

УДК 667.64:678.026

**О.М. Безбах***Херсонська державна морська академія***ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ 4,4'-МЕТИЛЕНБІС(2-МЕТОКСИАНИЛІНОМ) ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ**

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 полішеними когезійними властивостями оптимальний вміст модифікатора 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну) становить  $q = 0,25 \dots 0,50$  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 –  $\sigma_{32} = 51,2 \dots 54,4$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 3,0 \dots 3,2$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 8,8 \dots 9,0$  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.

**О.М. Безбах***Херсонская государственная морская академия***ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ 4,4'-МЕТИЛЕНБИС(2-МЕТОКСИАНИЛИНОМ) ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

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 4,4'-метиленбис(2-метоксианилина) составляет  $q = 0,25 \dots 0,50$  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 составляет: разрушающие напряжения при изгибе –  $\sigma_{32} = 51,2 \dots 54,4$  МПа, модуль упругости при изгибе –  $E = 3,0 \dots 3,2$  ГПа, ударная вязкость –  $W = 8,8 \dots 9,0$  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.

**О.М. Bezbakh***Kherson State Maritime Academy***INVESTIGATION OF PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES MODIFIED WITH 4,4'-METHYLENEBIS (2-METHOXYANILINE)**

In the work for the formation of composite materials, an epoxy diane oligomer ED-20, a hardener polyethylene polyamine PEPA and a modifier were used. 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 4,4'-methylenebis (2-methoxyaniline) modifier is  $q = 0,25 \dots 0,50$  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: bending stresses at bending –  $\sigma = \sigma_{32} = 51.2 \dots 54.4$  MPa, modulus of elasticity at bending –  $E = 3.0 \dots 3.2$  GPa, impact toughness is  $W = 8.8 \dots 9.0$  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.

**Key words:** epoxy composite, modulus of elasticity, impact strength, breaking stresses in bending.

**Постановка проблеми.** З розвитком науково-технічного прогресу, особливо у останні десятиліття, гостро стоїть проблема енерго- і ресурсозбереження. Важливе місце у вирішенні цієї проблеми займають полімерні композитні матеріали (КМ) і захисні покриття на їх основі. Полімерні покриття, особливо на епоксидній основі, застосовують у різних галузях промисловості, у тому числі і у транспорті, для захисту металевих деталей від корозії, що суттєво збільшує їх довговічність. При цьому захисні покриття повинні у комплексі відзначатися підвищеними показниками фізико-механічних властивостей. Лише останні визначають антикорозійні характеристики адгезивів, які, у свою чергу, забезпечують ресурсозбереження технологічного устаткування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальновідомо [1-6], що захисні покриття повинні бути багатофункціональними. З одного боку вони повинні відзначатися підвищеними показниками адгезійної і когезійної міцності, з іншого боку – усадка і залишкові напруження у них мають бути мінімальними. Виходячи з цього, автори [7-16] стверджують, що для поліпшення властивостей полімерних матеріалів у комплексі у епоксидний зв'язувач необхідно вводити модифікатори за незначного вмісту. При цьому добавки повинні бути активними до фізичної і хімічної міжфазової взаємодії з епоксидним олігомером при зшиванні композицій. Лише такий підхід дозволить отримати матеріали з високим вмістом гель-фракції, що, у свою чергу, забезпечить максимальне підвищення показників когезійної міцності захисних покриттів.

Враховуючи наведене вище запропоновано у епоксидний зв'язувач вводити модифікатор 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін) за гомеопатичного вмісту. Дана добавка містить активні групи, що на наш погляд, активізує перебіг фізико-хімічних процесів зшивання і забезпечить підвищення фізико-механічних характеристик досліджуваних матеріалів.

**Мета роботи** – дослідити вплив вмісту модифікатора 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну) 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.

Як модифікатор використано 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін) (МБМА). 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 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну) – 258,3. Хімічна формула –  $C_{15}H_{18}N_2O_2$ . Модифікатор розчинний у бензолі, етанолі, ацетоні, малорозчинний у воді.

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.

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 і 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 –  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа, ударна в'язкість –  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>.

Експериментально встановлено (рис. 1, а), що введення модифікатора за незначного вмісту ( $q = 0,25$  мас.ч.) забезпечує підвищення модуля пружності КМ від  $E = 2,8$  ГПа (для вихідної, але модифікованої ультразвуком епоксидної матриці) до  $E = 3,2$  ГПа. Такі результати дослідження можна пояснити наступним.

