

УДК 667.64:678.026

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ ПАРААМІНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Ходаковський О. В.**, к.т.н., доцент кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

**Амелін М. Ю.**, аспірант кафедри судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі Херсонської державної морської академії, e-mail: dzgeron@rambler.ru;

**Букетова Н. М.**, к.т.н., науковий співробітник наукової групи при кафедрі транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua;

**Сапронов О. О.**, к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: o.o.sapronov@gmail.com;

**Яцюк В. М.**, аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua

*У роботі для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і модифікатор. Досліджено залежність вмісту модифікатора на фізико-механічні властивості епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліішеними когезійними властивостями оптимальний вміст модифікатора парааміноазобензолу становить  $q = 1,0$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним, а також навантаженням ударного характеру, позаяк показники їх властивостей становлять: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 51,8$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 3,9$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 11,9$  кДж/м<sup>2</sup>. Отримані результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей композитних матеріалів добре узгоджуються з результатами випробувань зразків методом оптичної мікроскопії, що свідчить про їх достовірність.*

**Ключові слова:** епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні.

**Постановка проблеми.** Як відомо [1, 2], важливе значення при експлуатації і ремонті засобів транспорту, у тому числі й річкового та морського, має застосування полімерних композитних матеріалів (КМ) та захисних покриттів на їх основі. У першу чергу, актуальними є питання, що стосуються підвищення надійності роботи й відповідно експлуатаційних характеристик елементів технологічного обладнання, які піддаються статичним та динамічним навантаженням, що є першопричиною їх зношування і корозії. Широкий спектр зовнішніх та внутрішніх факторів, які впливають на характеристики структури деталей, і, як наслідок, визначають їх надійність, передбачає використання нових матеріалів, що відзначаються комплексом підвищених характеристик. До цього класу відносять полімерні композити. Перспективою використання таких матеріалів є можливість їх застосування у критичних умовах експлуатації деталей та механізмів, що є важливим і актуальним при ремонті засобів морського та річкового транспорту в умовах рейсу. Доведено [3], що такі композити не лише є перспективними з технологічної точки зору (можливість формування і нанесення на поверхні деталей за підвищеної вологості та градієнту температур), але й відзначаються екологічністю та підвищеними експлуатаційними характеристиками у критичних умовах роботи засобів транспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний науковий і практичний досвід у напрямку дослідження фізико-механічних властивостей КМ висвітлено у працях авторів: Ю.С.Ліпатова, А.В.Букетова, П.Д.Стухляка, О.В.Шарка, О.М.Сизоненко, Г.М.Бартенєва, Г.А.Баглюка та ін. Зазначеними вище науковцями доведено, що важливим при формуванні композитів є не лише встановлення критичного вмісту добавки, але й вибір хімічно та фізично активного наповнювача чи модифікатора, що дозволяє збільшити

ступінь зшивання нових матеріалів. При цьому важливе значення має підхід до контролю швидкості перебігу фізико-хімічних процесів міжфазової взаємодії при структуроутворенні полімерних композитів. Останнє суттєво залежить від активності до створення міжфазових зв'язків введеної добавки. Виходячи з цього, актуальним є введення у полімерний зв'язувач модифікаторів за незначного вмісту, що дозволить отримати матеріали із наперед заданою структурою і відповідно поліпшеними когезійними властивостями.

**Мета роботи** – дослідити вплив вмісту модифікатора парааміноазобензолу на фізико-механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо [4, 5], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як модифікатор використано парааміноазобензол (ПААБ). Хімічна формула парааміноазобензолу має наступний вигляд:  $C_{12}H_{11}N_3$ . Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса парааміноазобензолу – 197. Температура плавлення – 400 К. Модифікатор розчинний у бензолі, етанолі, ацетоні, малорозчинний у воді. Використовується як азобарвник та синтон для одержання більш складних азобарвників.

Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

<i>Характеристики</i>	<i>Епоксидний олігомер ЕД-20</i>	<i>Модифікатор ПААБ</i>	<i>Твердник ПЕПА</i>
Молекулярна маса	390...430	197	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–
Середня функціональність за епоксидними групами, $f_n$	2,0	–	–
Вміст азоту, %	–	21,32	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	–	73,10	–
Вміст водню, %	–	5,58	–
В'язкість, $\eta$ , Па·с	13...20	–	0,9
Густина, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,16	–	1,05

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; гідродинамічне суміщення олігомеру й модифікатора впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання 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 за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, ударну в'язкість.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. 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 відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі  $T = 298 \pm 2$  К і відносній вологості  $d = 50 \pm 5$  %. Використовували зразки з такими параметрами:  $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$  мм. Відстань між опорами  $40 \pm 0,5$  мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Попередньо експериментально досліджено фізико-механічні властивості модифікованої ультразвуковою обробкою вихідної епоксидної матриці. Доведено (рис. 1), що показники її характеристик є наступними: модуль пружності при згинанні –  $E = 2,8$  ГПа, руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 48,0$  МПа, ударна в'язкість –  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>.

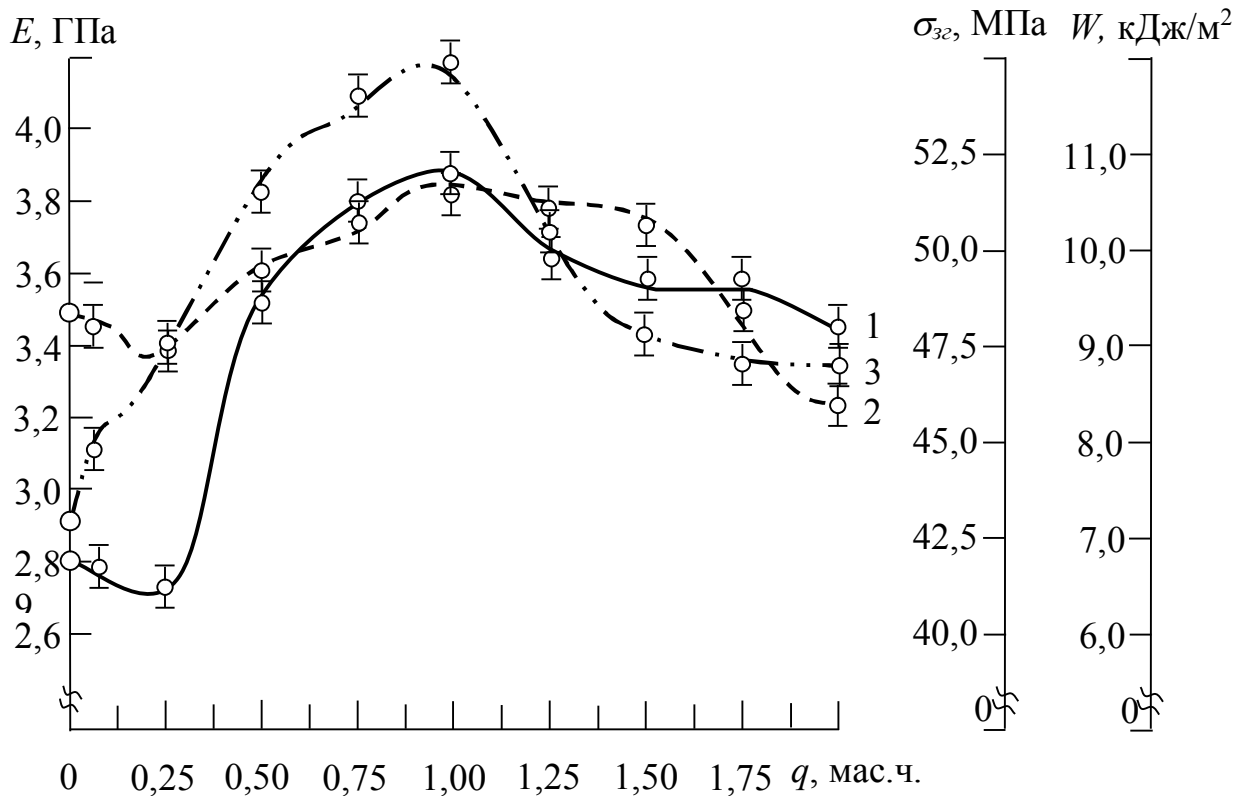


Рисунок 1 – Залежність фізико-механічних властивостей і ударної в'язкості епоксидної матриці від вмісту модифікатора парааміноазобензолу:

