

УДК 667.64:678.026

А.В. БУКЕТОВ, А.Г. КУЛІНІЧ, В.М. ГУСЕВ, С.О.СМЕТАНКІН

Херсонська державна морська академія

В.М. ЯЦЮК

Тернопільський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

ВПЛИВ МОДИФІКАТОРА 4-АМІНОБЕНЗОЙНОЇ КИСЛОТИ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Епоксидні композитні матеріали отримали широке застосування в судно- та машинобудуванні, а також в інших галузях промисловості, які постійно висувають вимоги щодо покращення техніко-експлуатаційних характеристик виробів на основі полімерів. У статті проаналізовано зміни фізико-механічних показників та структури композиційних систем на основі епоксидного олігомеру ЕД-20 залежно від вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти. Експериментально обґрунтовано вплив модифікатора на фізико-механічні властивості досліджуваних композитів. Встановлено, що введення 4-амінобензойної кислоти приводить до збільшення показників руйнівних напружень і модуля пружності при згинанні. Додатково доведено покращення показників ударної в'язкості за незначного вмісту модифікатора. Методом оптичної мікроскопії проведено аналіз структури зламу досліджуваних матеріалів з метою вивчення впливу модифікатора, за різного його вмісту, на крихкість, міцність, в'язкість та еластичність епоксидних композитних матеріалів.

Ключові слова: епоксидні олігомери, модифікатор, ударна в'язкість, руйнівні напруження, модуль пружності, структура.

А.В. БУКЕТОВ, А.Г. КУЛІНІЧ, В.Н. ГУСЕВ, С.О.СМЕТАНКІН

Херсонская государственная морская академия

В.Н. ЯЦЮК

Тернопольский научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр МВД Украины

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРА 4-АМИНОБЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ НА ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Эпоксидные композитные материалы получили широкое применение в судо- и машиностроении, а также в других отраслях промышленности, которые постоянно выдвигают требования по улучшению технико-эксплуатационных характеристик изделий на основе полимеров. В статье проанализированы изменения физико-механических показателей и структуры композиционных систем на основе эпоксидного олигомера ЭД-20 в зависимости от содержания модификатора 4-аминобензойной кислоты. Экспериментально обосновано влияние модификатора на физико-механические свойства исследуемых композитов. Установлено, что введение 4-аминобензойной кислоты приводит к увеличению показателей разрушающих напряжений и модуля упругости при изгибе. Дополнительно доказано улучшение показателей ударной вязкости при незначительном содержании модификатора. Методом оптической микроскопии проведен анализ структуры излома исследуемых материалов с целью изучения влияния модификатора, при разном его содержании, на хрупкость, прочность, вязкость и эластичность эпоксидных композитных материалов.

Ключевые слова: эпоксидные олигомеры, модификатор, ударная вязкость, разрушающие напряжения, модуль упругости, структура.

A. V. BUKETOV, A. G. KULINICH, V. M. GUSYEV, S. O. SMETANKIN

Kherson State Maritime Academy

V. M. YACUK

Ternopil environmental sciences forensic Ministry of armed forces center

INFLUENCE OF 4-AMINOBENZOIC ACID MODIFICATOR ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Epoxy composite materials are widely used in shipbuilding and mechanical engineering, as well as in other industries, which constantly put forward requirements for improving the technical and operational characteristics of products based on polymers. The article analyses the changes in the physico-mechanical parameters and the structure of composite systems based on the epoxy oligomer ED-20 with different contents of the 4-aminobenzoic acid modifier. The influence of the modifier on the physico-mechanical properties of the

composites studied is experimentally substantiated. It was found that the introduction of 4-aminobenzoic acid leads to an increase in the parameters of destructive stresses and modulus of elasticity during bending, improvement of the impact strength parameters with an insignificant content of the modifier. In addition, an analysis of the fracture structure of the materials studied was carried out using optical microscopy to study the effect of the modifier, with different content, on the brittleness, strength, viscosity, and elasticity of epoxy composite materials.

Keywords: epoxy oligomers, modifier, impact strength, destructive stresses, modulus of elasticity, structure.