По-перше. Слід зазначити, що на попередньому етапі приготування композицій (епоксидний олігомер + модифікатор) після перемішування інгредієнтів проводили ультразвукову обробку (УЗО) компаунду. У першу чергу це забезпечує рівномірне перемішування компонентів і дегазацію композицій. З іншого боку спостерігали утворення вільних радикалів [7] в результаті УЗО. При цьому як з боку модифікатора, так і з боку епоксидної смоли відокремлюються вільні іони водню і  $\text{NH-}$ ,  $\text{NH}_2\text{-}$  чи  $\text{-CH-}$  груп (у модифікаторі) та іони водню і  $\text{OH-}$  груп (у епоксидному олігомері). Такі іони та радикали є досить активними до хімічної взаємодії при зшиванні епоксидних композицій, що забезпечує підвищення ступеня зшивання модифікованої матриці.

По-друге. Після УЗО значний відсоток макромолекул як епоксидних макромолекул, так і молекул модифікатора залишаються у початковому стані. Однак, наявність у структурі добавки метильної  $\text{CH}_3\text{-C}$ , метиленової  $\text{-CH}_2\text{-}$  груп і, особливо, первинних амінів  $\text{-NH}_2$  забезпечує утворення додаткових хімічних зв'язків із боковими гідроксильними та епоксидними групами макромолекул смоли.

Враховуючи наведене вище, а також додаткову фізичну взаємодію макромолекул епоксидної смоли між собою та з модифікатором, вважали, що такий механізм структуроутворення модифікованих епоксидних композицій є найбільш ймовірним, внаслідок чого забезпечується поліпшення показників когезійних характеристик КМ.

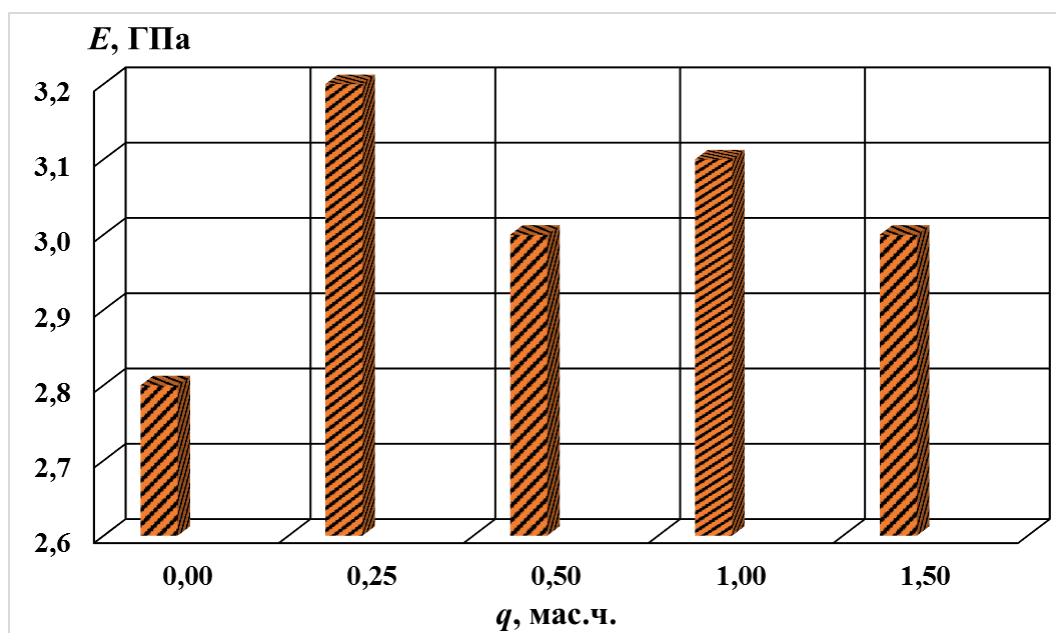
Доведено (рис. 1, а), що збільшення вмісту модифікатора не приводить до підвищення модуля пружності епоксидної матриці. Навпаки, введення у зв'язувач добавки у кількості  $q = 0,50 \dots 1,50$  мас.ч. призводить до зменшення модуля пружності до  $3,0 \dots 3,1$  мас.ч. в усьому досліджуваному діапазоні концентрацій. Це свідчить про те, що концентрація модифікатора –  $q = 0,25$  мас.ч. для даної досліджуваної характеристики є критичною, а подальше його збільшення у зв'язувачі призводить до неповного зшивання матриці при полімеризації. На наш погляд, це зумовлено надмірною кількістю молекул модифікатора у композиціях, тому такі матеріали відзначаються підвищеним вмістом золь-фракції, що призводить до зниження показників фізико-механічних характеристик розроблених матриць.

