

УДК: 667.64:678.026

А.В. Букетов, В.Г. Кулініч, С.А. Сметанкін, Н.М. Букетова, В.М. Яцюк

Херсонська державна морська академія

ВПЛИВ МОДИФІКАТОРІВ $C_{13}H_{12}CL_2N_2$ ТА $C_{13}H_{14}N_2$ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ

Модифікація полімерів є одним з оптимальних засобів для їх характеристик. Даний процес має високий пріоритет в зв'язку з постійно зростаючими потребами сучасної промисловості, а саме із необхідністю вдосконалення існуючих матеріалів для ефективної експлуатації технологічного устаткування у критичних умовах (динамічні навантаження, агресивне середовище тощо).

Досліджено вплив модифікаторів 3,3'-дихлор-4,4'-діамінодіфенілметану (ДХДАФМ) і 4,4-діамінодіфенілметану (ДАФМ) на фізико-механічні властивості епоксидних композитів. Експериментально встановлено наступні максимальні значення даних характеристик при введенні в епоксидний олігомер ЕД-20 модифікатору ДХДАФМ: ударна в'язкість $W = 11,9$ кДж/м² при концентрації $q = 0,10$ мас.ч., модуль пружності при згинанні $E = 3,3$ ГПа при $q = 2,00$ мас.ч., руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{z_2} = 61,8$ МПа при $q = 0,25$ мас.ч. При введенні модифікатору ДАФМ у різних концентраціях були отримані наступні максимальні значення: ударна в'язкість $W = 14,8$ кДж/м² при концентрації $q = 1,25$ мас.ч., модуль пружності при згинанні $E = 2,9$ ГПа при $q = 2,00$ мас.ч., руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{z_2} = 80,5$ МПа при $q = 0,50$ мас.ч. Проведено порівняння ступеня впливу даних модифікаторів на зміну величини фізико-механічних властивостей композитних матеріалів. Відмічено позитивний вплив обох модифікаторів на когезійні властивості епоксидного олігомеру ЕД-20.

Ключові слова: епоксидний олігомер, модифікатор, фізико-механічні властивості, модуль пружності, руйнівні напруження при згинанні, ударна в'язкість, композитний матеріал.

А.В. Букетов, В.Г. Кулинич, С.А. Сметанкин, Н.Н. Букетова, В.Н. Яцюк

Херсонская государственная морская академия

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ $C_{13}H_{12}CL_2N_2$ И $C_{13}H_{14}N_2$ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ

Модификация полимеров является одним из оптимальных методов изменения их характеристик. Данный процесс обладает высоким приоритетом в связи с постоянно возрастающими потребностями современной промышленности, а именно с необходимостью усовершенствования существующих материалов для эффективной эксплуатации технологического оборудования в критических условиях (динамические нагрузки, агрессивные среды, прочее).

Проведено исследование влияния модификаторов 3,3'-дихлор-4,4'-диаминодифенилметана (ДХДАФМ) и 4,4-диаминодифенилметана (ДАФМ) на физико-механические характеристики эпоксидных композитов. Экспериментально установлены следующие максимальные значения характеристик при введении в эпоксидный олигомер ЭД-20 модификатора ДХДАФМ: ударная вязкость $W = 11,9$ кДж/м² при концентрации $q = 0,10$ масс.ч., модуль упругости при изгибе $E = 3,3$ ГПа при $q = 2,00$ масс.ч., разрушающие напряжения при изгибе $\sigma_{z_2} = 61,8$ МПа при $q = 0,25$ масс.ч. При введении модификатора ДАФМ при различных концентрациях были получены следующие максимальные значения: ударная вязкость $W = 14,8$ кДж/м² при концентрации $q = 1,25$ масс.ч., модуль упругости при изгибе $E = 2,9$ ГПа при $q = 2,00$ масс.ч., разрушающие напряжения при изгибе $\sigma_{z_2} = 80,5$ МПа при $q = 0,50$ масс.ч. Проводили сравнение степени воздействия модификаторов на изменение величины физико-механических характеристик композитных материалов. Отмечено положительное влияние обоих модификаторов на когезионные свойства эпоксидного олигомера ЭД-20.

Ключевые слова: эпоксидный олигомер, модификатор, физико-механические свойства, модуль упругости, разрушающие напряжения при изгибе, ударная вязкость, композитный материал.

