

УДК 667.64:678.026

А.В. Букетов, М.В. Браїло, О.С. Кобельник, С.В. Якущенко, А.В. Сапронова
Херсонська державна морська академія

РОЗРОБЛЕННЯ ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНОЇ МАТРИЦІ З ПОЛІПШЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

У роботі наведено результати дослідження фізико-механічних властивостей композитних матеріалів на основі епоксидного олігомеру ЕД-20 із введенням різного вмісту поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL. Встановлено, що максимальними показниками фізико-механічних властивостей відрізняється композит за вмісту $q = 20$ мас.ч. поліефірної смоли на $q = 100$ мас.ч. епоксидного олігомеру. При цьому модуль пружності при згинанні становить $E = 3,6$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{z2} = 50,2$ МПа, ударна в'язкість – $W = 8,3$ кДж/м². Додатково оптичним методом досліджено поверхні зламу композитних матеріалів за різного вмісту поліефіру та констатовано виражений напружений стан матеріалу композиту за вмісту $q = 20$ мас.ч.

Ключові слова: епоксидний олігомер, поліефірна смола, епокси-поліефірна матриця, композитний матеріал, фізико-механічні властивості

А.В. Букетов, Н.В. Браило, О.С. Кобельник, С.В. Якущенко, А.В. Сапронова
Херсонская государственная морская академия

РАЗРАБОТКА ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНОЙ МАТРИЦЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ВОСТАНОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

В работе приведены результаты исследования физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидного олигомера ЭД-20 с введением различного содержания полиэфирной смолы Norsodyne O 12335 AL. Установлено, что максимальными показателями физико-механических свойств отличается композит при содержании $q = 20$ мас.ч. полиэфирной смолы на $q = 100$ мас.ч. эпоксидного олигомера. При этом модуль упругости при изгибе составляет $E = 3,6$ ГПа, разрушающие напряжения при изгибе – $\sigma_{из2} = 50,2$ МПа, ударная вязкость – $W = 8,3$ кДж/м². Дополнительно оптическим методом исследованы поверхности излома композитных материалов с различным содержанием полиэфира и установлено выраженное напряженное состояние материала композита при содержании $q = 20$ мас.ч.

Ключевые слова: эпоксидный олигомер, полиэфирная смола, эпоксидно-полиэфирная матрица, композитный материал, физико-механические свойства

A.V. Buketov, M.V. Brailo, O.S. Kobelnik, S.V. Yakushchenko, A.V. Saproнова
Kherson State Maritime Academy

THE DEVELOPMENT OF EPOXY-POLYESTER MATRIX WITH IMPROVED PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES FOR THE RECOVERY OF TRANSPORT VEHICLES

The study of physical and mechanical properties of a composite material on the basis of an epoxy oligomer ED-20 with the introduction of various contents of the orthophthalic unsaturated pre-accelerated polyester resin Norsodyne O 12335 AL is shown in the work. It is proved that the maximum values of physical and mechanical properties among the studied materials have a composite at a content of $q = 20$ pts.wt. of polyester resin Norsodyne O 12335 AL on the $q = 100$ pts.wt. of epoxy oligomer ED-20. The developed epoxy-polyester matrix has the following improved properties: elasticity modulus at bending – $E = 3.6$ GPa, fracture stresses at bending – $\sigma_{fr} = 50.2$ MPa, and impact strength – $W = 8.3$ kJ/m². In addition, the surface of the fracture of composite materials at different contents of polyester resin Norsodyne O 12335 AL was studied by optical method. It is analyzed, the high-stressed state of the surface of the fracture when the material is destroyed with contents $q = 10 \dots 40$ pts.wt. of polyester component. It is stated, the expressed stressed state of the surface of the composite fracture at the contents of $q = 20$ pts.wt. of polyester resin.

Key words: epoxy oligomer, polyester resin, epoxy-polyester matrix, composite material, physical and mechanical properties.