Постановка проблеми

Провідні галузі економіки, сучасний стан промисловості постійно вимагають від виробників й науковців розробляти та впроваджувати у виробництво нові матеріали. Основні сфери застосування таких матеріалів – це надійність при експлуатації машин та механізмів технологічного устаткування, а також при ремонті транспортних засобів. Одними з перспективних матеріалів, які б відповідали вимогам сучасності є полімерні композити. На сьогодні композити з епоксидною матрицею ефективно використовують для захисту обладнання від корозії та з метою поліпшення фізико-механічних і теплофізичних властивостей деталей машин у багатьох галузях виробництва [1, 2]. Відомо [1-3], що композитні матеріали (КМ) мають кращі характеристики зносостійкості, довговічності, вони достатньо витривалі до впливу хімічно-активних речовин, мають підвищені антикорозійні властивості порівняно з традиційними матеріалами, такими як метали та сплави на їх основі. Тому їх все більше застосовують в судно- та машинобудуванні для суттєвого збільшення ресурсу роботи обладнання та устаткування, у тому числі для збільшення терміну експлуатації та міжремонтного періоду деталей машин та механізмів [3]. З метою покращення фізико-механічних властивостей КМ на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20, останній модифікують різноманітними хімічними сполуками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальновідомо [1-10], що епоксидні КМ – одні з найпоширеніших сучасних матеріалів, які знайшли практичне застосування в різних галузях промисловості, що зумовлено цілим комплексом функціональних та експлуатаційних характеристик. Але, поряд з великим спектром позитивних характеристик, епоксидні полімерні матеріали мають також деякі недоліки, до яких можна віднести недостатню пластичність, іноді значні залишкові напруження в затверджених системах, що, у свою чергу, призводить до утворення мікротріщин та зниження механічної міцності зразків [4]. Незважаючи на значну кількість досліджень та наукових праць щодо усунення вказаних недоліків щодо підвищення експлуатаційної надійності полімерів актуальним на теперішній час є пошук шляхів, які спрямовані на якісну зміну їх фізико-механічних властивостей. Одним з основних шляхів є метод модифікування композицій [3]. Фізична модифікація спрямована на зміну фізичних властивостей полімерів за рахунок прогнозованого регулювання їх надмолекулярної структури. Враховуючи зазначене вище, перспективним є дослідження впливу модифікаторів на фізико-механічні властивості КМ на основі епоксидного зв'язувача.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – проаналізувати вплив модифікатора 4-амінобензойної кислоти на фізико-механічні властивості та структуру епоксидних композитних матеріалів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Матеріали та методика дослідження

Виходячи з наведеного вище, як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84) (рис. 1). Як модифікатор використано 4-амінобензойну кислоту. 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). Формула 4-амінобензойної кислоти має вигляд $C_7H_7NO_2$ (рис. 2).

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78) (рис. 3), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ [5, 6]. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

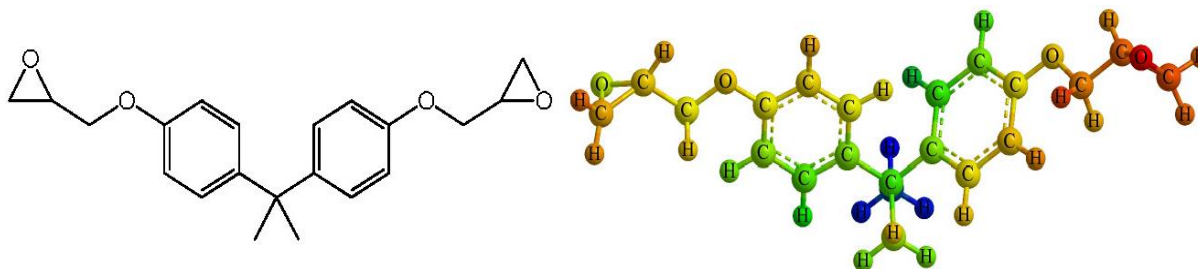


Рис. 1. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [7]

