

Р.Ю. Негруца*Херсонська державна морська академія***ВПЛИВ МОДИФІКАТОРА 2,4-ДИАМІНОАЗОБЕНЗОЛ-4'-КАРБОНОВОЇ КИСЛОТИ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ**

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 поліпшеними когезійними властивостями оптимальний вміст модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонОВОЇ кислоти становить $q = 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір навантаженням ударного характеру, оскільки показники їх властивостей становлять: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 56,7$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,8$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 8,0$ кДж/м². 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.

Р.Ю. Негруца*Херсонская государственная морская академия***ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРА 2,4 ДИАМИНОАЗОБЕНЗОЛ-4'-КАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ**

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 2,4 диаминиазобензол-4'-карбонОВОЙ кислоты 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 составляет: разрушающие напряжения при изгибе – $\sigma_{изз} = 56,7$ МПа, модуль упругости при изгибе – $E = 3,8$ ГПа, ударная вязкость – $W = 8,0$ кДж/м². 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.

R.Yu. Negrutza*Kherson State Maritime Academy***INFLUENCE OF MODIFIER 2.4 DIAMINOAZOBENZENE-4'-CARBOXYLIC ACID ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES**

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 2.4 diaminoazobenzene-4'-carboxylic acid 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: bending stresses at bending – $\sigma = \sigma_{изз} = 56.7$ MPa, modulus of elasticity at bending – $E = 3.8$ GPa, impact toughness is $W = 8.0$ kJ/m². 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. Відомо [1-18], що конструкційні матеріали на полімерній основі широко використовують у вигляді виробів з підвищеними експлуатаційними характеристиками для різних галузей промисловості: нафтопереробної, газотранспортної, хімічної, легкої, машино-, верстато- і суднобудування. Актуальним на сьогодні є застосування полімерних композитів і захисних покриттів, у вигляді зв'язувачів для яких використовують епоксидні олігомери [1, 8-10]. Такі полімерні композити відрізняються поліпшеною адгезійною міцністю, підвищеними показниками фізико-механічних і теплофізичних властивостей, що дозволяє значно розширити спектр їх використання. Водночас полімерні композити мають і недоліки [2, 12]. Зокрема, вони

характеризуються підвищеними показниками залишкових напружень, термічного коефіцієнту лінійного розширення, крихкості та незначною ударною в'язкістю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами робіт [1, 8-10, 14-18] доведено, що покращити властивості епоксидних композитів можливо введенням у зв'язувач на попередній стадії формування матеріалів хімічно активних добавок. При цьому важливим є модифікування епоксидного олігомеру активними до хімічної міжфазової взаємодії у процесі зшивання матриці речовинами. Такі модифікатори навіть за незначного вмісту забезпечують високий ступінь зшивання матриці, що у подальшому передбачає формування полімерних композитних матеріалів (КМ) або захисних покриттів на її основі з необхідними і наперед заданими властивостями. У цьому плані актуальним є використання як модифікатора синтезованої нами 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти. Така добавка містить активні до хімічної взаємодії з епоксидною смолою групи, що, на наш погляд, забезпечить поліпшення когезійної міцності КМ. Виходячи з цього вважали за необхідне проведення дослідження стосовно визначення впливу концентрації вибраного модифікатора на фізико-механічні властивості розроблених епоксикомпозитів.

Мета роботи – дослідити вплив вмісту модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти 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 2,4-діаміноазобензол-4'-карбову кислоту (ДААБКК). 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 формула модифікатора: $C_{13}H_{12}N_4O_2$. Молекулярна маса ДААБКК – 256,25998. Модифікатор розчинний у полярних органічних розчинниках – метанол, етанол, ацетон, етилацетат, 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/м².