Постановка проблеми. На сьогодні питання розробки та застосування композитних матеріалів є актуальним та широко розповсюдженим [1-4]. Одним із важливих напрямків є захист, відновлення або заміна металевих деталей, конструкцій та механізмів на матеріали, які відрізняються відносно низькою вартістю, простими умовами формування, низькими масовими показниками та підвищеними експлуатаційними характеристиками [3-7]. У даному напрямку широко застосовують полімерні матеріали, зокрема реактопласти [5-12]. Перевагою використання реактопластичних матриць є можливість прогнозування їх властивостей та керований вплив на прогнозування їх властивостей за допомогою введення різних добавок (пластифікаторів, модифікаторів, наповнювачів різної природи) [5-7, 9-15]. Водночас, слід зазначити, що розвиток сучасної промисловості постійно підвищує вимоги до полімерів. Тому актуальним і перспективним є розробка нових полімерних матриць, які будуть відрізнятися поліпшеними показниками експлуатаційних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [5, 6, 9, 13, 16], що на сьогодні широко використовують композитні матеріали на основі епоксидного зв'язувача. Епоксикомпозитні матеріали відрізняються простотою формування, відносно невисокою вартістю та стійкими показниками фізико-механічних властивостей [9, 11-13]. Зокрема, також широко розповсюджені полімерні матеріали на основі поліефірних смол, які характеризуються значною швидкістю полімеризації, стійкістю до агресивних середовищ, підвищеними адгезійними і фізико-механічними властивостями [10, 14-18]. При застосуванні полімерних матеріалів у промисловості постає вибір між поліефірними смолами та епоксидними [16-20]. Зокрема, є цікавим і актуальним поєднання двох смол різної природи і рекомендованих для них твердників у одному зв'язувачі. У попередніх роботах було досліджено вплив вмісту поліефірної смоли в епоксидному зв'язувачі на адгезійні властивості композитного матеріалу та встановлено оптимальний склад компонентів [20]. Зокрема важливим і цікавим є розроблення епокси-поліефірної матриці з поліпшеними фізико-механічними властивостями, що дозволить поєднати переваги двох компонентів в одному композиті і розширити її подальше використання у різних галузях промисловості.

Мета роботи – розробити епокси-поліефірні композитні матеріали (КМ) з поліпшеними фізико-механічними властивостями для відновлення та підвищення надійності засобів транспорту.

Матеріали та методика дослідження.

З метою формування матриці для КМ з поліпшеними фізико-механічними властивостями використовували наступні інгредієнти.

1. Як основний компонент для зв'язувача вибрано низькомолекулярний епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.). Слід зазначити, що молекули епоксидних олігомерів містять гліцидилові та епоксидні групи, які здатні, взаємодіючи з твердником, формувати зшити структуру в матеріалах у вигляді сітки [2].

2. Ортофталева ненасичена передприскорена літтева поліефірна смола (ПС) Norsodyne O 12335 AL.

3. Твердник холодного тверднення епоксидних смол поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78).

4. Твердник для поліефірних смол – Бутанокс-М50 (Butanox-M50), що є пероксидом метилетилкетону (МЕКП).

З метою визначення оптимального співвідношення між концентрацією епоксидної та поліефірної смол у зв'язувачі досліджували фізико-механічні властивості КМ. Співвідношення концентрації поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL змінювали у межах: $q = (0 \dots 120)$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру марки ЕД-20. Концентрацію твердників у композиціях та температуру зшивання встановлено відповідно до попередніх результатів дослідження.

У роботі проведено дослідження наступних фізико-механічних властивостей КМ: модуль пружності, руйнівні напруження при згинанні та ударна в'язкість.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно 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 допомогою маятникового копра згідно методу Шарпі (ГОСТ 4647-80). Визначали робочий кут відхилення маятника після руйнування зразка при наперед заданому початковому куті підйому робочого тіла установки. Дослідження проводили за температури $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з розміром: $l \times b \times h = (65 \times 12 \times 12) \pm 0,5$ мм.

Додатково досліджували структуру зламу КМ фотокамерою із розширювальною здатністю 13 Mega Pixels при збільшенні в $\times 2$ рази. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

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

Результати досліджень та їх обговорення.

За попередніми результатами досліджень [20] було встановлено, що для формування полімерної матриці з поліпшеними адгезійними властивостями необхідно використовувати у комплексі наступні компоненти: епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.) +

поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL ($q = 100$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20) + твердник ПЕПА ($q = 10$ мас.ч. на 100 мас.ч. ЕД-20) + твердник для поліефірних смол – Butanox-M50 ($q = 1$ мас.ч. на 100 мас.ч. Norsodyne O 12335 AL) [20]. У той же час цікавим і актуальним є дослідити вплив вмісту поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL в епоксидному олігомері ЕД-20 на фізико-механічні властивості КМ.