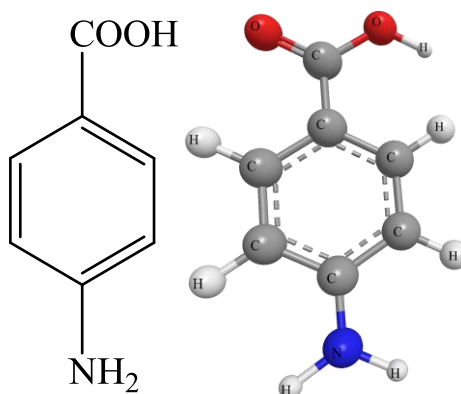
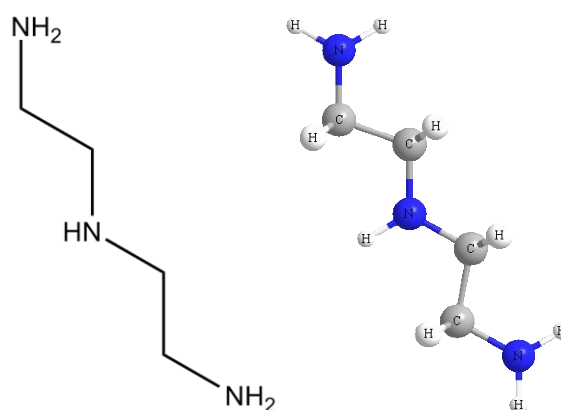
Рис. 2. Структурна формула фрагменту модифікатора 4-амінобензойної кислоти ($C_7H_7NO_2$)

Рис. 3. Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [7]

Епоксидний зв'язувач формували за такою технологією: дозування компонентів, підігрівання епоксидної смоли марки ЕД-20 до температури $T = 353...373$ К, витримка смоли при даній температурі впродовж часу $t = 15...20$ хв, гідродинамічне суміщення епоксидної смоли і модифікатора впродовж часу $t = 8...10$ хв, охолодження суміші впродовж часу $t = 50...60$ хв до кімнатної температури, введення твердника (ПЕПА), витримування композиції на повітрі впродовж часу $t = 12 \pm 0,1$ год, підігрівання композиції до температури $T = 393 \pm 2$ К і її витримування при даній температурі впродовж часу $t = 2 \pm 0,1$ год, охолодження композиції і її витримування на повітрі впродовж часу $t = 24 \pm 0,1$ год.

Руйнівні напруження і модуль пружності КМ при згинанні визначали згідно ГОСТу 4648-71 і ГОСТу 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 ГОСТу 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 за температури $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з розмірами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм.

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

Дослідження структури матеріалів проводили на металографічному мікроскопі моделі ХЛ-17АТ, який обладнаний камерою 130 UMD (1,3 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від $\times 100$

до $\times 1600$ разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Image Analyse».

Таблиця 1

Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача, твердника та модифікатора

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД-20	Модифікатор 4-амінобензойна кислота ($C_7H_7NO_2$)	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	137,14	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–
Середня функціональність за епоксидними групами, f_n	2,0	–	–
Вміст вуглецю, %	–	61,31	–
Вміст водню, %	–	5,14	–
Вміст азоту, %	–	10,21	19,5...22,0
Вміст кисню, %	–	23,33	–
В'язкість, η , Па·с	13...20	–	0,9
Густина, ρ , г/см ³	1,16	1,37	1,05

Проаналізовано вплив модифікатора 4-амінобензойної кислоти на фізико-механічні властивості та структуру КМ. Попередньо встановлено властивості вихідної матриці на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20, яка характеризується такими показниками: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 48,0$ МПа; модуль пружності при згинанні – $E = 2,8$ ГПа, ударна в'язкість – $a = 7,4$ кДж/м².

На початковому етапі (рис. 4, крива 1) встановлено, що введення модифікатора за вмісту $q = 0,10...0,50$ мас.ч. приводить до поетапного суттєвого збільшення когезійної міцності матеріалів, а саме: від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{32} = 54,3...62,7$ МПа. При цьому максимум ($\sigma_{32} = 62,7$ МПа) на кривій залежності $\sigma_{32} - q$ спостерігали за вмісту модифікатора у кількості $q = 0,50$ мас.ч. Подальше збільшення вмісту модифікатора ($q = 1,00...2,00$ мас.ч.) призводить до монотонного зменшення показників руйнівних напружень при згинанні КМ до $\sigma_{32} = 45,0...49,5$ МПа. Зауважимо, що показники когезійних властивостей модифікованих матриць у деяких випадках є нижчими за показники руйнівних напружень при згинанні вихідного (ненаповненого) полімеру. Зокрема, для матеріалів із вмістом добавки у кількості $q = 1,50...2,00$ мас.ч. показники руйнівних напружень при згинанні становлять до $\sigma_{32} = 45,0...45,3$ МПа, тоді як для вихідної матриці – $\sigma_{32} = 48,0$ МПа. Отримані результати дослідження можна пояснити тим, що за незначного вмісту добавки ($q = 0,10...0,50$ мас.ч.) у полімері інтенсифікуються процеси міжфазової взаємодії при структуроутворенні матриці, внаслідок чого, на наш погляд, відбувається взаємодія карбоксильних (COOH) і аміних (NH₂) груп модифікатора з епоксидними і гідроксильними групами епоксидного олігомеру. При цьому твердник ПЕПА є ініціатором такої взаємодії у системах із вмістом добавки лише до критичної концентрації останнього, яка становить $q = 0,50$ мас.ч. (у цьому випадку показники руйнівних напружень при згинанні КМ є максимальними). Надалі збільшення вмісту модифікатора призводить до зниження показників руйнівних напружень при згинанні через надмірний вміст у системах добавки. Останнє передбачає недостатнє зшивання макромолекул інгредієнтів систем, що зумовлює збільшення вмісту золь-фракції у них і, відповідно, погіршення показників фізико-механічних властивостей композитів.

