

УДК 667.64:678.026

А. Букетов, докт. техн. наук; М. Браїло

Херсонська державна морська академія

ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ І ПРИРОДИ ІНГРЕДІЄНТІВ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ ЗА ЇЇ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Резюме. Доведено поліпшення характеристик матриці на основі епоксидного олігомеру CHS-Epoxy 525 і твердника ПЕПА при підвищенні температури полімеризації. Проаналізовано тенденцію динаміки властивостей матриці при взаємодії твердників у комплексі. Встановлено, що показники характеристик отриманого матеріалу змінюються пропорційно вмісту того чи іншого твердника. Відповідно до отриманих результатів досліджень запропоновано застосовувати матеріали з різною концентрацією твердників ПЕПА і Telalit 410 для формування адгезійного та когезійного шарів у двошарових покриттях. Це сприятиме поліпшенню як адгезійних властивостей покриттів, так і їх когезійних характеристик, особливо при експлуатації матеріалів при знакозмінних навантаженнях і підвищених температурах. Результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з випробуваннями фізико-механічних та теплофізичних властивостей матеріалів. При цьому аналіз світлин зламу дозволив не лише підтвердити динаміку залишкових напружень від вмісту твердників, але й констатувати достовірність попередньо отриманих результатів і правильність вибору матриці за оптимальної концентрації твердників для практичного застосування матеріалів, які експлуатуються в умовах впливу підвищених знакозмінних навантажень та температур.

Ключові слова: епоксикомпозит, наповнювач, адгезивний та когезивний шар, фізичні, механічні та термічні властивості..

A. Buketov, M. Brailo

OPTIMIZATION OF EPOXY MATRIX CONTENT AND NATURE ACCORDING TO ITS PROPERTIES

Summary. The improvement of matrix characteristics on the basis of epoxy oligomer CHS-Epoxy 525 and PEPA hardener under rising of polymerization temperature was proved. The analysis of matrix properties when hardeners interact, demonstrated that the change in the operating characteristics of the obtained material is proportional to the content of the hardener. According to the researched results materials with different concentrations of PEPA and Telalit 410 hardeners are proposed to be used to form a cohesive and adhesive layers in two-layer coatings.

It was experimentally proved that using coatings with improved adhesion properties it is necessary to form the material on the basis of epoxy matrix CHS-Epoxy 525 (100 parts) and hardeners containing PEPA + Telalit 410 = (4 +6) parts.

It was also proved that to make coatings with improved cohesive properties to form matrix based on epoxy resin CHS-Epoxy 525 (100 parts) and hardeners (PEPA + Telalit 410) = (5 +5) parts is of greater importance. It will improve coatings properties and their reliability, especially when operating under alternating loads and high temperatures.

The results obtained by the optical microscopy testify all physical, mechanical and thermal properties. The analysis of fracture surface images testifies the dynamics of residual stresses with different content of hardeners. The proper choice of matrix forming technology with the optimal hardeners concentration for practical application of materials under the dynamic loads and temperature was proved.

Key words: epoxy composite, hardener, adhesive and cohesive layer, physical, mechanical and thermal properties.

Постановка проблеми. Високі показники фізико-механічних та антикорозійних властивостей, незначна повзучість та підвищена зносостійкість, а також відносно прості умови формування сприяють широкому застосуванню полімерних епоксидних композитних матеріалів (КМ) у різних галузях промисловості. Епоксикомпозити широко використовують у вигляді виробів, які відзначаються високою зносостійкістю