При дослідженні впливу вмісту поліефірної смоли (ПС) Norsodyne O 12335 AL в епоксидному олігомері ЕД-20 на адгезійні властивості полімеру за основу брали загальновідомі співвідношення концентрацій системи «смола-твердник» [4, 5, 7, 8, 20]: для епоксидного олігомеру ЕД-20 (100 мас.ч) необхідно вводити $q = 10$ мас.ч. твердника ПЕПА; оптимальний вміст твердника на основі перекису метилетилетилкетону у поліефірній смолі становить $q = 1$ мас.ч. (ГОСТ 22181-91). Тому далі для формування матеріалу з поліпшеними фізико-механічними властивостями на основі епоксидної та поліефірної смол було встановлено наступну послідовність гідродинамічного суміщення:

1. Епоксидний олігомер ЕД-20 – $q = 100$ мас.ч.;
2. Поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL – вміст змінювали у діапазоні $q = 0 \dots 120$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру;
3. Твердник для поліефірних смол Butanox-M50 – $q = 1$ мас.ч. на 100 мас.ч. поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL;
4. Твердник ПЕПА – $q = 10$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру.

На початковому етапі досліджували вплив вмісту поліефірного зв'язувача на показники модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні КМ (рис. 1).

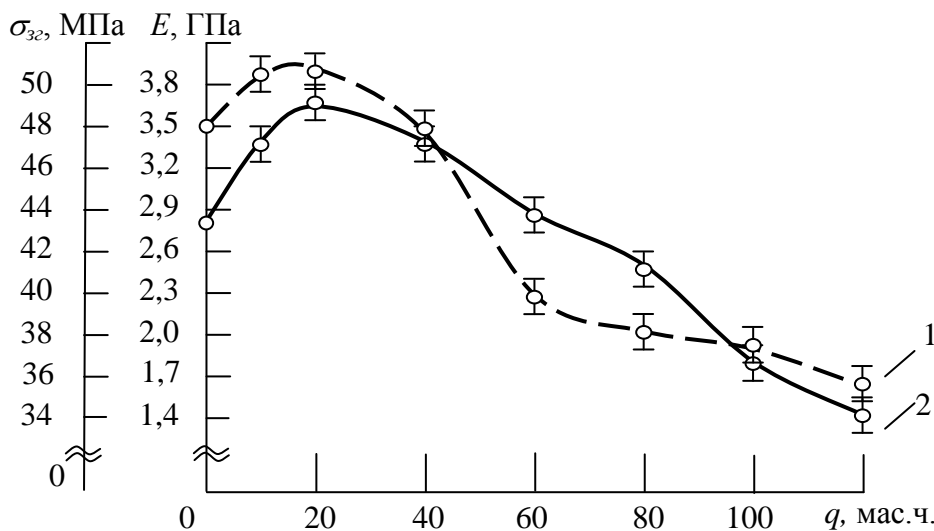


Рис. 1. Залежність фізико-механічних властивостей матриці від вмісту в епоксидному олігомері ЕД-20 поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL: 1 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32}); 2 – модуль пружності при згинанні (E).

Встановлено, що при введенні поліефірної смоли у епоксидний олігомер фізико-механічні властивості КМ змінюються (рис. 1). Підвищення показника модуля пружності при згинанні спостерігали вже за вмісту $q = 10 \dots 20$ мас.ч. ПС – від $E = 2,8$ ГПа (для вихідної епоксидної матриці) до $E = 3,3 \dots 3,6$ ГПа (рис. 1, крива 1). Максимальними значеннями модуля пружності відрізняється КМ за вмісту $q = 20$ мас.ч. ($E = 3,6$ ГПа). Очевидно, що взаємодія хімічних елементів епоксидного і поліефірного зв'язувачів в комплексі з твердниками приводить до підвищення активності їх функціональних груп. Це забезпечує при хімічних реакціях підвищення ступеня зшивання композиту. Підтвердженням цьому є подібність динаміки показників руйнівних напружень при згинанні при введенні поліефірної смоли у кількості $q = 10 \dots 20$ мас.ч. При цьому показники підвищуються від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{32} = 50,2$ МПа.