Доведено (рис. 1, крива 1), що введення модифікатора ДААБКК за незначного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) призводить до незначного зменшення модуля пружності при згинанні модифікованої матриці (від $E = 2,8$ ГПа (для вихідної але обробленої ультразвуком епоксидної матриці) до $E = 2,7$ ГПа)). Надалі збільшення вмісту добавки забезпечує монотонне зростання показників модуля пружності КМ, а максимум на кривій залежності « $E - q$ » спостерігали при концентрації модифікатора у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Такий розроблений КМ відзначається модулем пружності при згинанні – $E = 3,8$ ГПа. Введення модифікатора у кількості понад $q = 1,00$ мас.ч. призводить до погіршення досліджуваної властивості КМ, позаяк модуль пружності зменшується до $E = 3,6$ ГПа (за вмісту ДААБКК у кількості $q = 2,00$ мас.ч.).

Отримані результати можна пояснити наступним. Введення модифікатора відносно у невеликій кількості ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує формування КМ, який відзначається невисоким ступенем зшивання. Недостатня кількість модифікатора у епоксидному зв'язувачі призводить до формування матеріалу із значним вмістом золь-фракції. За наведених вище режимів зшивання матриці, на наш погляд, у гомогенній полімеризованій системі утворюються вільні незшиті радикали, які забезпечують пластичність матеріалу, але когезійні властивості погіршуються. Навпаки, при збільшенні вмісту ДААБКК до $q = 1,00...1,50$ мас.ч. формується матриця з максимальними показниками модуля пружності. Вважали, що у цьому випадку у процесі зшивання композиції задіяна максимальна кількість бокових гідроксильних і епоксидних груп епоксидного олігомеру, а також – гідроксильних, карбоксильних СООН-груп та первинних амінів $-NH_2$ 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти. У такому випадку максимально зростають показники гель-фракції розроблених матеріалів, що відповідно забезпечує підвищення їх модуля пружності при згинанні.

Аналіз результатів дослідження впливу вмісту модифікатора на руйнівні напруження при згинанні дозволяє констатувати наступне. Доведено (рис. 1, крива 2), що введення модифікатора забезпечує підвищення показників руйнівних напружень при згинанні КМ, а максимальними значеннями ($\sigma_{32} = 56,7...58,3$ МПа) характеризуються матеріали із вмістом ДААБКК у кількості $q = 0,25...1,00$ мас.ч. Надалі збільшення вмісту модифікатора призводить до погіршення властивостей матриці у діапазоні досліджуваних концентрацій добавки. Показано (рис. 1), що введення ДААБКК у кількості $q = 2,00$ мас.ч. забезпечує формування КМ з показниками руйнівних напружень, які несуттєво відрізняються від аналогічних значень для вихідної епоксидної матриці ($\sigma_{32} = 54,3$ МПа). При цьому слід зазначити, що максимумами на кривих залежності модуля пружності і руйнівних напружень при згинанні КМ від концентрації модифікатора хоч несуттєво, але відрізняються (за вмістом добавки). Зокрема, на кривій « $E - q$ » найбільші значення модуля пружності характерні для КМ, що містить ДААБКК у кількості $q = 1,00...1,50$ мас.ч., а аналіз кривої « $\sigma_{32} - q$ » дозволив встановити наступний діапазон оптимальної концентрації модифікатора – $q = 0,25...1,00$ мас.ч. Виходячи з цього і для підтвердження результатів наведених вище випробувань, на наступному етапі досліджували ударну в'язкість вихідної і модифікованих епоксидних матриць.