A.V. Buketov, V.G. Kulnich, S.A. Smetankin, N.N. Buketova, V.M. Yatsuk

Kherson State Maritime Academy

THE MODIFIERS' INFLUENCE $C_{13}H_{12}CL_2N_2$ AND $C_{13}H_{14}N_2$ ON A MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE EPOXY MATRIX

Polymers modification is one of their optimal characteristics and contents alteration's methods. Current process has high priority due to continuous growing modern industry demands, especially with improvement of existing materials for an effective operation of technological facilities in stress conditions (dynamic stresses, severe atmosphere, etc).

The research of modifiers 3,3'-dichlor-4,4'-diaminodiphenylmethan (DXDAFM) i 4,4-diaminodiphenylmethan (DAFM) influence on epoxy composites' physical-mechanical characteristics performed. The following maximum values of current characteristics were experimentally established during an admission of modifier DXDAFM into epoxy oligomer ED-20: impact strength $W = 11,9$ kJ/m² by proportion $q = 0.10$ mass.fr., flexural modulus $E = 3.3$ GPa by proportion $q = 2.00$ mass. fr., ultimate flexural strength $\sigma_{z_2} = 61.8$ MPa by proportion $q = 0.25$ mass.fr. During an admission of modifier DAFM in different proportions the following maximum values were received: impact strength $W = 14,8$ KJ/m² by proportion $q = 1.25$ mass.fr., flexural modulus $E = 2,9$ GPa by proportion $q = 2.00$ mass.fr., ultimate flexural strength $\sigma_{z_2} = 80.5$ MPa by proportion $q = 0.50$ mass.fr. The influence quantity comparison of current modifiers on composite materials' physical-mechanical characteristics value alteration was done. Both modifiers positive influence on cohesive characteristics of epoxy oligomer ED-20 was detected.

Key words: epoxy oligomer, modifier, physical-mechanical characteristics, flexural modulus, ultimate flexural strength, impact strength, composite material.

Постановка проблеми. У промисловості постійно використовують різноманітні види полімерних композитних матеріалів (КМ) через широкий спектр їх застосування – від будівництва до військової техніки, від стоматології до авіації, тощо. Всеосяжність даного спектру пояснюється тим, що саме введення модифікаторів у зв'язувач суттєво змінює структуру та характеристики КМ. Важливим фактором при цьому є підсилююча дія даних компонентів у полімерах. Структурування в полімері відбувається через взаємодію активних груп модифікаторів зі зв'язувачем. Саме вищезазвані добавки суттєво підвищують фізико-механічні характеристики новостворених КМ. Покращення даних властивостей суттєво збільшує міжремонтний ресурс експлуатації деталей устаткування за рахунок підвищення зносостійкості, і, відповідно, покращення економічності.

Аналіз останніх публікацій та досліджень. Епоксидні КМ доцільно використовувати у різних видах промисловості через широкий діапазон поліпшених властивостей (адгезійні, фізико-механічні, теплофізичні, тощо) [1,2]. Сіткова структура композитів формується за допомогою хімічної реакції епоксидних груп із затверджувачами. Підвищення показників фізико-механічних характеристик можливе за допомогою введення модифікаторів різної природи за оптимального вмісту [3]. Використання таких композитів останнім часом призвело до суттєвого зменшення обсягу використання основних конструкційних матеріалів, таких як залізобетон, метал і дерево на сучасному ринку промисловості [4-12]. Епоксидно-діановий олігомер ЕД-20 та твердник поліетиленполіамін ПЕПА перспективні для розробки полімерних композитів з покращеними властивостями, особливо при додаванні модифікаторів різної природи [7, 8]. Крім того, слід виокремити їх відносно низьку собівартість і розповсюдженість.

Мета роботи – дослідити вплив модифікаторів ДХДАФМ ($C_{13}H_{12}Cl_2N_2$) і ДАФМ ($C_{13}H_{14}N_2$) на фізико-механічні властивості епоксидної матриці, вибрати оптимальний модифікатор за критичного вмісту для формування покриттів з покращеними когезійними властивостями.

Матеріали та методика досліджень. 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 модифікатори використано 3,3' - дихлор - 4,4' - діамінодифенілметан (ДХДАФМ) і 4,4-діамінодифенілметан (ДАФМ). Модифікатори 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 ДХДАФМ: $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$. Молекулярна формула модифікатора ДАФМ: $C_{13}H_{14}N_2$. Структурні формули модифікаторів наведено на рис. 2, рис. 3.