Подальше збільшення вмісту ПС в епоксидному зв'язувачі призводить до зниження показників модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні КМ. Значення модуля пружності при згинанні поступово зменшуються від $E = 3,6$ ГПа до $E = 1,5$ ГПа (за вмісту $q = 120$ мас.ч. ПС). Очевидно, що перенасичення ортофталевих кислот, на основі якої виготовлена Norsodyne O 12335 AL, в епоксидному олігомері призводить до погіршення перебігу процесів

зшивання, і, як наслідок, до зниження показників фізико-механічних властивостей КМ. При цьому значення руйнівних напружень при згинанні знижуються від $\sigma_{3z} = 50,2$ МПа до $\sigma_{3z} = 36,2$ МПа.

Далі досліджували ударну в'язкість КМ сформованих при введенні поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL за різного вмісту (рис. 2). Встановлено, що введення поліефірної смоли у діапазоні концентрацій $q = 10 \dots 50$ мас.ч. дозволяє підвищити показники ударної в'язкості КМ порівняно з вихідною епоксидною матрицею. Затрата енергії на руйнування матеріалів збільшується. При цьому максимальне значення ударної в'язкості має КМ за вмісту $q = 20$ мас.ч. Показники зростають від $W = 7,6$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $W = 8,3$ кДж/м². Подальше збільшення вмісту ПС в епоксидному олігомері призводить до монотонного зниження показників ударної в'язкості. При цьому у діапазоні концентрацій $q = 40 \dots 60$ мас.ч. значення відрізняються несуттєво і становлять $\approx W = 7,8$ кДж/м², що є несуттєво вищими порівняно з матрицею. Однак, при подальшому збільшенні вмісту добавки від $q = 60$ мас.ч. до $q = 120$ мас.ч. показники суттєво знижуються до значення $W = 7,1$ кДж/м² (за вмісту ПС у кількості $q = 120$ мас.ч.). Слід зазначити, що отримані результати дослідження ударної в'язкості епокси-поліефірної матриці корелюють із попередніми отриманими даними показників модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні. Це підтверджує припущення про активацію хімічних реакцій між ЕД-20 і ПС внаслідок наявності поліефірних груп та ортофталевих кислот при зшиванні КМ.

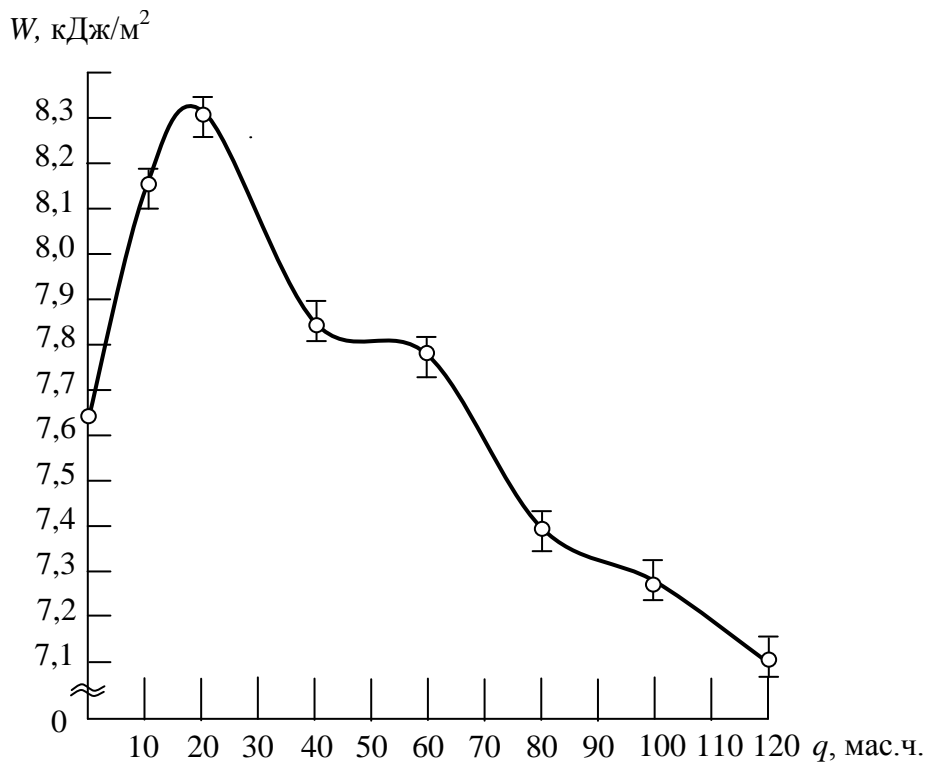


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості (W) матриці від вмісту в епоксидному олігомері ЕД-20 поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL

Отже, відповідно до отриманих результатів фізико-механічних досліджень (модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні, ударної в'язкості) встановлено, що поліпшеними властивостями відрізняється композит за вмісту поліефірної смоли $q = 20$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. При цьому значення модуля пружності при згинанні розробленого матеріалу становить $E = 3,6$ ГПа, руйнівних напружень при згинанні – $\sigma_{3z} = 50,2$ МПа, а ударної в'язкості – $W = 8,3$ кДж/м².

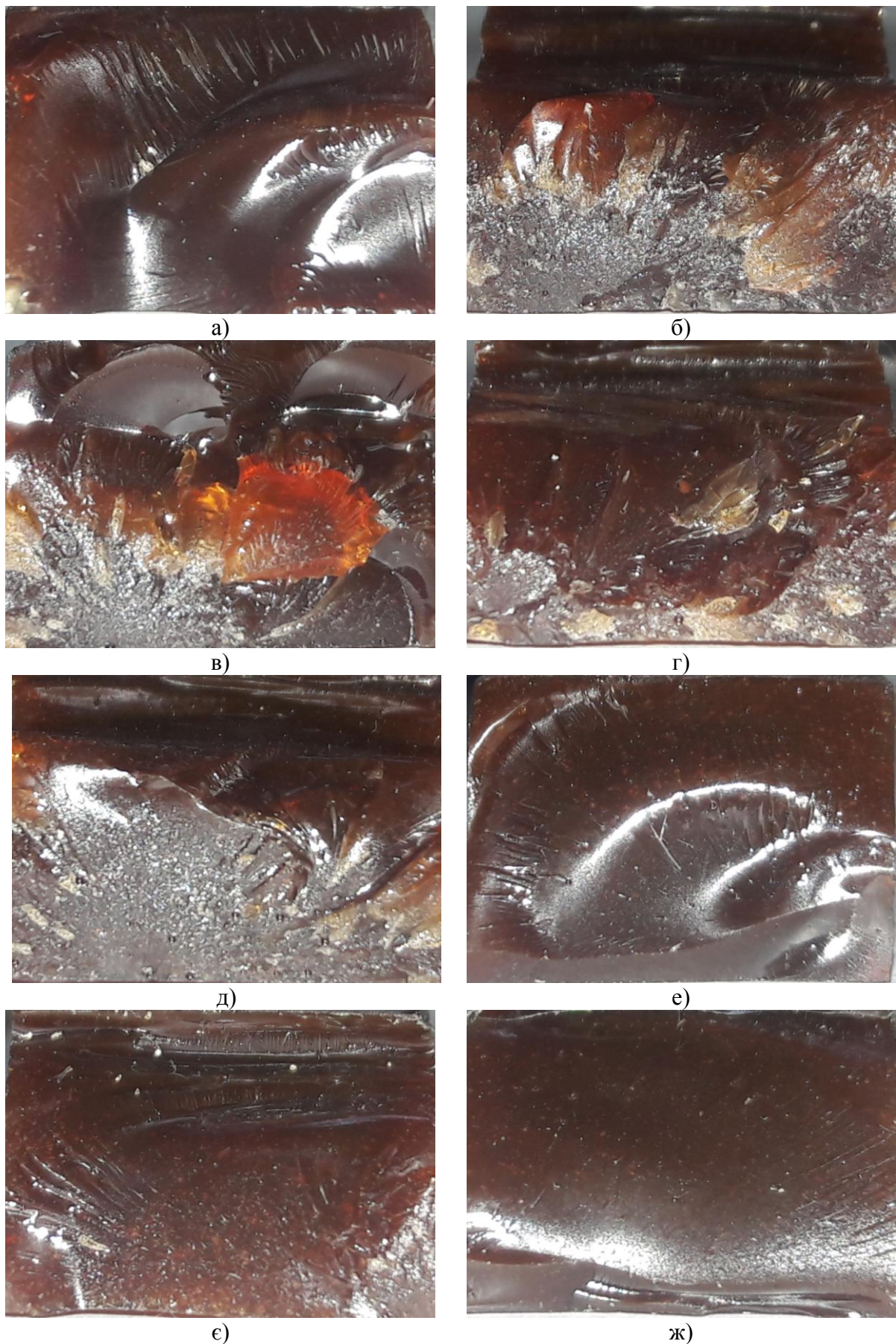


Рис. 3. Фрактограми зламу КМ, сформованих на основі епоксидного олігомеру ЕД-20 з введенням поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL за різного вмісту: а) вихідна матриця; б) $q = 10$ мас.ч.; в) $q = 20$ мас.ч.; г) $q = 40$ мас.ч.; д) $q = 60$ мас.ч.; е) $q = 80$ мас.ч.; є) $q = 100$ мас.ч.; ж) $q = 120$ мас.ч.

На наступному етапі досліджували поверхню зламу КМ з різним вмістом поліефірної смоли оптичним методом з використанням фотокамери з розширювальною здатністю 13 Mega Pixels при збільшенні в $\times 2$ рази (рис. 3).

Отже, проаналізувавши світлини зламу поверхонь КМ із різним вмістом ПС у комбінованому зв'язувачі стверджували, що отримані попередні результати дослідження фізико-механічних властивостей композитів корелюють із динамікою поширення тріщин при їх руйнуванні. Помітно існування високонапруженого стану композитів за вмісту ПС у кількості $q = 10 \dots 40$ мас.ч. у епоксидному зв'язувачі. Зокрема, яскраво виражена сітка тріщин для КМ з максимальними значеннями модуля пружності, руйнівних напружень при згинанні і ударної в'язкості. Результати дослідження поверхонь зламу свідчать про достовірність отриманих попередньо результатів фізико-механічних досліджень КМ.