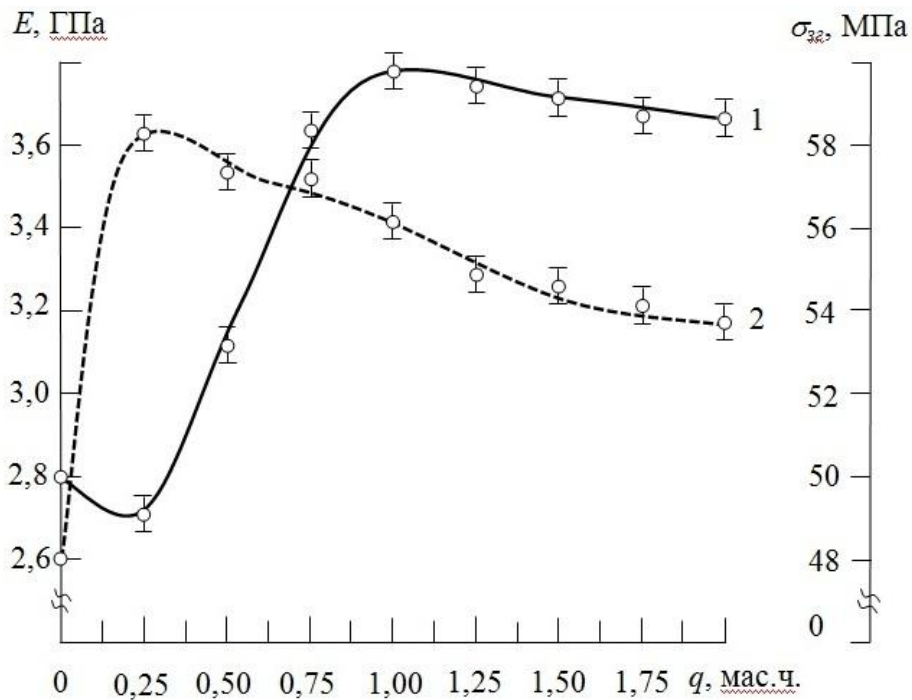


Рис. 1. Залежність фізико-механічних властивостей епоксидної матриці від вмісту модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти:
1) модуль пружності при згинанні (E);
2) руйнівні напруження при згинанні (σ_{32})

Експериментально встановлено (рис. 2), що вихідна епоксидна матриця відзначається показником ударної в'язкості, який становить $W = 7,4$ кДж/м². Введення модифікатора у кількості $q = 0,25 \dots 1,00$ мас.ч. дозволяє підвищити ударну в'язкість КМ до $W = 8,0 \dots 8,2$ кДж/м², причому максимум ($W = 8,2$ кДж/м²) спостерігали для матеріалу із вмістом ДААБКК – $q = 0,50$ мас.ч. Введення добавки у кількості $q = 1,50$ мас.ч. призводить до зменшення стійкості матриці до протидії ударним навантаженням, оскільки показники її ударної в'язкості ($W = 7,5$ кДж/м²) практично не відрізняються від аналогічних значень, характерних для вихідної матриці. Отже, можна стверджувати, що оптимальний діапазон концентрацій модифікатора для формування матриць з максимальними показниками ударної в'язкості становить $q = 0,25 \dots 1,00$ мас.ч., що повністю збігається з аналогічним вмістом ДААБКК у КМ з найвищими значеннями руйнівних напружень при згинанні.

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. 3, а), що поверхня зламу зразків вихідної епоксидної матриці має хвилеподібний характер. При цьому на зразках помітні розгалужені лінії сколювання (рис. 3, б – верхня частина світлини), а також відмічено наявність кратерів, причиною чого можуть бути повітряні включення у матеріалі, зумовлені технологічним процесом його формування. Така гетерогенність у об'ємі свідчить про формування системи з кінетично невірноваженим станом. А це, у свою чергу, дозволяє стверджувати про високі показники залишкових напружень, які виникають при полімеризації матриці. Останні призводять до підвищення крихкості матеріалу і передчасне його старіння [1].

Пологу поверхню зламу спостерігали при аналізі зразків модифікованої матриці із вмістом добавки у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Водночас слід зазначити, що фронт поширення тріщини при руйнуванні такого матеріалу під час удару майже перпендикулярний до горизонтальної осі зразка (рис. 3, в). Це свідчить про невисокі когезійні властивості КМ, що передбачає несуттєву протидію впливу зовнішнім ударним навантаженням. При цьому слід зазначити, що поверхня зламу характеризується рівномірнорозподіленою структурою, без наявних повітряних включень (рис. 3, г). Це безумовно, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, забезпечує поліпшення когезійних властивостей розробленого матеріалу.