1 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 2 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{3z}$ ); 3 – ударна в'язкість ( $W$ , кДж/м<sup>2</sup>)

Надалі досліджували залежність фізико-механічних властивостей КМ від вмісту модифікатора парааміноазобензолу. Встановлено (рис. 1, крива 1), що введення модифікатора у кількості  $q = 0,10 \dots 0,25$  мас.ч. не приводить до зміни модуля пружності епоксидної матриці, позаяк значення даної характеристики становлять  $E = 2,6 \dots 2,8$  ГПа (це відноситься до діапазону значень, які знаходяться в межах похибки експерименту). Подальше збільшення вмісту ПААБ до  $q = 0,50 \dots 0,75$  мас.ч. забезпечує збільшення показників модуля пружності матриці до  $E = 3,5 \dots 3,7$  ГПа. Це можна пояснити

активацією процесів фізико-хімічної взаємодії груп модифікатора ( $-\text{NH}_2$ -,  $\text{C}=\text{C}$ ) з сегментами та боковими групами епоксидного олігомеру ( $\text{C}=\text{C}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ ,  $-\text{C}-\text{H}$ -,  $-\text{C}-\text{CH}_2$ ,  $\text{C}-\text{OH}$ ) під час структуроутворення КМ. Слід зазначити, що на початковому етапі зшивання КМ попередньо проводили УЗО композиції. Це забезпечує не лише її дегазацію та інтенсивне перемішування компонентів до введення твердника, але й активує макромолекули інгредієнтів до подальшої взаємодії. Припускали, що в результаті УЗО активація відбувається за рахунок зміщення електронної густини у ковалентних зв'язках як епоксидного олігомеру, так і модифікатора. Це, у свою чергу, забезпечує збільшення їх реакційної здатності. У результаті перебігу таких процесів взаємодії підвищується кількість фізичних зв'язків на початковому етапі зшивання КМ (за температур до точки склування) і хімічних зв'язків у діапазоні температур  $\Delta T \approx 400 \dots 450 \text{ K}$ . Такі процеси створюють умови для формування матеріалів з підвищеними показниками когезійної міцності, що передбачає відповідно підвищення значень модуля пружності модифікованої матриці у тому числі.

Максимальне значення модуля пружності при згинанні ( $E = 3,9 \text{ ГПа}$ ) спостерігали при введенні модифікатора ПААБ за вмісту  $q = 1,00 \text{ мас.ч.}$  Вважали, що за такого критичного вмісту добавки у композиті утворюється максимальна кількість хімічних зв'язків і формується матеріал з найвищим ступенем зшивання серед усього досліджуваного діапазону КМ. При цьому на кінцевому етапі зшивання утворюється композит з гомогенною структурою, яка відзначається рівномірним розподілом зв'язків у об'ємі, що передбачає не лише поліпшення когезійних властивостей, але й зниження залишкових напружень [6]. Останнє є важливим для підвищення надійності експлуатації розроблених матеріалів у критичних умовах (знакозмінні навантаження і широкий градієнт температур).

Надалі збільшення вмісту модифікатора ( $q = 1,25 \dots 2,00 \text{ мас.ч.}$ ) призводить до зменшення показників модуля пружності при згинанні до  $E = 3,5 \dots 3,7 \text{ ГПа}$ . На наш погляд, це зумовлено надмірною кількістю молекул модифікатора у композиціях, що зумовлює неповне їх зшивання при полімеризації. Такі матеріали відзначаються підвищеним вмістом золь-фракції, що призводить до зниження показників фізико-механічних характеристик розроблених матриць.