при терті в агресивних середовищах, або як захисні антикорозійні покриття у судно-, літако-, машинобудуванні, нафтопереробній, газотранспортній та хімічній промисловості [1,2]. Актуальним постає завдання дослідження і встановлення оптимальної концентрації компонентів, а також аналіз перебігу фізико-хімічних процесів при їх взаємодії, що є визначальними критеріями для отримання матеріалів зі структурою, яка забезпечує поліпшені їх адгезійні та когезійні властивості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні широко й ефективно використовують КМ на основі епоксидної смоли ЕД-20 (ГОСТ 10587-84) та твердника поліетиленполіаміну (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78) [1-5]. Проте існує велика кількість компонентів для зв'язувачів, які характеризуються не лише індивідуальними параметрами структури, але й здатністю до поліпшеної взаємодії під час полімеризації епоксидної матриці [1, 2, 5]. У цьому аспекті цікавими для дослідження є твердник Telalit 410 та олігомер CHS-Ероху 525 (виробництво Чехії), який є аналогом епоксидної смоли ЕД-20. Попередньо було досліджено вплив концентрації та температурних режимів формування епоксидної матриці, зшиті твердниками ПЕПА і Telalit 410 незалежно [5]. Актуальними є дослідження впливу даних твердників у комплексі на поліпшення властивостей матриці.

Мета роботи – оптимізувати вміст твердників ПЕПА і Telalit 410 у епоксидному зв'язувачі на основі олігомера CHS-Ероху 525 за показниками фізико-механічних та теплофізичних властивостей.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача вибрано низькомолекулярний епоксидний олігомер марки CHS-Ероху 525, який не має у своєму складі модифікаторів і є аналогом епоксидного діанового олігомера ЕД-20. Для зшивання епоксидних композицій використано у поєднанні вітчизняний твердник ПЕПА та модифікований аміноаддуктовий твердник на основі аліфатичного поліаміну марки Telalit 410. Співвідношення концентрації твердників змінювали у межах: $(q_1 + q_2) = (0 \dots 10)$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера CHS-Ероху 525.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження при рівномірному відриві пари склеєних зразків («метод грибків») згідно ГОСТ 14760-69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно з ГОСТом 14759-69. Діаметр зразків становив $d=25$ мм. Залишкові напруження визначали консольним методом [4]. Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТом 4648-71 і ГОСТом 9550-81 відповідно. Параметри зразків: $120 \times 15 \times 10$ мм. Теплостійкість (за Мартенсом) визначали згідно з ГОСТом 21341-75. Структуру КМ досліджували на металографічному мікроскопі моделі XJL - 17AT, який обладнаний камерою 130 UMD (1,3 Mega Pixels).

Затверджували матеріали за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримування упродовж часу $t = 12,0 \pm 0,1$ год при температурі $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 433 \pm 2$ К, витримування зразків при даній температурі упродовж часу $t = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів зразки витримували упродовж часу $t = 24$ год на повітрі при температурі $T = 293 \pm 2$ К.

Результати досліджень та їх обговорення. Загальновідомо [1, 2, 5], що оптимальна температура зшивання КМ на основі епоксидної смоли ЕД-20 і твердника ПЕПА становить $T = 393$ К. У результаті попередніх досліджень нами визначено оптимальну температуру зшивання епоксидної матриці з твердником Telalit 410 ($T = 433$ К), при якій отримали поліпшені фізико-механічні властивості матеріалу. Вважали, що для подальшого поєднання твердників у одній композиції і визначення їх критичної концентрації, на початковому етапі необхідно встановити оптимальну

температуру зшивання за показниками фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Результати дослідження властивостей матриць за різних температур зшивання наведено у табл. 1 (вміст твердника й олігомеру вибрано у співвідношенні 1:10).