Наступним етапом було дослідження залежності руйнівних напружень при згинанні КМ від вмісту модифікатора МБМА. Експериментально встановлено (рис. 1, б), що введення у зв'язувач добавки за незначного вмісту ( $q = 0,25$  мас.ч.) забезпечує підвищення показників руйнівних напружень при згинанні модифікованої матриці порівняно з вихідною від  $\sigma_{3z} = 48,0$  МПа до  $\sigma_{3z} = 54,4$  МПа. Надалі введення МБМА у кількості  $q = 0,50 \dots 1,50$  мас.ч. призводить до погіршення когезійних властивостей композитів, позаяк значення руйнівних напружень знаходяться в межах  $\sigma_{3z} = 50,5 \dots 51,6$  МПа. Отримані показники властивостей в результаті дослідження практично не відрізняються і знаходяться в межах похибки експерименту, тому надалі проведення випробувань з метою підвищення характеристик матеріалів за рахунок збільшення вмісту добавки не є доцільним. Водночас слід зазначити, що отримані дані корелюють з аналогічною залежністю модуля пружності при згинанні від вмісту модифікатора (рис. 1, крива 1), де аналогічно виявлено максимальні показники  $E$  за такої ж кількості введеної добавки. Виходячи з цього можна констатувати про критичний вміст модифікатора у епоксидному зв'язувачі, який становить  $q = 0,25$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

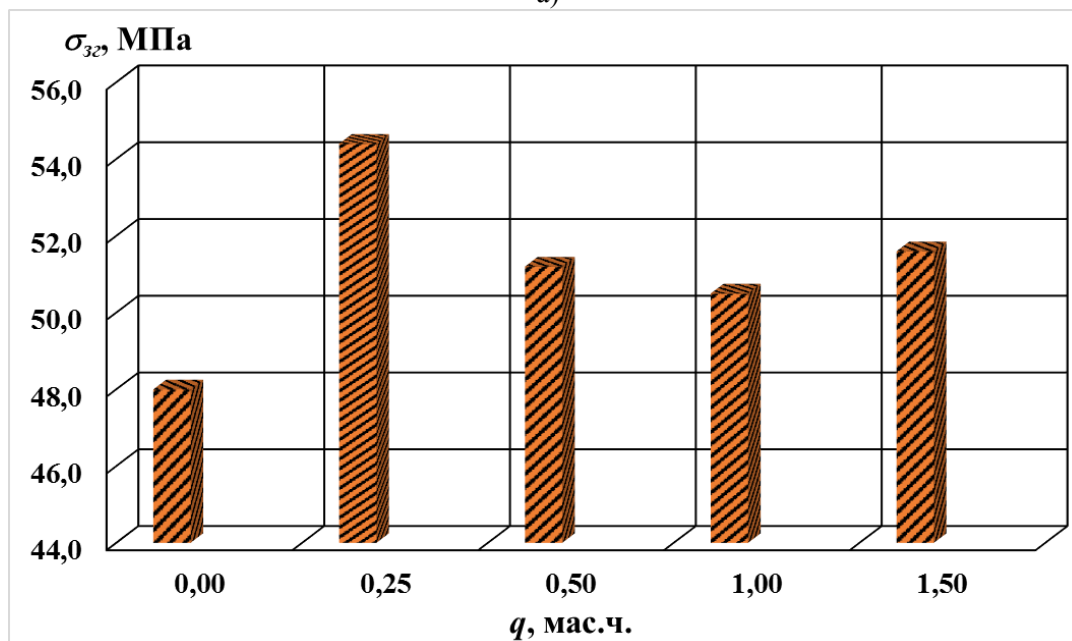
Авторами [7, 8] показано, що важливою з практичної точки зору під час експлуатації устаткування при динамічних навантаженнях є стійкість захисних покриттів до удару. Виходячи з цього, у роботі проведено дослідження ударної в'язкості розроблених матеріалів залежно від вмісту модифікатора МБМА. Показано (рис. 1, в), що максимум на кривій залежності «ударна в'язкість – вміст модифікатора» спостерігали для КМ, який містить МБМА у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. Для такого матеріалу показники ударної в'язкості порівняно з вихідною матрицею збільшуються від  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $W = 9,0$  кДж/м<sup>2</sup>. Надалі збільшення вмісту модифікатора від  $q = 0,50$  мас.ч. до  $q = 1,50$  мас.ч. призводить до монотонного зменшення показників ударної в'язкості розроблених КМ. 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 наведених вище результатів дослідження фізико-механічних властивостей КМ проводили аналіз поверхні їх руйнування після випробувань на маятниковому копрі методом оптичної мікроскопії. Показано (рис. 2, а), що поверхня зламу зразка на основі вихідної епоксидної матриці має неоднорідний характер. Фронт поширення тріщин зміщується під час ударних навантажень, що свідчить про існування напруженого стану у полімеризованому матеріалі.