Для зшивання епоксидних композицій використовувався твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78) (рис. 3), який 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, 7]. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію із вмістом 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, модифікаторів і твердника наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД - 20	Модифікатор ДХДАФМ	Модифікатор ДАФМ	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	340	267,15738	198,26366	215...258
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–	–
Вміст водню, % (H)	–	4,53	7,12	–

Вміст азоту, % (N)	–	10,49	14,13	19,5...22,0
Вміст вуглецю, % (C)	–	58,45	78,75	–
Вміст хлору, % (Cl)	–	26,54	–	–
В'язкість, η , Па·с	13...20	–	–	0,9
Густина, ρ , г/см ³	1,160	–	–	1,050

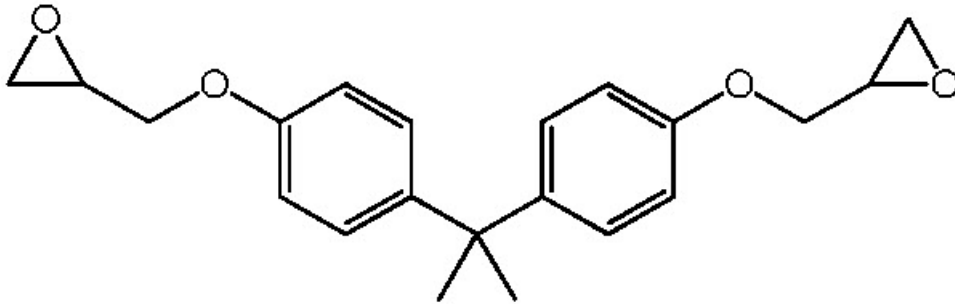


Рис. 1. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20[11]

Епоксидний зв'язувач формували за такою технологією: дозування компонентів, підігрівання епоксидної смоли марки ЕД-20 до температури $T = 353 \dots 373$ К, витримка смоли при даній температурі впродовж часу $t = 15 \dots 20$ хв, гідродинамічне суміщення епоксидної смоли і модифікатора впродовж часу $t = 8 \dots 10$ хв, охолодження суміші впродовж часу $t = 50 \dots 60$ 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.

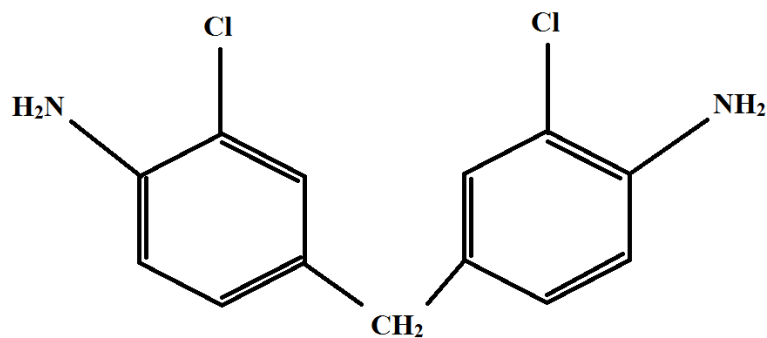


Рис. 2. Структурна формула модифікатора ДХДАФМ ($C_{13}H_{12}Cl_2N_2$)

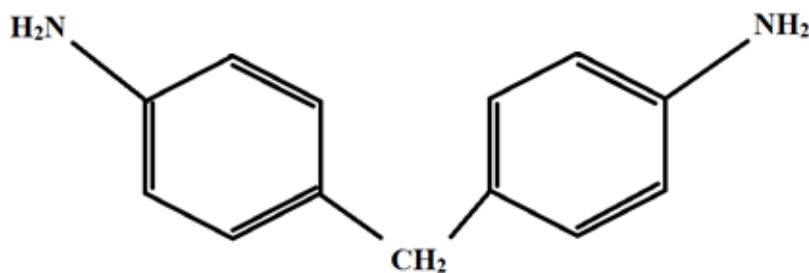


Рис. 3. Структурна формула модифікатора ДАФМ ($C_{13}H_{14}N_2$)

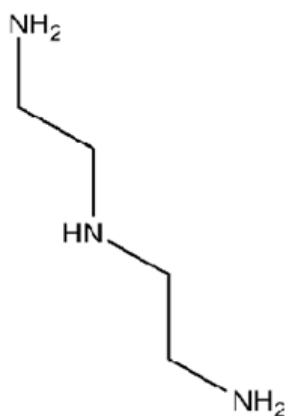


Рис. 4. Структурна формула твердника ПЕПА [11]

Руйнівні напруження і модуль пружності КМ 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 методом Шарпі відповідно до ГОСТ 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.