Аналізуючи отримані результати (табл. 1), можна констатувати, що фізико-механічні властивості матеріалу (матриця 2) на основі епоксидної смоли і твердника ПЕПА при підвищеній температурі зшивання ($T = 433$ К) значно поліпшилися порівняно з аналогічною матрицею, затвердженою при температурі $T = 393$ К (матриця 1). Зокрема, підвищилися показники адгезійних властивостей при відриві і зсуві (з $\sigma_a = 18,5$ до $\sigma_a = 22,4$ МПа та з $\tau = 8,9$ до $\tau = 9,1$ МПа відповідно). Але при цьому і зросли залишкові напруження матеріалу (з $\sigma_3 = 2,3$ до $\sigma_3 = 3,6$ МПа). Крім того, суттєво підвищилися показники деяких фізико-механічних та теплофізичних властивостей: руйнівні напруження при згинанні матриці зросли майже у 2,5 раза (з $\sigma_{32} = 47,6$ до $\sigma_{32} = 117,3$ МПа), а теплостійкість – з $T = 338$ до $T = 349$ К. При цьому модуль пружності при згинанні матеріалу майже не змінився ($\Delta E = 0,1$ ГПа), а, термічний коефіцієнт лінійного розширення збільшився на $\Delta\alpha = 3,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, що, у свою чергу, негативно впливає на поведінку системи «основа – покриття» при її експлуатації за підвищених температур. Проте можна стверджувати, що підвищення температури зшивання до $T = 433$ К має загалом, якщо брати до уваги весь комплекс характеристик, вагомий вплив на поліпшення властивостей матеріалу. Це можна пояснити тим, що при підвищеній температурі (за описаних у методиці досліджень умов формування матеріалів) відбувається додаткова полімеризація матеріалу, внаслідок чого покращується взаємодія твердника з олігомером.

Експериментально встановлено (табл. 1), що, в основному, властивості матриці 3, сформованої на основі епоксидної смоли СНS-Ероху 525 і твердника Telalit 410 при температурі зшивання $T = 433$ К, є кращими, порівняно з властивостями матриці 2, отриманої на основі епоксидної смоли СНS-Ероху 525 і твердника ПЕПА при таких же умовах формування. Зокрема показано, що для матриці 3, порівняно з матрицею 2, адгезійна міцність при відриві й зсуві є вищою на $\Delta\sigma_a = 10,0$ МПа та $\Delta\tau = 3,2$ МПа відповідно, залишкові напруження і ТКЛР є меншими на $\Delta\sigma_3 = 0,4$ МПа і $\Delta\alpha = 4,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ відповідно, а модуль пружності при згинанні також суттєво підвищується з $E = 2,9$ до $E = 4,1$ ГПа при зшиванні матриці твердником Telalit 410. Слід зауважити, що водночас спостерігали й погіршення деяких характеристик матриці при заміні твердника ПЕПА на Telalit 410. Доведено (табл. 1), що руйнівні напруження при згинанні матриці 3, порівняно з матрицею 2, є меншими на $\Delta\sigma_{32} = 68,0$ МПа, а теплостійкість на $\Delta T = 20$ К відповідно. Такі дані, отримані методом ІЧ-спектроскопії можна пояснити результатами досліджень. Встановлено, що при зшиванні епоксидного олігомеру твердник Telalit 410 забезпечує ефективнішу дію на розкриття епоксидних груп, що сприяє поліпшенню адгезійних і, у деяких випадках, когезійних властивостей матеріалу. Навпаки, введення в олігомер твердника ПЕПА сприяє активації до взаємодії гідроксильних і карбоксильних груп, що, у свою чергу, забезпечує високий вміст гель-фракції у матеріалі. Це, у свою чергу, забезпечує підвищення когезійних властивостей матеріалів при умовах їх експлуатації за кімнатних чи підвищених температур.

Таблиця 1

Фізико-механічні та теплофізичні властивості епоксидних матриць

Властивості		Матриця 1	Матриця 2	Матриця 3
Адгезійні та	σ_a , МПа	18,5	22,4	34,4

фізико-механічні	τ , МПа	8,9	9,1	12,3
	σ_3 , МПа	2,3	3,6	3,2
	E , ГПа	2,8	2,9	4,1
	σ_{3z} , МПа	47,6	117,3	49,3
Теплофізичні	T , К	338	349	319
	$\alpha \times 10^{-5}$, К ⁻¹	6,6	9,6	5,2

Примітка. σ_a – адгезійна міцність при відриві; τ – адгезійна міцність при зсуві; σ_3 – залишкові напруження; E – модуль пружності при згинанні; σ_{3z} – руйнівне напруження при згинанні; T – теплостійкість (за Мартенсом); α – ТКЛР (при $\Delta T = 303 \dots 423$ К);

Матриця 1 – матриця на основі епоксидної смоли ЕД-20 і твердника ПЕПА при температурі зшивання $T = 393$ К;

Матриця 2 – матриця на основі епоксидної смоли СНS-Ероху 525 і твердника ПЕПА при температурі зшивання $T = 433$ К;

Матриця 3 – матриця на основі епоксидної смоли СНS-Ероху 525 і твердника Telalit 410 при температурі зшивання $T = 433$ К.