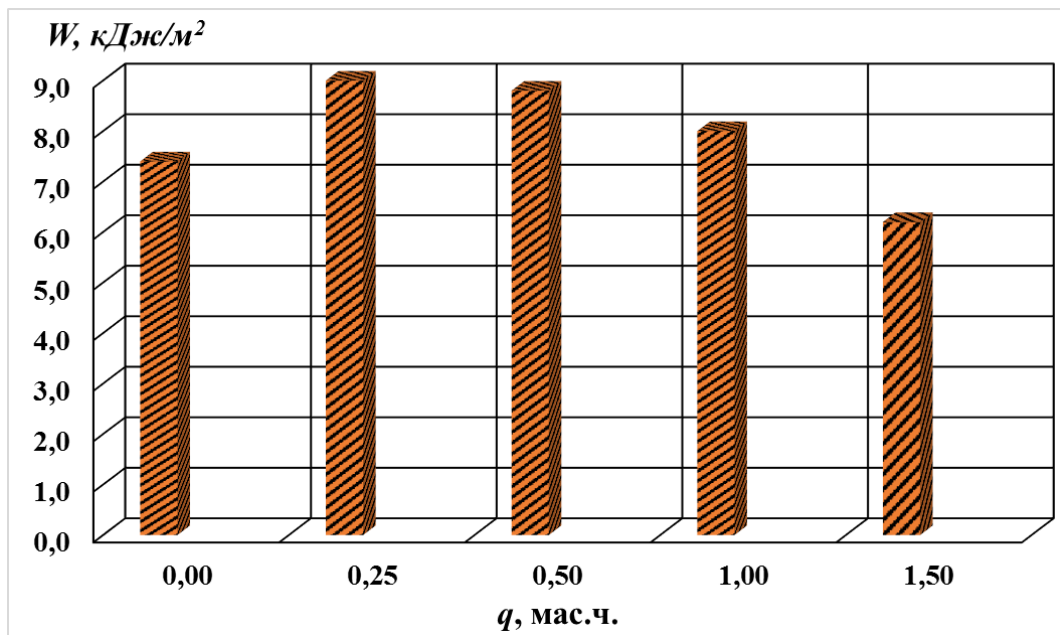
Аналіз світлини зламу КМ, наповненого модифікатором у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. (рис. 2, б) свідчить про наступне. Траєкторія поширення тріщини під час удару має зигзагоподібний характер. Можна стверджувати про формування матеріалу з високими залишковими напруженнями з одного боку, а також про підвищені когезійні властивості з іншого боку. Тобто, достатня кількість фізичних і, особливо, хімічних зв'язків у матеріалі чинить опір поширенню тріщин. У результаті фронт їх поширення змінюється у напрямі найменшого опору. Виходячи з цього, можна констатувати про формування у процесі полімеризації тривимірної сітки полімеру з високим міжмолекулярним розподілом за об'ємом, що передбачає високий ступінь зшивання даного матеріалу.



а)



б)



в)

Рис. 1. Залежність фізико-механічних властивостей і ударної в'язкості епоксидної матриці від вмісту модифікатора 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліну):

- а) модуль пружності при згинанні ( $E$ );  
 б) руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{s2}$ );  
 в) ударна в'язкість ( $W$ , кДж/м<sup>2</sup>)

Показано (рис. 2, в, г), що характер зламу зразків з КМ, наповнених модифікатором у кількості  $q = 0,50$  мас.ч. і  $q = 1,00$  мас.ч. мають приблизно однаковий характер. Траєкторія поширення тріщин є прямою, однак область руйнування КМ на кінцевому етапі є дещо зміщеною від точки удару. Це є свідченням наявності у КМ сітки з достатньо високим ступенем зшивання і густиною фізико-хімічних зв'язків, хоча не у такій кількості як у матеріалі, що містить модифікатор у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. Можна стверджувати, що такі КМ мають дещо нижчі показники когезійної міцності. Отримані дані добре узгоджуються з результатами дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів, де доведено, що максимальними показниками модуля пружності, руйнівних напружень при згинанні і ударної в'язкості відзначається матриця з модифікатором у кількості  $q = 0,25$  мас.ч.