Розгалужений фронт поширення тріщин спостерігали при аналізі поверхні світлин зламів зразків епоксикомпозитів із вмістом модифікатора – $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. (рис. 3, д, е). Криволінійна траєкторія поверхонь зламів свідчить про підвищену когезійну міцність КМ, а тривимірні сітки хімічних зв'язків макромолекул епоксидного олігомеру і модифікатора зменшують час поширення тріщин і збільшують шлях їх поширення (рис. 3, е, ж). Відповідно, такі матеріали характеризуються підвищеними показниками не лише ударної в'язкості, але й руйнівних напружень при згинанні (рис. 1, рис. 2).

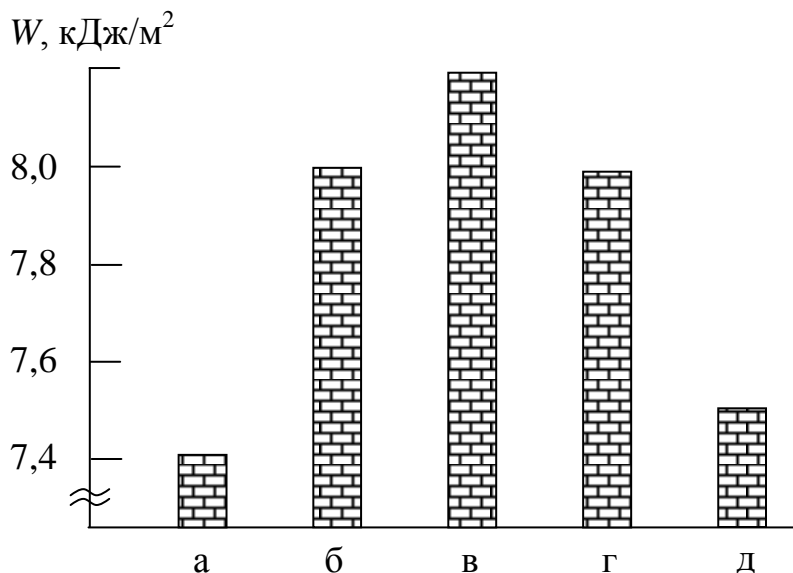


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості (W) від вмісту (q) модифікатора 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислоти у матриці: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,25$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 1,50$ мас.ч.

Аналіз поверхні світлин зламів КМ, модифікованого ДААБКК у кількості $q = 1,50$ мас.ч. також свідчить про лінійний і перпендикулярний до горизонтальної осі зламів характер поширення тріщин (рис. 3, з, і). Під час удару спостерігали руйнування зразків з утворенням значної кількості уламків невеликого об'єму (рис. 3, з), поверхня зламів характеризується глибокими тріщинами (рис. 3, і). Наведені вище результати аналізу дозволяють стверджувати про формування крихкого матеріалу при його полімеризації, що забезпечує підвищення його модуля пружності, але показники руйнівних напружень і ударної в'язкості є не достатньо високими (рис. 1, рис. 2).

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'-діаміноазобензол-4'-карбонову кислоту ($q = 0,5 \dots 1,0$ 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 $E = 3,2 \dots 3,8$ ГПа;
- руйнівних напружень при згинанні – від $\sigma_{z2} = 48,0$ МПа до $\sigma_{z2} = 56,7 \dots 57,0$ МПа;
- ударної в'язкості – від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 8,0 \dots 8,2$ кДж/м².