Виходячи з наведеного вище, вважали за доцільне вводити у зв'язувач у комплексі два твердники різної природи за різного їх співвідношення. Причому встановлено, що оптимальний вміст твердника ПЕПА в олігомері становить $q = 10$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомера (тут і далі за текстом вміст твердника наведено у мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру). Також доведено, що найкращі властивості має матеріал, полімеризований твердником Telalit 410, при вмісті останнього також $q = 10$ мас.ч. Тому надалі випробування проводили у діапазоні концентрацій твердників – $(q_1 + q_2) = (0 \dots 10)$ мас.ч. за температури зшивання $T = 433$ К.

Результати дослідження адгезійної міцності й залишкових напружень матриці за різного вмісту твердників наведено на рис. 1. Встановлено (рис. 1, крива 1), що адгезійна міцність при відриві матриці монотонно зростає пропорційно збільшенню вмісту твердника Telalit 410 з $\sigma_a = 22,4$ (для матриці, зшитої лише твердником ПЕПА) до $\sigma_a = 33,8$ МПа (для матриці, за концентрації твердників $(q_1 + q_2) = (4 + 6)$ мас.ч.).

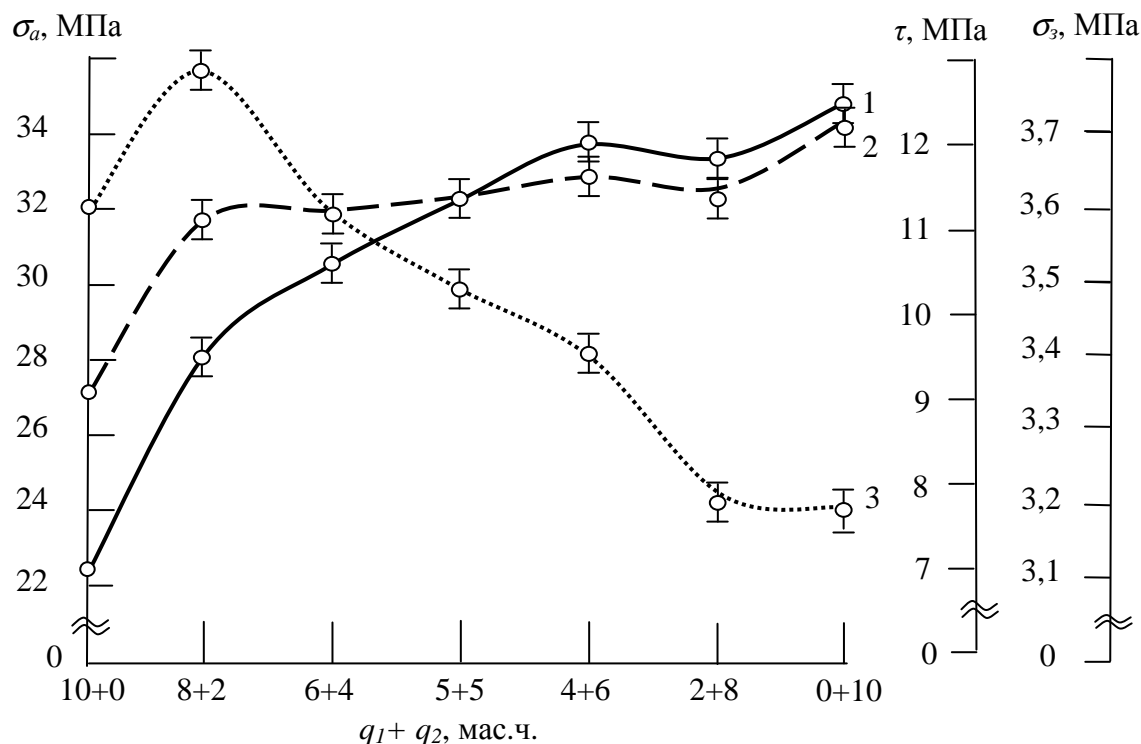


Рисунок 1. Залежність адгезійних властивостей і залишкових напружень у матриці від вмісту твердників у комплексі (q_1 – вміст твердника ПЕПА; q_2 – вміст твердника Telalit 410): 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3)