Експериментально проведено дослідження залежності модуля пружності при згинанні від вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти (рис. 4, крива 2). Встановлено, що при введенні незначної кількості модифікатора ($q = 0,10$ мас.ч.) отримали значне збільшення модуля пружності від $E = 2,8$ ГПа (вихідна матриця) до $E = 3,9$ ГПа (перший максимум на кривій залежності). Наступне поступове збільшення вмісту 4-амінобензойної кислоти до $q = 0,25...0,50$ мас.ч. призводить до зниження показників модуля пружності ($E = 3,5$ ГПа при $q = 0,25$ мас.ч. та $E = 3,2$ ГПа при $q = 0,50$ мас.ч.). Необхідно відмітити, що незважаючи на динаміку показників, ці значення є більшими, порівняно з модулем пружності вихідної епоксидної матриці. При подальшому збільшенні концентрації модифікатора до $q = 1,00...2,00$ мас.ч. знову спостерігали підвищення значень модуля пружності до $E = 3,7...3,9$ ГПа (другий максимум на кривій залежності). Вважали, що збільшення модуля пружності при згинанні порівняно з вихідною матрицею можна пояснити посиленням міжмолекулярної взаємодії між функціональними групами модифікатора та епоксидного діанового олігомеру.

На завершальному етапі дослідження аналізували вплив вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти на ударну в'язкість КМ. Ударна в'язкість є важливою властивістю, позаяк вона характеризує здатність матеріалу протистояти зовнішнім динамічним навантаженням. Результати досліджень (рис. 4, крива 3) свідчать, що за вмісту модифікатора – $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. отримано підвищення ударної в'язкості КМ від $a = 7,4$ кДж/м² до $a = 7,9$ кДж/м² (максимум на кривій залежності) та $a = 7,7$ кДж/м² відповідно. При введенні модифікатора за вмісту $q = 0,50$ мас.ч. спостерігали зниження показника до $a = 7,0$ кДж/м², який практично не відрізняється від аналогічного показника для вихідної матриці ($a = 7,4$ кДж/м²). Подальше збільшення концентрації модифікатора $C_7H_7NO_2$ до $q = 1,00...2,00$ мас.ч. призводить до суттєвого зниження досліджуваної характеристики. Отримано наступні значення ударної в'язкості:

- для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 1,00$ мас.ч. – $a = 4,6$ кДж/м²;
- для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 1,50$ мас.ч. – $a = 3,6$ кДж/м²;
- для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч. – $a = 3,0$ кДж/м².

Вважали, що наведені дані свідчать про недоцільність подальшого збільшення вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти в епоксидному олігомері ЕД-20 для формування КМ з поліпшеними показниками фізико-механічних властивостей.

