Academy, ORCID: 0000-0003-4120-2023

### INFLUENCE OF CONTENT OF DISCRETE FIBERS IN EPOXY BINDERS ON INDICATORS OF ADHESIVE AND COHESION STRENGTH OF COATINGS

ED-20 epoxy diane binder was used to form epoxy composite materials. Polyethylene polyamine PEPA hardener was used to crosslink the epoxy binder, which allows the materials to be cured at room temperature ( $q = 10$  pts. wt. by weight per 100 pts. wt. by weight of ED-20 epoxy oligomer). To increase the adhesion and cohesion strength, a mixture of discrete fibers with the following parameters was used:  $l = 15...30$  mm,  $d = 20...25$   $\mu$ m, containing 52% cotton, 48% polyester. The paper compares the results of the study of adhesion strength at separation, residual stresses and analysis of the fracture surface of the adhesive joint. It is shown that the maximum value of adhesive strength ( $\sigma_a = 42.5$  MPa) and minimum residual



---

stresses ( $\sigma_3 = 1.5$  MPa) are characterized by materials containing a mixture of discrete fibers with a content of  $q = 0.25$  pts. wt. Such films are characterized by cohesive destruction of the surface of the adhesive joint. This is due to the interaction of amide and carbonyl groups of discrete fibers with an epoxy binder. A comprehensive study of physical and mechanical properties, the results of which established the optimal content of a mixture of discrete fibers in the reactoplastic matrix, which is  $q = 0.50 \dots 0.75$  pts. wt. per 100 pts. wt. by weight epoxy oligomer ED-20 and 10 pts. wt. firm PEPA. Such composites are characterized by the following properties: toughness –  $W = 12.7 \dots 13.2$  kJ/m<sup>2</sup>; destructive bending stresses –  $\sigma_{ben} = 56.0 \dots 62.0$  MPa, modulus of elasticity in bending –  $E = 3.15 \dots 3.30$  GPa. The increase in mechanical strength indicators is associated with the homogeneity of the polymer structure, where the filler perceives the maximum possible share of stress and redistributes it throughout the volume of the material. Optical microscopy revealed the viscous nature of fracture for composites with the optimal content of fibrous filler, which indicates increased mechanical strength.

Keywords: epoxy binder, discrete fiber mixture, cotton, polyester, adhesive strength, fracture surface, fracture nature, optical microscopy

Стаття надійшла до редакції 18.03.2022 р.