Figure 1. The dependence of adhesion and residual stress of the matrix complex content hardener (q_1 – PEPA hardener content; q_2 – Telalit 410 hardener content): 1 – the adhesive strength in the separation (σ_a); 2 – the adhesion strength in shear (τ) 3 – the residual stresses (σ_3)

Надалі збільшення вмісту твердника Telalit 410 не забезпечує суттєвого підвищення показників адгезійної міцності (при вмісті компонентів $(q_1 + q_2) = (0 + 10)$ мас.ч. $\sigma_a = 34,4$ МПа). Аналогічно на кривій залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту твердників інтенсивне зростання показників адгезійних характеристик спостерігали з $\tau = 9,1$ (для матриці, зшитої лише твердником ПЕПА) до $\tau = 11,6$ МПа (при збільшенні вмісту твердника Telalit 410 до концентрації $(q_1 + q_2) = (4 + 6)$ мас.ч.). Отримані значення майже не відрізняються від показників адгезійної міцності при зсуві матриці, зшитої лише твердником Telalit 410, для якої $\tau = 12,3$ МПа. Таке явище поліпшення властивостей є логічним, оскільки вище було описано, що введення твердника Telalit 410 сприяє розкриттю епоксидних груп у епоксидному олігомері.

Водночас слід звернути увагу на динаміку залишкових напружень при зміні сукупної концентрації твердників у матриці. Встановлено (рис. 1, крива 3), що значення залишкових напружень збільшуються з $\sigma_3 = 3,6$ (для матриці, зшитої лише твердником ПЕПА) до $\sigma_3 = 3,8$ МПа (при вмісті твердників $(q_1 + q_2) = (2 + 8)$ мас.ч.). Це свідчить про одночасну взаємодію обох твердників з епоксидними та гідроксильними групами олігомеру, що викликає суттєве підвищення показників напружень.

Отже, згідно з наведеними вище результатами досліджень встановлено, що максимальні показники адгезійних властивостей та мінімальні значення залишкових напружень отримали при вмісті твердника Telalit 410 ($(q_1 + q_2) = (0 + 10)$ мас.ч.). Проте можна констатувати, що введення твердників у комплексі ($(q_1 + q_2) = (4 + 6)$ мас.ч.) забезпечує формування матриці з властивостями, які майже не відрізняються від

властивостей матеріалу, зшитого твердником Telalit 410. Врахувавши зменшення собівартості матеріалу, позаяк Telalit 410 у 1,4 раза дорожчий від ПЕПА, вважали за необхідне вибрати для формування матриці з поліпшеними адгезійними властивостями таке співвідношення твердників: ПЕПА + Telalit 410 = (4 + 6) мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру CHS-Ероху 525.

На наступному етапі досліджували при різному вмісті твердників когезійні властивості матеріалів. Встановлено монотонне зменшення показників руйнівного напруження при згинанні і теплостійкості матриці при збільшенні концентрації твердника Telalit 410 (рис.2).