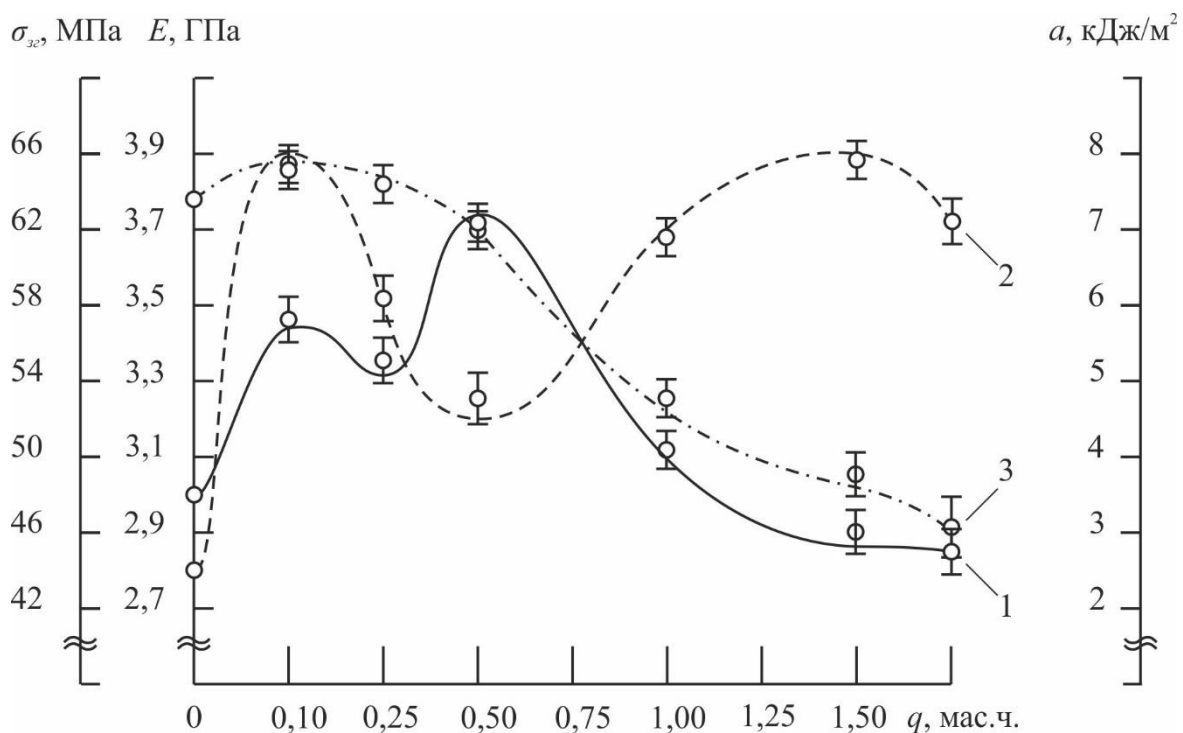


Рис. 4. Залежність фізико-механічних властивостей від вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти: 1 – руйнівні напруження при згинанні ($\sigma_{зг}$); 2 – модуль пружності при згинанні (E); 3 – ударна в'язкість (a)

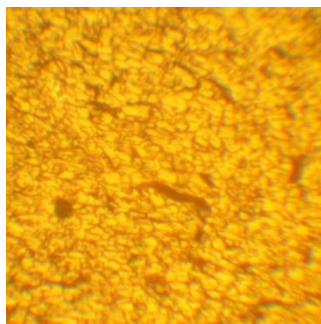
З метою підтвердження експериментально отриманих результатів фізико-механічних властивостей КМ додатково методом оптичної мікроскопії дослідили поверхню зламу вихідної та модифікованих (за різного вмісту добавки) епоксидних матриць. Діапазон збільшення зображення: $\times 250$ та $\times 400$ разів.

У результаті аналізу отриманих фрактограм можна стверджувати наступне. Поверхня зламу немодифікованої матриці при збільшенні зображення $\times 250$ (рис. 5, а) має однорідну структуру з незначними за розмірами заглибленнями. При збільшенні зображення $\times 400$ (рис. 5, б) спостерігали однотипні прямі неглибокі лінії сколювання. Це свідчить про напружений стан та підвищення крихкості матеріалу.

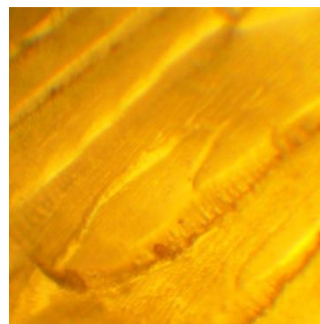
Аналіз топології зламу КМ за вмісту модифікатора $q = 0,10$ мас.ч. (рис. 5, в, г) дозволяє констатувати про зменшення напруженого стану матеріалу. На поверхні присутні характерні заглиблення у вигляді незначних кратерів, лінії зламу не є глибокими, що свідчить про підвищену когезійну міцність матеріалу та підвищення його стійкості до руйнування під час удару. Для КМ із модифікатором у кількості $q = 0,25...0,50$ мас.ч. (рис. 5, г, д, е, є) спостерігали поверхні зламу, які практично не відрізняються. Поверхня матеріалів майже однорідна, однак відзначається сіткою