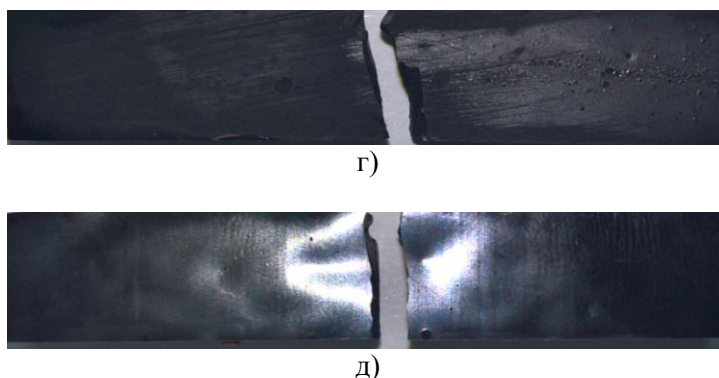
а)



б)



в)



**Рис. 2. Мікросвітлини зламу вихідної і модифікованих 4,4'-метиленбіс(2-метоксианіліном) епоксидних матриць: а) вихідна епоксидна матриця (контрольний зразок); б)  $q = 0,25$  мас.ч. модифікатора; в)  $q = 0,50$  мас.ч. модифікатора; г)  $q = 1,00$  мас.ч. модифікатора; д)  $q = 1,50$  мас.ч. модифікатора.**

Макроаналіз зразків, що містять модифікатор у кількості  $q = 1,50$  мас.ч. дозволяє стверджувати наступне. Спостерігали траєкторію поширення тріщин, яка перпендикулярна до поздовжньої осі зразка (рис. 2, д). Можна констатувати про невеликий міжмолекулярний розподіл фізико-хімічних зв'язків у об'ємі модифікованої матриці з одного боку і значний вміст золь-фракції у КМ за рахунок надмірної кількості добавки з іншого боку. Можна констатувати, що в таких КМ формується сіткова структура з рівномірним розподілом хімічних зв'язків, але із невеликою їх густиною у об'ємі матеріалу, що не дозволяє чинити достатній опір руйнуванню під час ударних навантажень.

**Висновки.** У роботі встановлено наступне.

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 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін) ( $q = 0,25$  мас.ч.). Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною модифікованою ультразвуком епоксидною матрицею підвищення наступних показників фізико-механічних властивостей композитів:

- модуля пружності при згинанні – від  $E = 2,8$  ГПа до  $E = 3,2$  ГПа;
- руйнівних напружень при згинанні – від  $\sigma_{3z} = 48,0$  МПа до  $\sigma_{3z} = 54,4$  МПа;
- ударної в'язкості – від  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $W = 9,0$  кДж/м<sup>2</sup>.

2. Методом оптичної мікроскопії доведено, що поверхня зламу вихідної матриці має неоднорідний характер. Фронт поширення тріщин зміщується під час ударних навантажень, що свідчить про існування напруженого стану у полімеризованому матеріалі. Аналіз світлини зламу композиту, наповненого модифікатором у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. свідчить про те, що траєкторія поширення тріщини під час удару має зигзагоподібний характер. Можна стверджувати про формування матеріалу з високими залишковими напруженнями з одного боку, а також про підвищені когезійні властивості з іншого боку. Тобто, достатня кількість фізичних і, особливо, хімічних зв'язків у матеріалі чинить опір поширенню тріщин. Стосовно зразків з композитів, наповнених модифікатором у кількості  $q = 0,50$  мас.ч. і  $q = 1,00$  мас.ч. слід зазначити, що траєкторія поширення тріщин є прямою, однак область руйнування матеріалів на кінцевому етапі є дещо зміщеною від точки удару. Це є свідченням наявності у композитах сітки з достатньо високим ступенем зшивання і густиною фізико-хімічних зв'язків, хоча не у такій кількості як у матеріалі, що містить модифікатор у кількості  $q = 0,25$  мас.ч.