Результати експериментів та їх обговорення. Визначення оптимальної концентрації модифікаторів ДХДАФМ і ДАФМ в епоксидній матриці проводили припорівняльному аналізі даних, отриманих внаслідок результатів випробувань руйнівних напружень при згинанні (σ_{32} , МПа), модуля пружності при згинанні (E , ГПа) та ударної в'язкості (W , кДж/м²).

Під час попередніх випробувань встановлено показники фізико-механічних характеристик немодифікованої епоксидної матриці на основі олігомеру ЕД-20, які при вищенаведених режимах зшивання становлять: ударна в'язкість $W = 7,4$ кДж/м², модуль пружності при згинанні $E = 2,8$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{32} = 48,0$ МПа.

Випробування когезійних властивостей КМ показує (рис. 5, крива 1), що введення до епоксидного олігомеру модифікатора ДХДАФМ за незначної кількості ($q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч.) майже не впливає на модуль пружності матеріалів – показники даної характеристики майже не змінюються і знаходяться в межах похибки експерименту $E = 2,8 \dots 2,9$ ГПа. Введення модифікатора у кількості $q = 1,00 \dots 1,25$ мас.ч. призводить до несуттєвого зменшення модуля пружності матеріалів від $E = 2,9$ ГПа до $E = 2,7$ ГПа. Подальше додавання ДХДАФМ за вмісту $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. забезпечує монотонне підвищення величини модуля пружності КМ. При цьому максимум модуля пружності при згинанні ($E = 3,3$ ГПа) спостерігали для КМ із вмістом добавки у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Отже, можна стверджувати, що суттєвого впливу даного модифікатора на покращення показників модуля пружності при згинанні епоксидних КМ не виявлено.

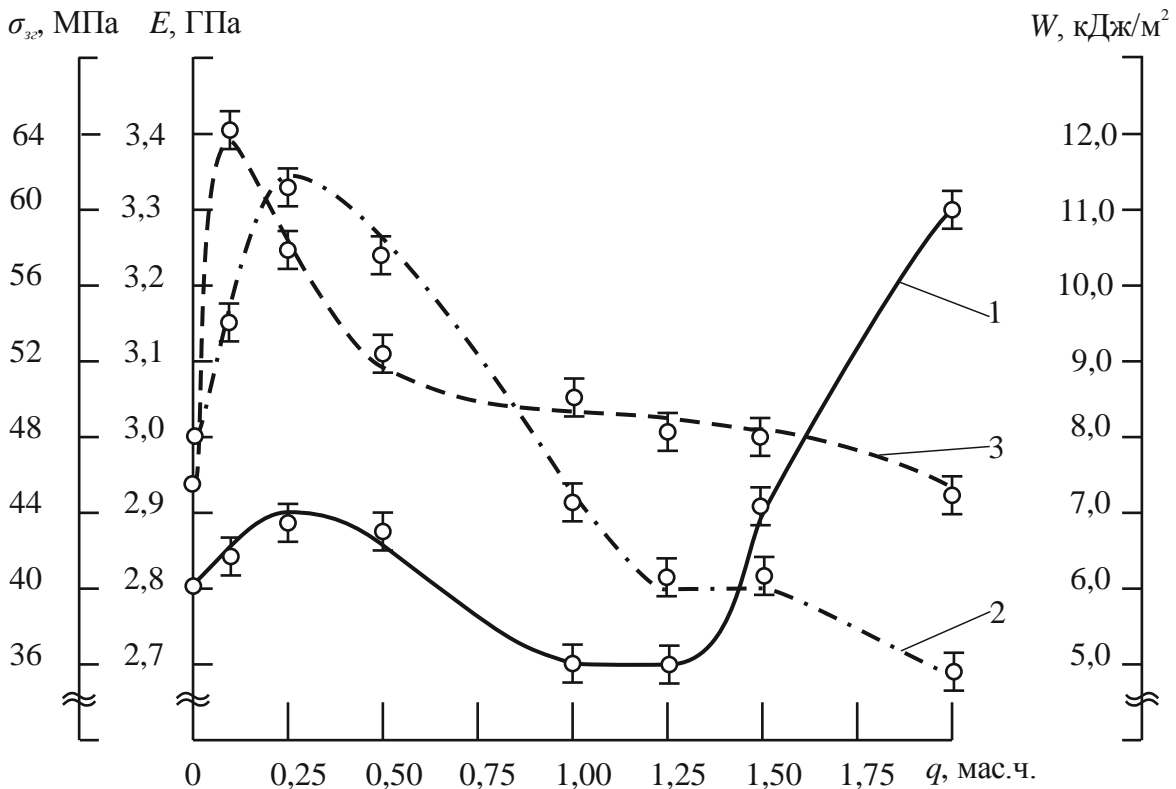


Рис. 5. Вплив модифікатора ДХДАФМ на фізико-механічні властивості матриці: 1 – модуль пружності при згинанні (E); 2 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32}); 3 – ударна в'язкість (W)