розгалужених ліній сколювання, кратероподібні утворення збільшуються (порівняно з іншими матеріалами) та є глибшими. При цьому структура поверхонь зламу характеризується плавними переходами, що свідчить про формування в'язкого матеріалу, який відзначається незначними залишковим напруженнями. Отже, доведено, що результати дослідження поверхонь зламу вихідної і модифікованих матриць (за вмісту 4-амінобензойної кислоти у кількості $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч.) добре корелюють з результатами експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей КМ (рис. 4). Саме у цьому діапазоні концентрацій добавки формуються КМ, які характеризуються найвищими показниками руйнівних напружень при згинанні (σ_{3z}), модуля пружності при згинанні (E) та ударної в'язкості (a).

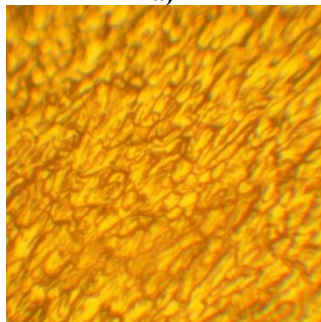
Надалі збільшення вмісту модифікатора до $q = 1,00$ мас.ч. приводить до формування КМ, поверхня зламу яких характеризується дещо іншою структурою порівняно з матеріалами, описаними вище (рис. 5, ж, з). Зокрема, поверхня матеріалу характеризується лініями сколювання, які з прямих неглибоких (як було показано вище) трансформуються у хаотичні за формою та в деяких місцях з суттєвими заглибленнями. Можна припустити, що це викликано погіршенням перебігу фізико-хімічних процесів при структуроутворенні КМ. При подальшому введенні в епоксидний олігомер 4-амінобензойної кислоти за вмісту $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. зберігається тенденція до зростання напруженого стану та крихкості матеріалів, а також погіршення однорідності структури зразків. Аналіз поверхні зламів КМ (рис. 5, и, і, ї, й) свідчить про значне зниження однорідності структури, ширина та глибина ліній сколювання значно збільшується, площа кратероподібних утворень суттєво зростає, рельєф поверхні нерівномірний, а у деяких місцях поверхня має характерну форму сходинок. Необхідно відмітити, що аналіз топології поверхні зламу КМ за вмісту модифікатора $q = 1,00 \dots 2,00$ мас.ч. дозволяє стверджувати про формування матеріалів із складним напруженим станом. Це додатково підтверджує результати дослідження фізико-механічних властивостей модифікованих матеріалів (рис. 4), які характеризуються незначними показниками руйнівних напружень при згинанні (σ_{3z}) та ударної в'язкості (a).



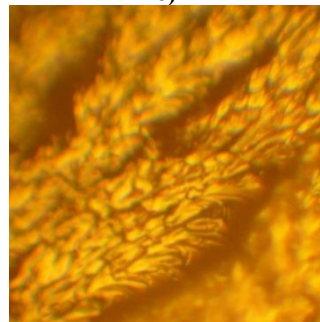
а)



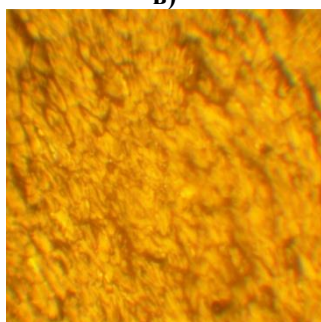
б)



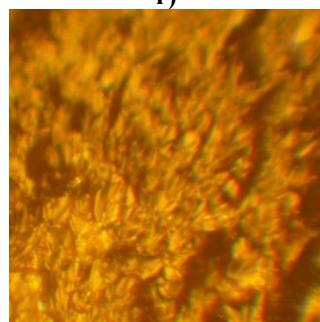
в)



г)



д)



е)