На наступному етапі аналізували залежність руйнівних напружень при згинанні КМ від концентрації модифікатора. Експериментально встановлено (рис. 1, крива 2), що введення у зв'язувач ПААБ за незначного вмісту ( $q = 0,10 \dots 0,50 \text{ мас.ч.}$ ) не приводить до підвищення показників когезійної міцності матеріалів, оскільки значення руйнівних напружень вихідної ( $\sigma_{32} = 48,0 \text{ МПа}$ ) і модифікованих добавкою матриць ( $\sigma_{32} = 47,0 \dots 49,0 \text{ МПа}$ ) практично не відрізняються. Доведено (рис. 1), що максимум ( $\sigma_{32} = 51,8 \text{ МПа}$ ) на кривій залежності руйнівних напружень при згинанні від вмісту модифікатора спостерігали за концентрації добавки  $q = 1,00 \text{ мас.ч.}$  Отримані дані симбатно корелюють з аналогічною залежністю модуля пружності при згинанні від вмісту ПААБ (рис. 1, крива 1), де аналогічно виявлено максимальні показники  $E$  за такої ж кількості введеної добавки. Більше того, при введенні модифікатора понад критичного вмісту ( $q = 1,25 \dots 2,00 \text{ мас.ч.}$ ) показники руйнівних напружень суттєво знижуються до  $\sigma_{32} = 45,8 \dots 50,1 \text{ МПа}$ . Отримані результати дослідження підтверджують наведені вище припущення про те, що введення у зв'язувач залишкової кількості модифікатора призводить до суттєвого погіршення когезійних властивостей матриці за рахунок збільшення золь-фракції у матеріалі.

Враховуючи те, що устаткування річкового та морського транспорту експлуатують при динамічних і ударних навантаженнях, актуальним було проведення дослідження ударної в'язкості розроблених композитів, які додатково можна використовувати у вигляді захисних покриттів під час ремонту деталей механізмів та машин. Експериментально доведено (рис. 1, крива 3), що розроблені матеріали є стійкими до ударних навантажень, оскільки введення у епоксидний олігомер ЕД-20 модифікатора ПААБ за незначного вмісту ( $q = 1,00 \text{ мас.ч.}$  – максимум на кривій залежності ударна

в'язкість ( $W$ ) – вміст модифікатора ( $q$ ) забезпечує підвищення показників міцності при ударі стосовно вихідної матриці у 1,6 разів (від  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $W = 11,9$  кДж/м<sup>2</sup>). Надалі збільшення концентрації модифікатора у епоксидному композиті до  $q = 1,50 \dots 2,00$  мас.ч. призводить до зменшення показників ударної в'язкості, які знаходяться в межах  $W = 8,9 \dots 9,2$  кДж/м<sup>2</sup>. Слід зазначити – отримані дані корелюють і добре узгоджуються з результатами дослідження залежності модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні, що свідчить про достовірність отриманих показників в результаті проведених випробувань комплексу фізико-механічних властивостей матеріалів.

Додатково для підтвердження отриманих результатів випробувань проводили аналіз поверхні руйнування зразків після їх дослідження на маятниковому копрі. Методом оптичної мікроскопії встановлено (рис. 2, а), що поверхня зламу вихідної матриці має квазіоднорідний характер, проте у зразку встановлено наявність мікротріщин (рис. 2, б). Це свідчить про наявність локальних залишкових напружень в матеріалі. Консольним методом [6] встановлено, що величина залишкових напружень в епоксидній матриці становить  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Необхідно також відзначити зигзагоподібний характер поширення тріщини, який вказує на зміну знаку коефіцієнта інтенсивності напружень. Після стрибка тріщини шлях її поширення вирівнюється, змішана мода деформації змінюється деформацією нормального відриву, що особливо помітно на кінцевій стадії руйнування.

Слід зазначити, що для зразків з модифікованою епоксидною матрицею, яка містять ПААБ у кількості  $q = 0,25$  мас.ч., спостерігали прямий характер зламу (рис. 2, в, г). Це свідчить про незначні когезійні властивості такого композиту, оскільки тріщина, що виникає під час удару маятникового копра, поширюється прямо. Сіткова структура хімічних зв'язків у такому матеріалі не є однорідною, свідченням чого є наявність вкраплення у об'ємі зразка, який характеризує розрихлення структури КМ (рис. 2, г).