Наступним етапом було проведення дослідження руйнівних напружень при згинанні модифікованих КМ. Показано (рис. 5, крива 2), що введення ДХДАФМ у епоксидний олігомер ЕД-20 за незначної концентрації $-q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. забезпечує формування КМ із покращеними когезійними властивостями. При цьому максимум ($\sigma_{32} = 61,8$ МПа) на кривій залежності « $\sigma_{32} - q$ » спостерігали для композитів із вмістом модифікатора у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Надалі введення добавки у кількості $q = 1,00 \dots 2,00$ мас.ч. призводить до зниження значень руйнівних напружень, причому мінімальні характеристики ($\sigma_{32} = 35,8$ МПа) спостерігали для КМ з кількістю модифікатора $-q = 2,00$ мас.ч. Таким чином залежно від вмісту модифікатора спостерігали антибатну кореляцію показників фізико-механічних характеристик КМ: модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні відповідно.

Надалі проводили випробування ударної в'язкості КМ, модифікованих ДХДАФМ. Експериментально встановлено (рис. 5, крива 3), що введення модифікатора ДХДАФМ у кількості $q = 0,10$ мас.ч. підвищує ударну в'язкість КМ до максимуму від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 11,9$ кДж/м². Подальше додавання модифікатора у кількості $q = 0,25 \dots 2,00$ мас.ч. призводить до монотонного зниження поглинання механічної енергії матеріалами у процесі ударних навантажень, досягаючи мінімального значення – $W = 7,4$ кДж/м², характерного для композиту із вмістом ДХДАФМ – $q = 2,00$ мас.ч. Даний мінімум є ідентичним за значенням ударної в'язкості немодифікованої матриці. Додатковим підтвердженням достовірності проведеного експерименту є наявність антибатної кореляції показників на кривих « $E - q$ » і « $W - q$ ». Зокрема, при концентрації $q = 2,00$ мас.ч. спостерігали максимальне значення модуля пружності та мінімальне значення ударної в'язкості КМ. Відмітимо наявність симбатної кореляції значень на кривих « $E - q$ », « $\sigma_{32} - q$ » і « $W - q$ » у діапазоні концентрацій $q = 0,25 \dots 1,25$ мас.ч., при якому значення усіх трьох показників монотонно знижуються.

Спираючись на отримані результати, обрано дві оптимальні концентрації модифікатора ДХДАФМ в епоксидному олігомері ЕД-20 $-q = 0,25$ мас.ч. та $q = 0,50$ мас.ч. Введення добавки за такого вмісту забезпечує формування КМ з поліпшеними когезійними властивостями (табл. 2).

Фізико-механічні характеристики КМ з оптимальною концентрацією модифікатора ДХДАФМ

Вміст модифікатора ДХДАФМ	Модуль пружності при згинанні, E , ГПа	Руйнівні напруження при згинанні, σ_{32} , МПа	Ударна в'язкість, W , кДж/м ²
Немодифікована матриця	2,8	48	7,4
0,25	2,9	61,8	10,5
0,50	2,9	56,5	8,9

Надалі проводили аналогічні випробування когезійних характеристик КМ при додаванні в епоксидний олігомер ЕД-20 модифікатора ДАФМ. Показано (рис. 6, крива 1), що введення у епоксидний зв'язувач модифікатора незначного вмісту ($q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч.) призводить до зменшення значень модуля пружності від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,6$ ГПа (при $q = 0,25$ мас.ч.). Подальше введення ДАФМ у кількості $q = 0,50 \dots 2,00$ мас.ч. забезпечує монотонне підвищення показників модуля пружності при згинанні КМ. При цьому максимальне значення ($E = 2,9$ ГПа) отримали для композиту із вмістом добавки у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Можна стверджувати, що введення модифікатора у досліджуваному діапазоні концентрацій практично не впливає на модуль пружності епоксидної матриці.