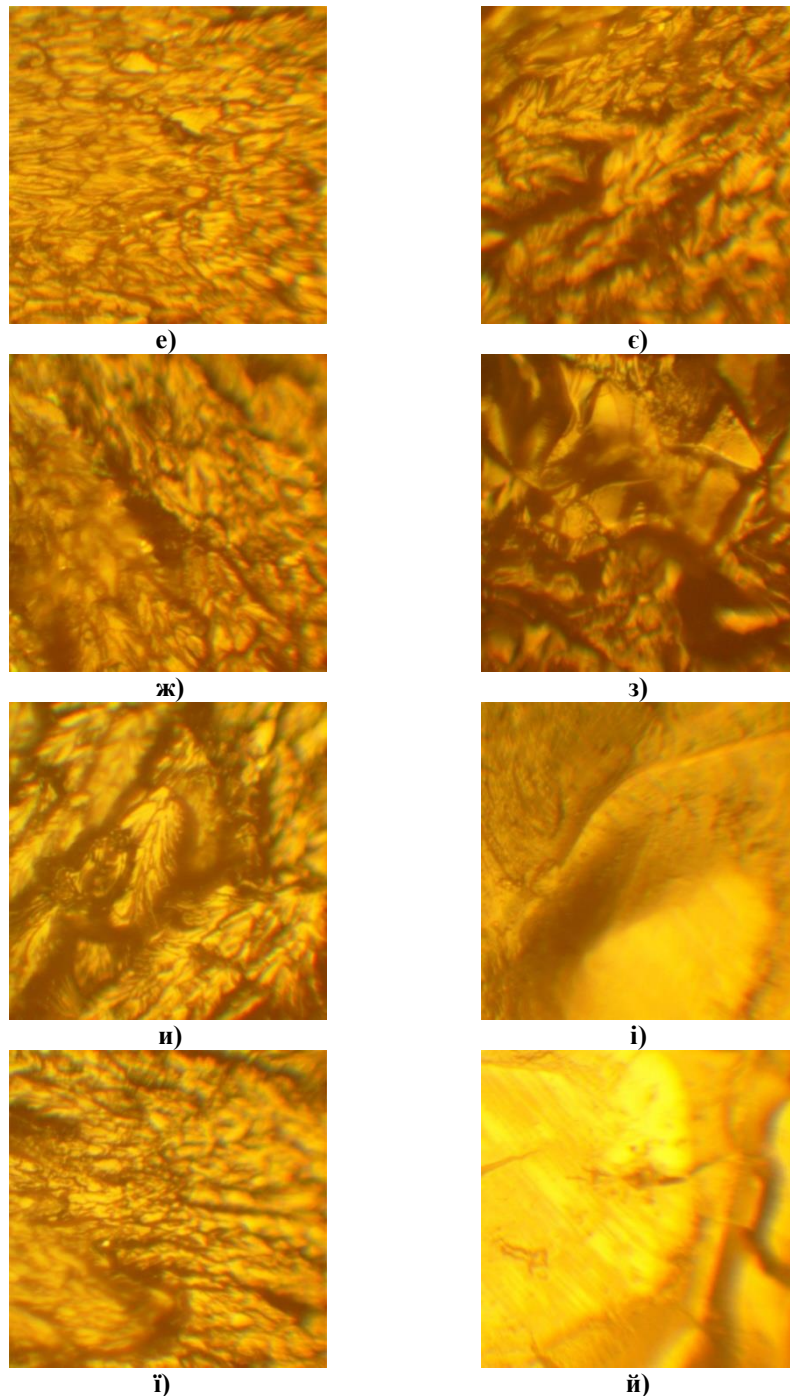


Рис. 5. Фрактограми зламу вихідної матриці (а¹, б²) та КМ за вмісту модифікатора С₇Н₇NO₂, q, мас.ч.: в¹, г² – 0,10; г¹, д² – 0,25; е¹, є² – 0,50; ж¹, з² – 1,00; и¹, і² – 1,50; ї¹, й² – 2,00 (¹при збільшенні зображення ×250; ²при збільшенні зображення ×400)

Висновки

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що при введенні у діановий олігомер ЕД-20 модифікатора 4-амінобензойної кислоти (С₇Н₇NO₂) за вмісту q = 0,10...0,50 мас.ч. порівняно з вихідною матрицею відбувається суттєве покращення фізико-механічних властивостей КМ. Зокрема, максимальне значення руйнівних напружень при згинанні ($\sigma_{z2} = 62,7$ МПа) спостерігали за вмісту модифікатора у кількості q = 0,50 мас.ч., найбільше значення модуля пружності при згинанні (E = 3,9 ГПа) відмічено за вмісту модифікатора – q = 0,10 мас.ч. та q = 1,50 мас.ч. При цьому необхідно зазначити, що за вмісту модифікатора у кількості q = 1,00...2,00 мас.ч. спостерігали суттєве зниження таких властивостей як руйнівні напруження при згинанні та ударна в'язкість матеріалів. Отже, можна стверджувати, що оптимальний вміст модифікатора 4-амінобензойної кислоти в епоксидній матриці з