Навпаки, для зразків з модифікованих матриць, які містять ПААБ у кількості  $q = 0,50$  мас.ч. (рис. 2, д, е) і  $q = 1,00$  мас.ч. (рис. 2, є, ж), спостерігали хвилеподібний характер макрозламу. Можна констатувати про формування складного напруженого стану в КМ, свідченням чого є утворення трьох фрагментів сколювання під час руйнування зразка при ударі. Дані композити відзначаються найвищими показниками модуля пружності і ударної в'язкості, що дозволяє стверджувати про значну кількість хімічних зв'язків у структурній сітці КМ, а, отже, й поліпшені їх когезійні властивості. Крім того, слід зауважити, що після удару тріщини поширюються нерівномірно, а хімічні зв'язки, наявні в матеріалі після його структуроутворення, чинять опір руйнуванню, внаслідок чого тріщини набувають розгалуженого характеру (показано стрілками, рис. 2, е). Слід зауважити і акцентувати увагу на хвилеподібному характері поширення фронту тріщини (показано стрілками) при руйнуванні зразка модифікованої матриці з добавкою у кількості  $q = 1,00$  мас.ч. (рис. 2, є, ж). Підтверджено, що такий матеріал відзначається високими показниками когезійної міцності, а це обумовлює значну енергоємність його деформування і руйнування. Додатково встановлено [6], що величина залишкових напружень при введенні в епоксидний олігомер модифікатора за даного вмісту зростає до  $\sigma_3 = 3,5$  МПа. Це свідчить про формування напруженого стану в КМ за рахунок значної інтенсивності структуроутворення полімеру і формування композиту з високим ступенем зшивання.

Додатково за допомогою макро- і мікроаналізу встановлено, що руйнування КМ з ПААБ у кількості  $q = 1,50$  мас.ч. відбувається практично перпендикулярно поздовжньої осі зразків (рис. 2, з, і). Поверхня зламу таких зразків має квазікрихкий характер, що свідчить про рівномірність розподілу модифікатора в об'ємі матеріалу. У зразках відсутні лінії сколювання, оскільки система знаходиться в кінетично і термодинамічно стабільному стані. Можна констатувати, що в таких КМ формується сіткова структура з рівномірним розподілом хімічних зв'язків, але із невеликою їх густиною у об'ємі матеріалу. Це, у першу чергу, зумовлено надмірною кількістю модифікатора у системі.

Отже, енергоємність ударного руйнування таких зразків не є високою, що підтверджено характером зламу досліджуваного матеріалу.