а) $\times 3$



б) $\times 3$

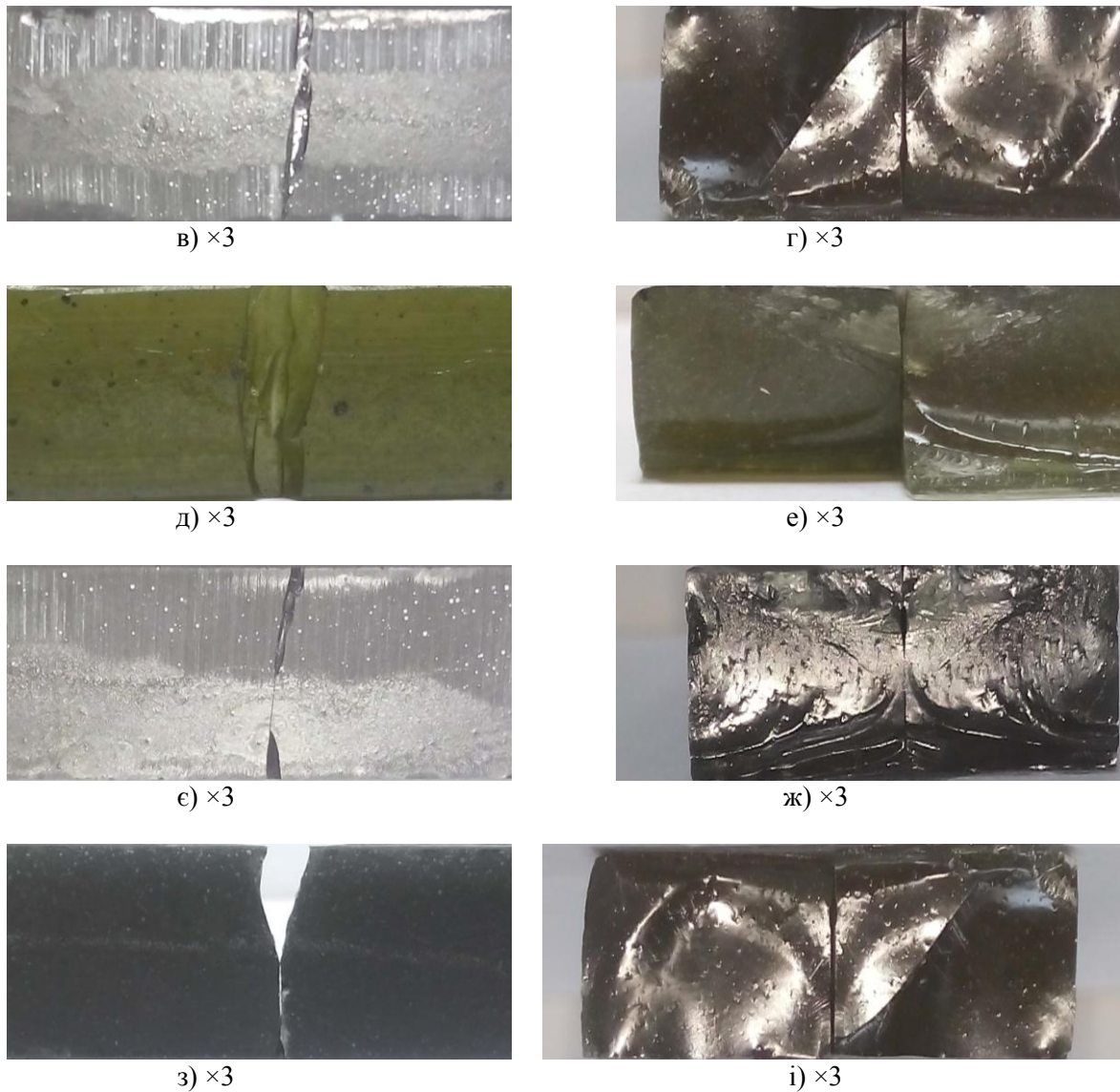


Рис. 3. Мікросвітлини зламу вихідної і модифікованих 2,4-діаміноазобензол-4'-карбоною кислотою епоксидних матриць:

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.

2. Методом оптичної мікроскопії встановлено, що поверхня зламу зразків вихідної епоксидної матриці має хвилеподібний характер. При цьому на зразках помітні розгалужені лінії сколювання, відмічено наявність кратерів, причиною чого можуть бути повітряні включення у матеріалі, зумовлені технологічним процесом його формування. Пологу поверхню зламу спостерігали при аналізі зразків модифікованої матриці із вмістом добавки у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Водночас слід зазначити, що фронт поширення тріщини при руйнуванні такого матеріалу під час удару майже перпендикулярний до горизонтальної осі зразка. Це свідчить про невисокі когезійні властивості КМ, що передбачає несуттєву протидію впливу зовнішнім ударним навантаженням. Розгалужений фронт поширення тріщин спостерігали при аналізі поверхні світлини зламу зразків епоксикомпозитів із вмістом модифікатора – $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. Криволінійна траєкторія поверхонь зламу свідчить про підвищену когезійну міцність КМ, а тривимірна сітка хімічних зв'язків макромолекул епоксидного олігомера і модифікатора зменшує час поширення тріщин і збільшує шлях їх поширення. Отже, можна констатувати, що результати