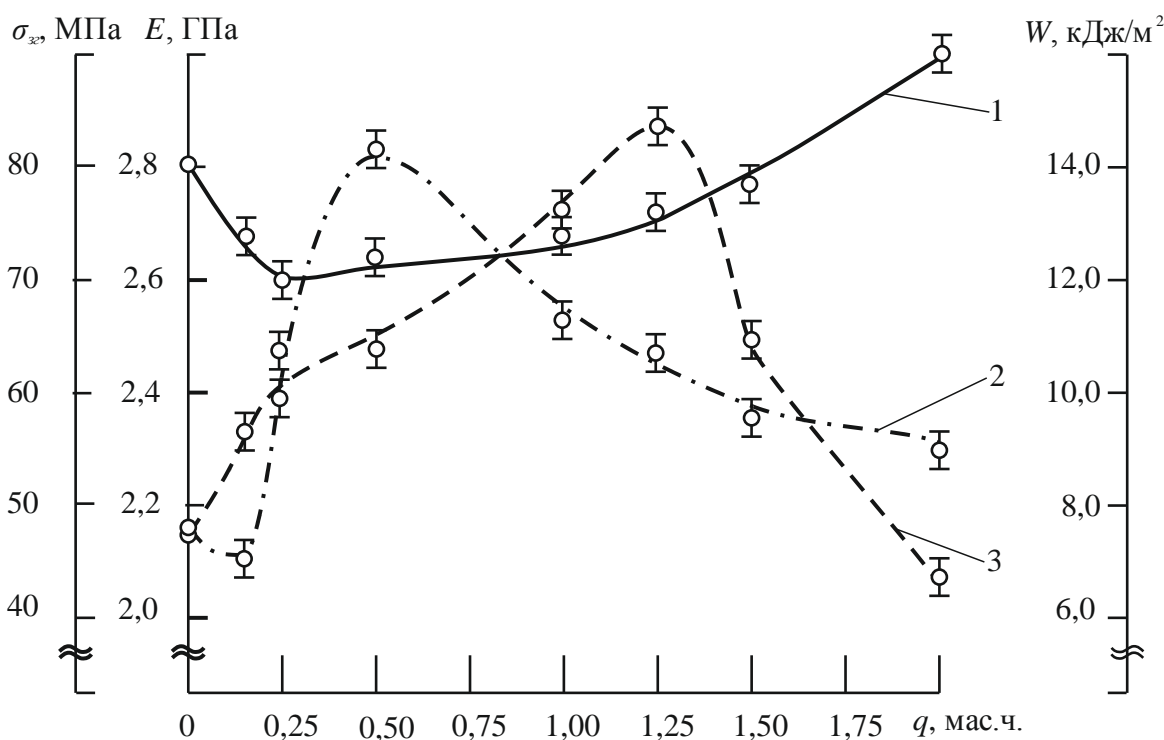


Рис. 6. Вплив модифікатора ДАФМ на фізико-механічні властивості матриці:
1 – модуль пружності при згинанні (E); 2 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32});
3 – ударна в'язкість (W)

При дослідженні руйнівних напружень при згинанні модифікованих КМ можна констатувати наступне. За незначної концентрації добавки ($q = 0,10$ мас.ч.) спостерігали зменшення показників від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа (для вихідної епоксидної матриці) до $\sigma_{32} = 45,5$ МПа (рис. 6, крива 2). Подальше введення модифікатора у кількості $q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч. забезпечує суттєве підвищення значень руйнівних напружень до $\sigma_{32} = 61,0 \dots 80,5$ МПа, причому максимум ($\sigma_{32} = 80,5$ МПа) на кривій залежності « $\sigma_{32} - q$ » спостерігали для КМ із вмістом добавки – $q = 0,50$ мас.ч. Зазначимо, що дане значення суттєво перевищує показник руйнівних напружень немодифікованої епоксидної матриці на основі олігомеру ЕД-20. Припускали, що суттєве поліпшення когезійних властивостей КМ за оптимального вмісту модифікатора зумовлено значною активністю до взаємодії аміногруп (NH_2) модифікатора з боковими групами епоксидного

олігомеру. У цьому випадку формується розгалужена сітка полімеру з великим міжмолекулярним розподілом, що поліпшує пружні властивості розробленого матеріалу. Надалі збільшення кількості ДАФМ призводить до монотонного зниження руйнівних напружень композитів до $\sigma_{32} = 55,8$ МПа за вмісту модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч.