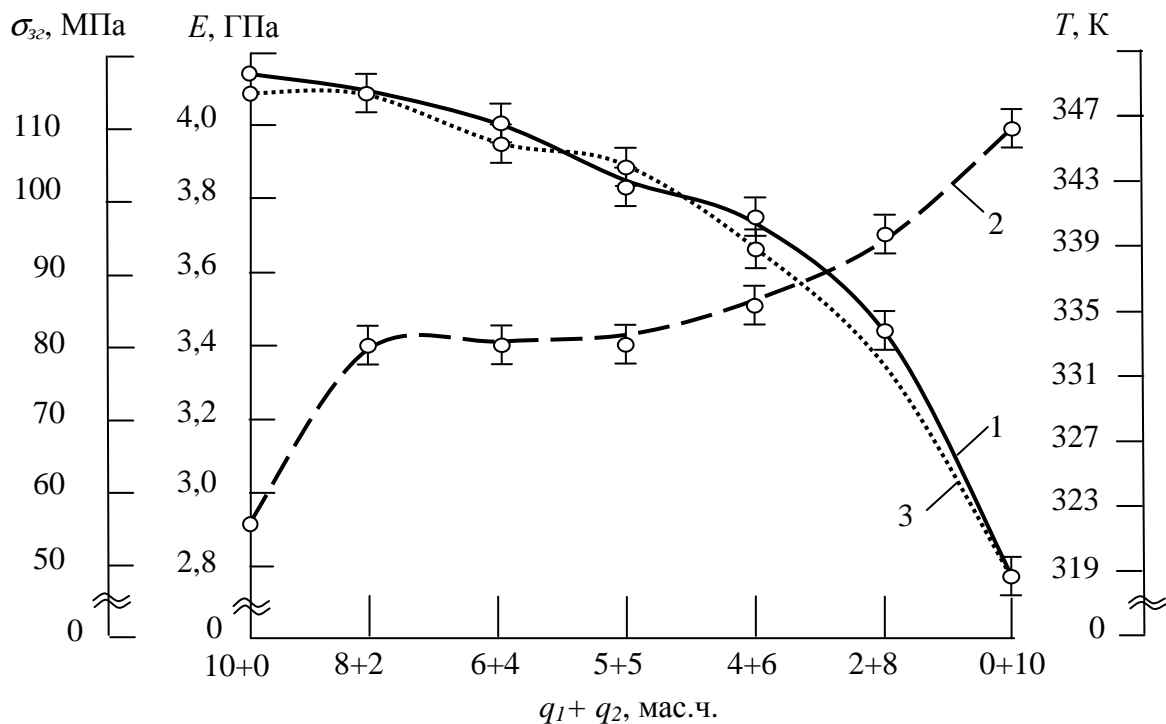


Рисунок 2. Залежність фізико-механічних властивостей і теплостійкості матриці від вмісту твердників у комплексі: 1 – руйнівне напруження при згинанні (σ_{3z}); 2 – модуль пружності при згинанні (E); 3 – теплостійкість (за Мартенсом)(T)

Figure 2. Dependence of the physico-mechanical properties and heat resistance of matrix hardener content in the complex: 1 – destructive stress in bending (σ_{3z}); 2 – modulus of elasticity in bending (E); 3 – heat endurance (Martens) (T)

Збільшення концентрації твердника Telalit 410, навпаки призводить до монотонного зростання показників модуля пружності при згинанні матриці (рис. 2, крива 2). Така неаддитивна динаміка властивостей матриці зі зміною вмісту твердників зумовлена, на наш погляд, різним механізмом впливу інгредієнтів на процеси структуроутворення матеріалів. Це, відповідно, проявляється як на зміні властивостей матриці (залежно від концентрації твердників у комплексі) під навантаженням, так і в умовах впливу теплового поля.

Для детальнішого аналізу цих процесів і, відповідно, оптимізації вмісту твердників у зв'язувачі додатково досліджували теплофізичні властивості матеріалів. При аналізі динаміки температури склування матеріалів встановлено (табл. 2), що показники (T_c) зменшуються зі збільшенням вмісту твердника Telalit 410. Отримані результати корелюють зі зміною показників теплостійкості (за Мартенсом) матеріалів. При цьому розраховані за дилатометричними кривими діапазони ділянок температури склування збігаються з показниками теплостійкості цих же матеріалів, що свідчить про

достовірність отриманих результатів. Додатково встановлено (табл. 2), що усадка матеріалів при збільшенні концентрації твердника Telalit 410 також зростає.