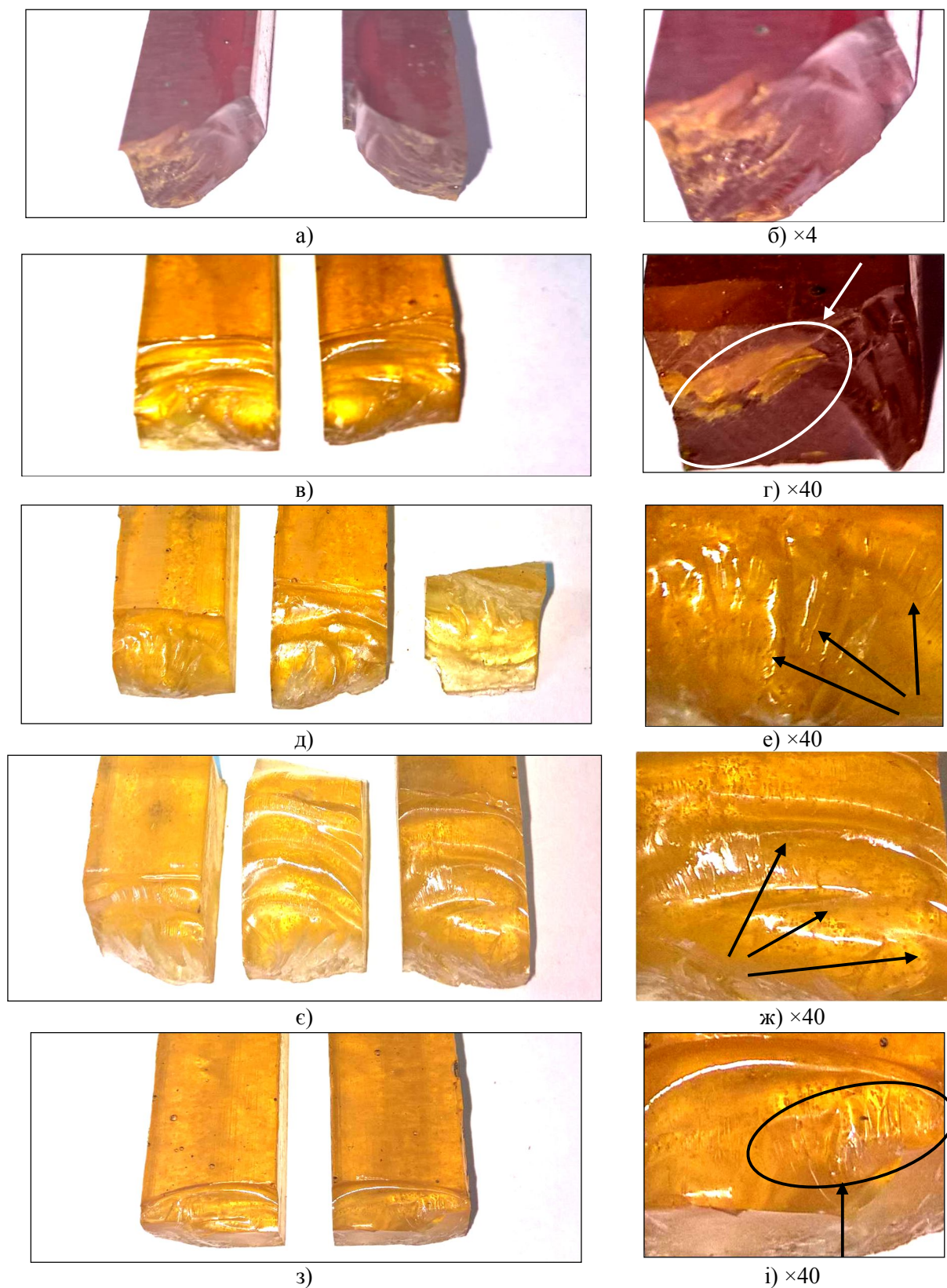


Рисунок 2 – Мікросвітлини зламу вихідної і модифікованих парааміноазобензолом епоксидних матриць:

а, б) вихідна епоксидна матриця (контрольний зразок); в, г)  $q = 0,25$  мас.ч. модифікатора; д, е)  $q = 0,50$  мас.ч. модифікатора; є, ж)  $q = 1,00$  мас.ч. модифікатора; з, і)  $q = 1,50$  мас.ч. модифікатора



**Висновки.** У роботі встановлено:

1. Експериментально доведено, що для формування матеріалів з поліпшеними когезійними властивостями необхідно використовувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ( $q = 100$  мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ( $q = 10$  мас.ч.), модифікатор парааміноазобензол ( $q = 1$  мас.ч.). Такий матеріал відзначається наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{зг} = 51,8$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 3,9$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 11,9$  кДж/м<sup>2</sup>.

2. Методом оптичної мікроскопії встановлено, що поверхня зламу вихідної матриці має квазіоднорідний характер, проте у зразку встановлено наявність мікротріщин. Це свідчить про наявність локальних залишкових напружень у матеріалі. Для зразків з модифікованих матриць, які містять модифікатор у кількості  $q = 0,50$  мас.ч. і  $q = 1,00$  мас.ч., спостерігали хвилеподібний характер макрозламу. При руйнуванні зразків тріщини поширюються нерівномірно, а хімічні зв'язки, наявні в матеріалі після його структуроутворення, чинять опір руйнуванню, внаслідок чого тріщини мають розгалужений характер. Слід акцентувати увагу на хвилеподібному характері поширення фронту тріщин при руйнуванні зразка модифікованої матриці з добавкою у кількості  $q = 1,00$  мас.ч. Підтверджено, що такий матеріал відзначається високими показниками когезійної міцності, що обумовлює значну енергоємність його деформування і руйнування.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Buketov A. V. Nanommodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A. V. Buketov, D. O. Zinchenko, S. O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – P. 41–54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31 (3). – P. 333–342.
3. Лидин Р. А. Химические свойства неорганических веществ : учеб. пособие для вузов / Р. А. Лидин. – М. : Химия, 2000. – 480 с.
4. Букетов А. В. Епоксидні наноккомпозити: монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
5. Букетов А. В. Епоксидні композити, модифіковані високочастотним імпульсним магнітним полем : монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. О.Скирденко, В. Л. Алексенко, О. І. Скирденко. – Херсон : ХДМА, 2016. – 201 с.
6. Ходаковський О. В. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту / О. В. Ходаковський, М. Ю. Амелін, С. О. Сметанкін, О. В. Акімов, В. М. Яцюк // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2016. – № 50 (1222). – С.42–46.