Результати дослідження впливу модифікатора ДАФМ на ударну в'язкість отриманих матеріалів довели наступне. Навіть при мінімальному вмісті добавки ($q = 0,10$ мас.ч.) ударна в'язкість КМ збільшується від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 9,1$ кДж/м² (рис. 6, крива 3). Подальше збільшення концентрації ДАФМ у діапазоні $q = 0,25 \dots 1,25$ мас.ч. забезпечує підвищення ударної в'язкості КМ до $W = 10,1 \dots 14,8$ кДж/м². Надалі збільшення вмісту добавки ($q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч.) призводить до суттєво погіршення показників ударної в'язкості до $W = 6,4$ кДж/м². Таким чином спостерігали антибатну кореляцію показників на кривих « $E - q$ » та « $W - q$ », де максимум модуля пружності співпадає із мінімумом ударної в'язкості. Додатково виявлено симбатну кореляцію показників руйнівних напружень при згинанні і ударної в'язкості, де присутнє синхронне збільшення показників властивостей КМ за вмісту добавки – $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. і їх зменшення за вмісту ДАФМ – $q = 1,25 \dots 2,00$ мас.ч. відповідно.

Виходячи з наведених вище результатів дослідження, обрано дві оптимальні концентрації модифікатора ДАФМ в епоксидному олігомері ЕД-20 – $q = 0,50$ мас.ч. та $q = 1,00$ мас.ч. Введення добавки за такого вмісту забезпечує формування КМ з поліпшеними когезійними властивостями (табл.3).

Таблиця 3

Фізико-механічні характеристики КМ з оптимальною концентрацією модифікатора ДАФМ

Вміст модифікатора ДАФМ	Модуль пружності при згинанні, E , ГПа	Руйнівні напруження при згинанні, σ_{32} , МПа	Ударна в'язкість, W , кДж/м ²
Немодифікована матриця	2,8	48,0	7,4
0,50	2,6	80,5	11,0
1,00	2,7	61,8	12,8

Для вибору кращого з двох модифікаторів проведено порівняльний аналіз властивостей розроблених епоксикомпозитів (табл. 4).

Після проведеного порівняння властивостей КМ з оптимальними концентраціями обох модифікаторів зробили припущення, що наявність атомів хлору у модифікаторі ДХДАФМ ($C_{13}H_{12}Cl_2N_2$) призводить до незначного послаблення хімічних та фізичних зв'язків у структурній сітці полімеру. Це позначається на когезійних характеристиках новоутворених композитних матеріалів. Припускали, що вагомою причиною суттєвого підвищення когезійних властивостей утворених КМ є наявність аміногруп, ідентичних до існуючих у епоксидного олігомеру і твердника ПЕПА. Вважали, що введення модифікатора в даних пропорціях приводить до утворення фізико-хімічних реакцій, утворюючих поєднання структурних сіток модифікатора та олігомеру, що, у свою чергу, приводить до збільшення густини просторової сітки матриці у цілому. Як наслідок, міцність матеріалу суттєво збільшується через рівномірне розподілення концентраторів напруг у об'ємі композиту за критичного вмісту модифікатора. Подальше збільшення концентрації добавок поступово перевантажує реакційну систему у консолідації утворення реакційноздатних груп, і, як наслідок, хаотично розташовує новоутворені концентратори напруг по усьому об'єму КМ. Це призводить до неповного зшивання макромолекул компонентів у гомогенній системі.

Таблиця 4

Фізико-механічні властивості КМ з модифікаторами ДХДАФМ і ДАФМ за оптимального вмісту

Критерій порівняння	Концентрація модифікатора, q , мас.ч.		
	0,25	0,50	1,00
Модуль пружності при згинанні КМ, модифікованих ДХДАФМ, E , ГПа	2,9	2,9	2,7
Модуль пружності при згинанні КМ, модифікованих ДАФМ, E , ГПа	2,6	2,6	2,7
Руйнівні напруження при згинанні КМ,	61,8	56,5	44,8

модифікованих ДХДАФМ, σ_{3z} , МПа			
Руйнівні напруження при згинанні КМ, модифікованих ДАФМ, σ_{3z} , МПа	61,0	80,5	67,8
Ударна в'язкість КМ, модифікованих ДХДАФМ, W , кДж/м ²	10,5	8,9	8,3
Ударна в'язкість КМ, модифікованих ДАФМ, W , кДж/м ²	10,1	11,0	12,8

Висновки. Спираючись на порівняльний аналіз результатів, отриманих внаслідок проведення експериментів для визначення оптимальної концентрації модифікаторів ДХДАФМ і ДАФМ, та з метою створення композитних матеріалів з покращеними когезійними властивостями встановлено наступне.