## Література

1. Юрженко М.В., Шестопа А.М., Гохфельд В.Л., Кораб М.Г., Васильев Ю.С., Шадрін А.О., Демченко В.Л., Гусакова К.Г. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / За ред. Б.Є.Патона. – Київ : Наукова думка, 2018. – 368 с.
- Iurzhenko M., Shestopal A., Gokhfel'd V., Korab M., Vasiljev Yu., Shadrin A., Demchenko V., Gusakova K. Dictionary-handbook on welding and glueing of plastics / Ed. B. Paton. – Kyiv: Naukova dumka, 2018. – 368 p.
2. Юрженко М.В. Зварювання високотехнологічних пластмас / М.В.Юрженко, М.Г. Кораб. - Суми: Університетська книга. – 2016. – 319 с.



- Iurzhenko M. Welding of high-tech plastics / M.Iurzhenko, M.Korab. - Sumy: University book, 2016, 319 p.
3. Mamunya Ye. Electroactive polymer materials / Ye.Mamunya, M.Iurzhenko, E.Lebedev, V.Levchenko, O.Chervakov, O.Matkovska, O.Sverdlikovska, 2013, Kyiv: Alpha-Reklama, 402 p.
4. Демченко В.Л., Юрженко М.В. (Demchenko V.L., Iurzhenko M.V.) Особливості наноструктурної організації, властивості та релаксаційна поведінка зварних з'єднань поліетиленів (Features of nanostructural organization, properties, and relaxation behaviour of welded joints of polyethylenes) / В.Л. Демченко, М.В. Юрженко // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: Зб. наук. пр. (Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii). - К.: ПВВ ІМФ, 2017. - Т. 15, № 3. - С. 535-546.
5. Demchenko V.L. Structure and properties of the welded joints of single-type polyethylenes formed under the action of constant magnetic fields / V.L.Demchenko, M.V.Yurzhenko // Materials Science. – 2017. – Vol. 53, I. 2. – P. 186-193.
6. Demchenko V.L. Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene polypropylene joints / V.L.Demchenko, M.V.Yurzhenko // 2017 IEEE Nanomaterials: Applications and Properties, 2017, P. 03NNSA10-1 - 03NNSA10-3. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8190258/>
7. Buketov A.V. Nanomodified 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.
8. 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.
9. Сапронов О.О. Дослідження адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, наповнених нанотрубками / О.О. Сапронов, О.С. Рожков, О.В. Лещенко, О.С. Голотенко // Науковий вісник ХДМА, 2014. – №2(11). – С. 197-202.
10. Zhai Yu-Jun, Wang Zhi-Cai, Huang Wei et al. Improved mechanical properties of epoxy reinforced by low content nanodiamond powder // Materials Science and Engineering A. - 2011. - V.528, N 24. - P. 7295-7300.
11. Справочник по композиционным материалам / Под ред. Дж. Любина. Москва: Машиностроение, 1988. 446 с.
12. Nakamura Y., Okabe S., Iida T. Effects of particle shape, size and interfacial adhesion on the fracture strength of silica-filled epoxy resin. Polymers and Polymer Composites. - 1999. - V.7, N 3. - P. 177-186.
13. Buketov A. Investigation of thermophysical properties of epoxy Nanocomposites / A.Buketov, P.Maruschak, O.Sapronov, M.Brailo, O.Leshchenko, L.Bencheikh, A.Menou // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2016. – Vol. – 628. – P. 167-179.
14. Akimov A.V. Development of polymer composites with improved thermophysical properties for shipbuilding and ship repair / A.V. Akimov, A.V. Buketov, O.O. Sapronov, M.V. Brailo, S.V. Yakushchenko, S.A. Smetankin // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. – Vol. 10. – № 2. – 2019. – P. 117–134.
15. Buketov A.V. Optimization of components in development of polymeric coatings for restoration of transport vehicles / A.V. Buketov, M.V. Brailo, D.P. Stukhlyak, S.V. Yakushchenko, O.O. Sapronov, V.V. Cherniavskiy, V.M. Husiev, D.A. Dmitriev, V.M. Yatsyuk, O.M. Bezbakh, R.Yu. Negrutsa // Весник КарГУ. – 2018. - № 4(92). – P. 119-131.
16. Buketov A.V. Adhesive pull and shear strength of epoxy nanocomposite coatings filled with ultradispersed diamond / A.V. Buketov, N.A. Dolgov, A.A. Sapronov, V.D. Nigalatii // Strength of Materials. – 2018. – V. 50, N 3. – P. 425-431.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019