дослідження методом оптичної мікроскопії добре узгоджуються і підтверджують результати випробувань фізико-механічних властивостей розроблених матеріалів.

Література

1. Стухляк П.Д. Епоксидні композити. Дослідження механізму впливу технології формування на властивості / А.В.Букетов, В.В. Левицький // Хімічна промисловість України.-2004.-№5.-С.17-23.
2. Юрженко М.В., Шестопал А.М., Гохфельд В.Л., Кораб М.Г., Васильєв 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.
3. Iurzhenko M., Shestopal A., Gokhfeld 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.
4. Юрженко М.В. Зварювання високотехнологічних пластмас / М.В.Юрженко, М.Г. Кораб. - Суми: Університетська книга. – 2016. – 319 с.
5. Iurzhenko M. Welding of high-tech plastics / M.Iurzhenko, M.Korab. - Sumy: University book, 2016, 319 p.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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/>
10. Букетов А.В. Перспективы и проблемы разработки новых полимерных композитных материалов для судостроения Украины / А.В.Букетов, В.Л.Алексенко, В.А.Настасенко, Т.И.Ивченко, В.Д.Михайлик, Д.А.Наговский // Наукові нотатки.-Луцьк: ЛНТУ. – 2013. - Випуск 40.- С. 27-32.
11. Букетов А.В. Прогнозування властивостей гетерогенних композитних систем з використанням методів математичного програмування / А.В. Букетов, Л.В.Кравцова, А.П. Пірог // Проблеми інформаційних технологій. – 2012. – №1(011). – С. 95 – 99.
12. Букетов А.В. Вплив природи наповнювачів, що є відходами промислового виробництва, на фізико-механічні і теплофізичні властивості епоксидних композитних матеріалів / А.В.Букетов, В.О.Скирденко // Наукові нотатки.-Луцьк: ЛНТУ. -2013. -Випуск 43.- С. 28-34.
13. Zhai Yu-Jun. Improved mechanical properties of epoxy reinforced by low content nanodiamond powder / Yu-Jun Zhai, Zhi-Cai Wang, Wei Huang et al. // Materials Science and Engineering A. - 2011. - V.528, N 24. - P. 7295-7300.
14. Справочник по композиционным материалам / Под ред. Дж. Любина. - М: Машиностроение, 1988. - 446 с.
15. Nakamura Y. Effects of particle shape, size and interfacial adhesion on the fracture strength of silica-filled epoxy resin / Y.Nakamura, S.Okabe// Polymers and Polymer Composites. - 1999. - V.7, N 3. - P. 177-186.
16. Кравцова Л.В. Определение вероятностей напряженного состояния эпоксидных композитных материалов под воздействием статической нагрузки /Л.В.Кравцова, А.В.Букетов, А.П. Пирог // Искусственный интеллект. – 2013. - № 3 (61). – С. 355 - 363.
17. 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. – 2019. – Vol. 10. – № 2. – P. 117-134.
18. 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.
19. Кравцова Л.В. Определение вероятностей восстановления и разрушения полимерных композитных материалов под действием статической загрузки / Л.В.Кравцова, А.П.Пирог, А.В.Букетов // Наукові нотатки.-Луцьк: ЛНТУ. - 2013. - Випуск 43. - С. 126-134.
20. Старцев В.О. Взаимосвязь деформативности и фрактографических характеристик поверхности разрушения эпоксидных полимеров / В.О. Старцев, М.П. Лебедев, А.С. Фролов, Т.А. Низина // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 55-58.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2019