Висновки. За отриманими результатами експериментальних досліджень можна констатувати наступне.

1. Доведено, що введення поліефірної смоли в епоксидний олігомер впливає на показники фізико-механічних властивостей епокси-поліефірного композитного матеріалу. Встановлено, що поліпшеними властивостями відрізняються композити за вмісту $q = 20$ мас.ч. поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL на $q = 100$ мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. При цьому значення модуля пружності при згинанні становить $E = 3,6$ ГПа, руйнівних напружень при згинанні – $\sigma_{z_2} = 50,2$ МПа, а ударної в'язкості – $W = 8,3$ кДж/м².

2. Методом оптичної мікроскопії досліджено поверхні зламу композитних матеріалів із різним вмістом поліефірної смоли у епоксидній матриці та доведено, що динаміка поширення тріщин на поверхнях полімерних зразків після їх руйнування корелює із показниками фізико-механічних властивостей. Констатовано існування високонапруженого стану у композитах, що містять поліефірну смолу у кількості $q = 10 \dots 40$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного зв'язувача. Виявлено наявність вираженого напруженого стану матеріалу за вмісту $q = 20$ мас.ч. поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL в епоксидному олігомері ЕД-20, при якому отримано максимальні значеннями модуля пружності, руйнівних напружень при згинанні і ударної в'язкості.