найкращими фізико-механічними властивостями становить $q = 0,10$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20. За такого вмісту модифікатора формується матеріал з такими показниками властивостей: руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{\text{зг}} = 56,8$ МПа, модуль пружності при згинанні $E = 3,9$ ГПа та ударна в'язкість $a = 7,9$ кДж/м². Така модифікація забезпечує формування полімеру, який порівняно з вихідною (немодифікованою) матрицею характеризується вищими показниками руйнівних напружень при згинанні (у 1,2 разів), модуля пружності при згинанні (у 1,4 разів). При цьому показники ударної в'язкості при модифікації епоксидного зв'язувача практично не змінюються (значення знаходяться у межах похибки експерименту).

Методом оптичної мікроскопії дослідили поверхню зламу вихідної та модифікованої, за різного вмісту модифікатора, епоксидних матриць. На підставі аналізу фрактограм вихідної матриці встановлено, що поверхня зламу має однорідну структуру, прямі неглибокі лінії сколювання. Це свідчить про крихкість та напружений стан матеріалу. Природа фрактограм композитів за вмісту модифікатора $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. визначається однорідністю поверхні, розгалуженістю, незначними лініями зламу та несуттєвими кратероподібними утвореннями, що дозволяє припустити про формування кінетично врівноваженого в'язкого матеріалу з підвищеною стійкістю до руйнування. Аналіз фрактограм зламу композитів за вмісту модифікатора у кількості $q = 1,00 \dots 2,00$ мас.ч. показує значне зниження однорідності структури, лінії сколювання хаотичні за формою з суттєвими заглибленнями, у деяких місцях їх поверхня має характерну форму сходинок. Напружений стан та крихкість матеріалів зростає, що зумовлено погіршенням фізико-хімічних процесів структуроутворення матеріалів. Можна констатувати про недоцільність введення у епоксидний олігомер ЕД-20 модифікатора за вмісту $q = 1,00 \dots 2,00$ мас.ч. Необхідно зазначити, що дослідження топології зламу модифікованих матриць методом оптичної мікроскопії добре корелюють з результатами експериментальних випробувань фізико-механічних властивостей композитів.

Список використаної літератури

1. Букетов А.В. Композитні матеріали – склад, властивості, впровадження / А.В.Букетов, В.О.Настасенко, В.С.Леонов, В.Д.Михайлик, О.І.Скирденко // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. Збірник науково-технічних праць. Технологія та устаткування лісовиробничого комплексу. – Випуск 23.8 – 2013. – С. 161-166.
2. Букетов А.В. Дослідження фізико-механічних та теплофізичних властивостей епоксикомпозитів із двокомпонентним бідисперсним наповнювачем / А.В.Букетов, О.О.Сапронов, М.В.Брайло // Проблемы прочности. – 2014. – №5. – С. 160-167.
3. Стухляк П.Д., Карташов В.В. Фізико-механічні властивості епоксикомпозитів, оброблених змінним магнітним полем низької частоти / П.Д.Стухляк, В.В.Карташов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №2(39). – С. 49-53.
4. Лавренюк О.І. Фізико-механічні властивості наповнених матеріалів на основі модифікованих полівінілпіролідном епоксидних композицій / О.І.Лавренюк // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – №3. – С. 24-26.
5. Букетов А.В. Исследование влияния 1,4-бис(Н,Н-диметилдитиокарбамато)бензена на механические свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.М. Яцюк, Б.Д. Грищук, В.С. Барановский // Пластические массы. – 2014. – № 3-4. – С. 26-34.
6. Тхір І.Г. Фізико-хімія полімерів: навч. посібник / І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький. – Львів: Вид. нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
7. Букетов А.В. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтилфосфата / А.В. Букетов, А.В. Акимов, Д.А. Зинченко // Вісник Хмельницького національного університету: зб. наук. праць. – Сер.: Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 126-134.
8. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – Изд. 3-е, [перераб. и доп.]. – СПб.: Изд-во "Профессия", 2008. – 560 с.
9. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов / В.Н. Кестельман. – М.: Химия, 1980. – 224 с.
10. Шевелев А.Ю. Влияние модификации полимеров различного строения на их структуру и свойства / А.Ю. Шевелев, Т.П. Зеленева, Ю.В. Зеленев // Пластические массы. – 2004. – № 10. – С. 16–22.