1. Введення модифікатора 3,3' - дихлор - 4,4' -діамінодифенілметану в епоксидний олігомер ЕД-20 є критичним при концентрації $q = 0,25$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. У цьому випадку формується матеріал з покращеними фізико-механічними властивостями порівняно з вихідною (ненаповненою) епоксидною матрицею: модуль пружності при згинанні зростає від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,9$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 61,8$ МПа, а ударна в'язкість від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 10,5$ кДж/м²;

2. Введення модифікатора 3,3' - дихлор - 4,4' -діамінодифенілметану в епоксидний олігомер ЕД-20 є додатково критичним при концентрації $q = 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. У цьому випадку формується матеріал з покращеними фізико-механічними властивостями порівняно з вихідною (ненаповненою) епоксидною матрицею: модуль пружності при згинанні зростає від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,9$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 56,5$ МПа, а ударна в'язкість від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 8,9$ кДж/м²;

3. Введення модифікатора 4,4-діамінодифенілметану в епоксидний олігомер ЕД-20 є критичним при концентрації $q = 0,50$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. У цьому випадку формується матеріал з покращеними фізико-механічними властивостями порівняно з вихідною (ненаповненою) епоксидною матрицею: модуль пружності при згинанні при цьому зменшується від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,6$ ГПа, однак руйнівні напруження при згинанні збільшуються від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 80,5$ МПа, а ударна в'язкість від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 11,0$ кДж/м²;

4. Введення модифікатора 4,4-діамінодифенілметану в епоксидний олігомер ЕД-20 є додатково критичним при концентрації $q = 1,00$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. У цьому випадку формується матеріал з покращеними фізико-механічними властивостями порівняно з вихідною (ненаповненою) епоксидною матрицею: модуль пружності при згинанні при цьому зменшується від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,7$ ГПа, однак руйнівні напруження при згинанні збільшуються від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 67,8$ МПа, а ударна в'язкість від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 12,8$ кДж/м².

Література

1. Чернин И.З. Эпоксидные полимеры и композиции / И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердев. – М.: Химия, 1982. – 232 с.
2. Тхір І.Г. Фізико-хімія полімерів: навч. посібник/ І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький. – Львів: Вид. нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
3. Букетов, А.В. Исследование влияния 1,4-бис(N,N-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.
4. Букетов, А.В. Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленбис(4,1-фенилен)бис(N,N-диэтилдитиокарбамата) на структуру и свойства эпоксидной матрицы [Текст] / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, В.О. Скирденко // Пластические массы. – 2014. – № 7-8. – С. 9-16.
5. Михайлин, Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы/ Ю.А. Михайлин. – С-Пб.: Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.
6. Богданова, Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов / Ю.Г. Богданова. – М.: Научно-образовательный центр по нанотехнологиям, 2010. – 68 с.
7. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие для вузов по специальности «Технология перераб. пласт. масс и эластомеров» / Кербер М. Л. и др.; под общ. ред. Берлина А.А. – СПб.: Профессия, 2008. – 557 с.

8. Букетов, А.В. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипиренатрихлорэтилфосфата / А.В. Букетов, А.В. Акимов, Д.А. Зинченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2015.- № 5. - С. 126-134.

9. Букетов А.В. Захисні епоксикомпозитні покриття з поліпшеними антикорозійними властивостями і зносостійкістю / А.В.Букетов, М.Ю.Амелін, О.М.Безбах, Р.Ю.Негруца// Вісник ХНТУ. – 2018. - № 2 (65). – С. 11-18.

10. Букетов А.В. Вплив модифікатора 4-амінобензойної кислоти на фізико-механічні властивості епоксидних композитних матеріалів / А.В.Букетов, А.Г.Кулініч, В.М.Гусев, С.О.Сметанкін, В.М.Яцюк// Вісник ХНТУ. – 2018. - № 2 (65). – С. 19-26.

11. Brailo M. The investigation of tribological properties of epoxy-polyethercomposite materials for using in the friction units of means of seatransport / M. Brailo, A. Buketov, S. Yakushchenko, O. Sapronov, V. Vynar, O. Kobelnik // Materials performance and characterization. – V. 7. – N. 1. – 2018. –P. 275–299. (doi:10.1520/MPC20170161 / availableonline atwww.astm.org).

12. Букетов А.В. Прочность сцепления при отрыве и сдвиге эпоксидных нанокompозитных покрытий, наполненных ультрадисперсным алмазом / А.В.Букетов, Н.А.Долгов, А.А.Сапронов, В.Д. Нигалатий // Проблемы прочности. – 2018. – №3. – С.71-78.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2019