Література

1. Chausov, M., Pylypenko, A., Berezin, V., Volyanska, K., Maruschak, P., Hutsaylyuk, V., Markashova, L., Nedoseka, S., & Menou, A. (2018). Influence of dynamic non-equilibrium processes on strength and plasticity of materials of transportation systems. *Transport*, 33(1), 231-241. <https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1301549>
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др.; под ред. Берлина А. А. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
3. E. Dulebová et al., "Analysis of the Mechanical Properties Change of PA6/MMT Nanocomposite System after Ageing", *Key Engineering Materials*, Vol. 756, pp. 52-59, 2017
4. B. Duleba et al., "Possibility of Increasing the Mechanical Strength of Carbon/Epoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes", *Materials Science Forum*, Vol. 818, pp. 299-302, 2015.
5. 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. – 628:1. – P. 167-179. (DOI:10.1080/15421406.2015.1137122)
6. *Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites* / C. Salom, M.G. Prolongo, A. Toribio, A.J. Martínez-Martínez, I. Aguirre de Cárcer and S.G. Prolongo // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.12.004>
7. Buketov A.V. Tribological properties of the epoxy composites filled with dispersed particles and thermoplastics / A.V. Buketov, M.V. Brailo, O.S. Kobel'nyk, O.V. Akimov // *Materials Science*. – Vol. 52, Number 1. – 2016. – P.25-32. (DOI: 10.1007/s11003-016-9922-4)
8. Яковенко Т. Т. Модифікація ненасиченої поліефірної смоли полімерними додатками / Т. Т. Яковенко, Т. Г. Бабаханова, І. В. Слімаковський // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. – 2004. – № 516: Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 178-181.
9. Букетов А.В. Епоксидні нанокompозити: монографія / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, В.Л. Алексенко. – Херсон: ХДМА, 2015. – 184 с.
10. B. Mehta, Linchon & K. Wadgaonkar, Kunal & Jagtap, Ramanand. (2018). Synthesis and characterization of high bio-based content unsaturated polyester resin for wood coating from itaconic acid: Effect of various reactive diluents as an alternative to styrene. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 1-10. 10.1080/01932691.2018.1480964.
11. Buketov A.V. Tribological properties of epoxy composite materials for marine and river transport / A.V. Buketov, P.O. Maruschak, N.V. Brailo, A.V. Akimov, O.S. Kobel'nik, and S.V. Panin // *Advanced Materials*

with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2016 AIP Conf. Proc. Vol. 1783., Tomsk, Russia, 2016. – P. 020020-1–020020-5 (DOI: 10.1063/1.4966313)

12. Buketov A.V. Impact toughness of nanocomposite materials filled with fullerene C60 particles / A.V. Buketov, A.A. Saprionov, N.N. Buketova, M.V. Brailo, P.O. Marushak, S.V. Panin, M.Yu. Amelin // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. – Vol. 9(2). – 2018. – P. 157–177 (DOI: 10.1615/CompMechComputApplIntJ.v9.i2.30)

13. Nehal A. Salahuddin, Maged El- Kemary and Ebtisam M. Ibrahim, High- performance flexible epoxy/ZnO nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties, Polymer Engineering & Science, 57, 9, (932-946), (2017).

14. Abouzahr S., Wilkes G.L. Structure property studies of polyester- and polyether-based MDI–BD segmented polyurethanes: Effect of one- vs. two-stage polymerization conditions / S. Abouzahr, G.L. Wilkes, // J. Appl. Polym. Sci. – 1984. – Vol. 29. – Issue 9. – pp. 2695–2711. <http://dx.doi.org/10.1002/app.1984.070290902>

15. Wang H. Mechanical properties of poly(lactic acid) and wheat starch blends with methylenediphenyl diisocyanate / H. Wang, X. Sun, P. Seib. // J. Appl. Polym. Sci. – 2002. – Vol. 84. – pp. 1257–1262. <http://dx.doi.org/10.1002/app.10457>

16. Brailo M. The Investigation of Tribological Properties of Epoxy-Polyether Composite Materials for Using in the Friction Units of Means of Sea Transport / M. Brailo, A. Buketov, S. Yakushchenko, O. Saprionov, V. Vynar, O. Kobelnik // Materials Performance and Characterization. – Vol. 7. – № 1. – 2018. – pp. 275–299. (<https://doi.org/10.1520/MPC20170161>)

17. Buketov A. The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical properties for restoration of means of sea and river transport / A.V. Buketov, M.V. Brailo, S.V. Yakushchenko, O.O. Saprionov, S.O. Smetankin // Journal of Marine Engineering & Technology. – № . – 2018. – pp. (<https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>)

18. Buketov A. Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport / A. Buketov, M. Brailo, S. Yakushchenko, A. Saprionova // Advances in Materials Science and Engineering. – Vol. 2018, Article ID 6378782, 6 pages, 2018. (<https://doi.org/10.1155/2018/6378782>)

19. Buketov A.V. Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions / A.V. Buketov, O.O. Saprionov, M.V. Brailo, P.O. Maruschak, S.V. Yakushchenko, S.V. Panin, V.D. Nigalatiy // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – Vol. . – № . – 2018. – pp. . (DOI: 10.1080/15376494.2018.1495788)

20. Браїло М.В. Розроблення епоксиполіефірної матриці з поліпшеними адгезійними властивостями для підвищення надійності експлуатації деталей суднових енергетичних установок / М.В. Браїло // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2015. – № 2 (13). – С. 135-140.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2019