**REFERENCES**

1. Buketov A. V. Nanommodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A. V. Buketov, D. O. Zinchenko, S. O. Smetankin // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2017. – Vol. 8. – R. 41–54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // *Transport*. – 2016. – Vol. 31 (3). – P. 333–342.
3. Lidin R. A. Khimicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv : ucheb. posobie dlya vuzov / R. A. Lidin. – M. : Khimiya, 2000. – 480 s.

4. Buketov A. V. Epoksidni nanokompoziti: monografiya / A. V. Buketov, O. O. Saprnov, V. L. Aleksenko. – Kherson : KhDMA, 2015. – 184 s.
5. Buketov A. V. Epoksidni kompoziti, modifikovani visokochastotnim impul'snim magnitnim polem : monografiya / A. V. Buketov, O. O. Saprnov, V. O. Skirdenko, V. L. Aleksenko, O. I. Skirdenko. – Kherson : KhDMA, 2016. – 201 s.
6. Khodakovskiy O. V. Doslidzhennya vplivu paraaminoazobenzolu na adgeziyjni vlastivosti epoksidnoi matrici dlya zakhisnikh pokrittiv zasobiv transportu / O. V. Khodakovskiy, M. Yu. Amelin, S. O. Smetankin, O. V. Akimov, V. M. Yacyuk // Visnik NTU «KhPI». – 2016. – № 50 (1222). – S.42–46.

**Ходаковский А. В., Амелин М. Ю., Букетова Н. Н., Сапронов А. А., Яцюк В. Н.**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПАРААМИНОАЗОБЕНЗОЛОМ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЕМОНТА СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

*В работе для формирования композитных материалов использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА и модификатор. Исследована зависимость содержания модификатора на физико-механические свойства эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными когезионными свойствами оптимальное содержание модификатора парааминоазобензола составляет  $q = 1,0$  масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим напряжениям, а также нагрузке ударного характера, поскольку значения показателей свойств составляют: разрушающие напряжения при изгибе –  $\sigma_{изг} = 51,8$  МПа, модуль упругости при изгибе –  $E = 3,9$  ГПа, ударная вязкость –  $W = 11,9$  кДж/м<sup>2</sup>. Полученные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств композитных материалов хорошо согласуются с результатами испытаний образцов методом оптической микроскопии, что свидетельствует об их достоверности.*

**Ключевые слова:** эпоксидный композит, модуль упругости, ударная вязкость, разрушающие напряжения при изгибе.

**Khodakovskii A. V., Amelin M. Yu., Buketova N. M., Saprnov A.A., Yatsyuk V. M.**  
INVESTIGATION OF PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES MODIFIED WITH PARA-AMINOAZOBENZENE FOR REPAIRING THE MEANS OF TRANSPORT

*An epoxy diane oligomer ED-20, a hardener polyethylene polyamine PEPA and a modifier were used in the work for the formation of composite materials. The dependence of the modifier content on the physico-mechanical properties of epoxy composites was studied. It is proved that for the formation of a composite material or protective coating with improved cohesive properties, the optimum content of the para-aminoazobenzene modifier is  $q = 1.0$  mass parts by 100 parts by mass epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to withstand static, dynamic stresses, as well as impact loads, since the values of the properties are: destructive stresses while bending –  $\sigma = 51.8$  MPa, modulus of elasticity while bending –  $E = 3.9$  GPa, impact toughness is  $W = 11.9$  kJ/m<sup>2</sup>. The obtained results of experimental studies of the physico-mechanical properties of composite materials are in good agreement with the results of testing samples by optical microscopy, which indicates their reliability.*

**Keywords:** epoxy composite, modulus of elasticity, impact strength, breaking stresses in bending

© Ходаковський О. В., Амелін М. Ю., Букетова Н. М., Сапронов О.О., Яцюк В. М.

Статтю прийнято  
до редакції 13.05.17