Отже, з наведених вище результатів дослідження можна підсумувати, що при введенні в епоксидний зв'язувач твердників Telalit 410 і ПЕПА у комплексі під час наступної полімеризації формуються матеріали, показники властивостей яких набувають значень, близьких до матриць на основі олігомеру і твердників, взятих окремо. Причому зростання значень відбувається пропорційно вмісту того чи іншого твердника.

Таблиця 2

Температурні діапазони ділянки склування та показники усадки епоксидних матриць з різним вмістом твердників

Характеристики	$(q_1 + q_2)$, мас.ч.				
	8+2	6+4	5+5	4+6	2+8
T_c , К	360	358	355	352	346
Ділянка склування, ΔT , К	338...360	335...355	333...353	329...350	322...343
Усадка матриці, $\Delta V \times 10^{-9} \text{ м}^3$	43,0	45,9	48,7	54,5	56,8

Відповідно до отриманих результатів досліджень пропонується застосовувати різні матриці для формування адгезійного та когезійного шарів у двошарових захисних покриттях. Для формування антикорозійного покриття, де необхідні максимальні показники адгезійних властивостей, слід наносити адгезійний шар на основі матриці, зшитої твердниками за концентрацій $(q_1 + q_2) = (4 + 6)$ мас.ч. За необхідності застосування матеріалу при підвищених механічних навантаженнях і знакозмінних температурах, наприклад, при терті, слід використовувати епоксидну матрицю, зшиту твердниками за концентрацій $(q_1 + q_2) = (5 + 5)$ мас.ч.

Методом оптичної мікроскопії додатково досліджували структуру зламу отриманих матриць. Встановлено (рис. 3), що загалом матеріали характеризуються складним напруженим станом. Структура поверхні зламу при різному вмісті твердників має різний характер, але помітна тенденція, що зі збільшенням вмісту твердника Telalit 410 поверхня зламу зразків стає більш пологою та в'язкою. При цьому лінії сколювання набувають більш лінійного, рівномірного і прямого волокнистого характеру, що не є характерним для зразків, полімеризованих твердником ПЕПА (за високих концентрацій). Навпаки, для таких матеріалів спостерігали лінії сколювання хаотичного і глобулярного характеру, направлені у різні боки від напрямку поширення тріщини. При цьому утворюється сітка тріщин із нерівномірним їх розподілом в об'ємі матриці та на поверхні сколювання. Такі тріщини, зазвичай, утворюються при руйнуванні матеріалу з високими показниками залишкових напружень. Це додатково підтверджується тим, що матриця із вмістом твердників $(q_1 + q_2) = (10 + 0)$ мас.ч. (рис.3а, б) мають високі залишкові напруження, які зумовлюють виникнення та поширення тріщин в об'єм матеріалу при ударному руйнуванні. Аналіз світлин із вмістом твердників $(q_1 + q_2) = (5 + 5)$ мас.ч. (рис.3в, г) дозволяє стверджувати, що лінії сколювання не утворюють глибоких та різких кратерів, вони формуються плавними і без особливо розгалужених та явно виражених траєкторій. Можна опосередковано констатувати, що дана матриця має порівняно однакові, що й матеріал, зшитий лише твердником Telalit 410, залишкові напруження. У матриці із вмістом твердників $(q_1 + q_2) = (0 + 10)$ мас.ч. спостерігали поверхню зламу, яка характеризується рельєфом з найменшою волокнистістю і перепадами (рис. 3, г, д). Це дає привід стверджувати про формування структури матеріалу із незначним напруженим станом.

Отже, можна зробити висновок, що результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з випробуваннями фізико-механічних та теплофізичних властивостей матеріалів. При цьому аналіз фрактограм зламу дозволив не лише підтвердити динаміку залишкових напружень від умісту твердників, але й констатувати про достовірність попередньо отриманих результатів і правильність вибору матриці за концентрації твердників $(q_1 + q_2) = (5 + 5)$ мас.ч. для практичного застосування матеріалів, які експлуатуються в умовах впливу підвищених знакозмінних навантажень і температур.

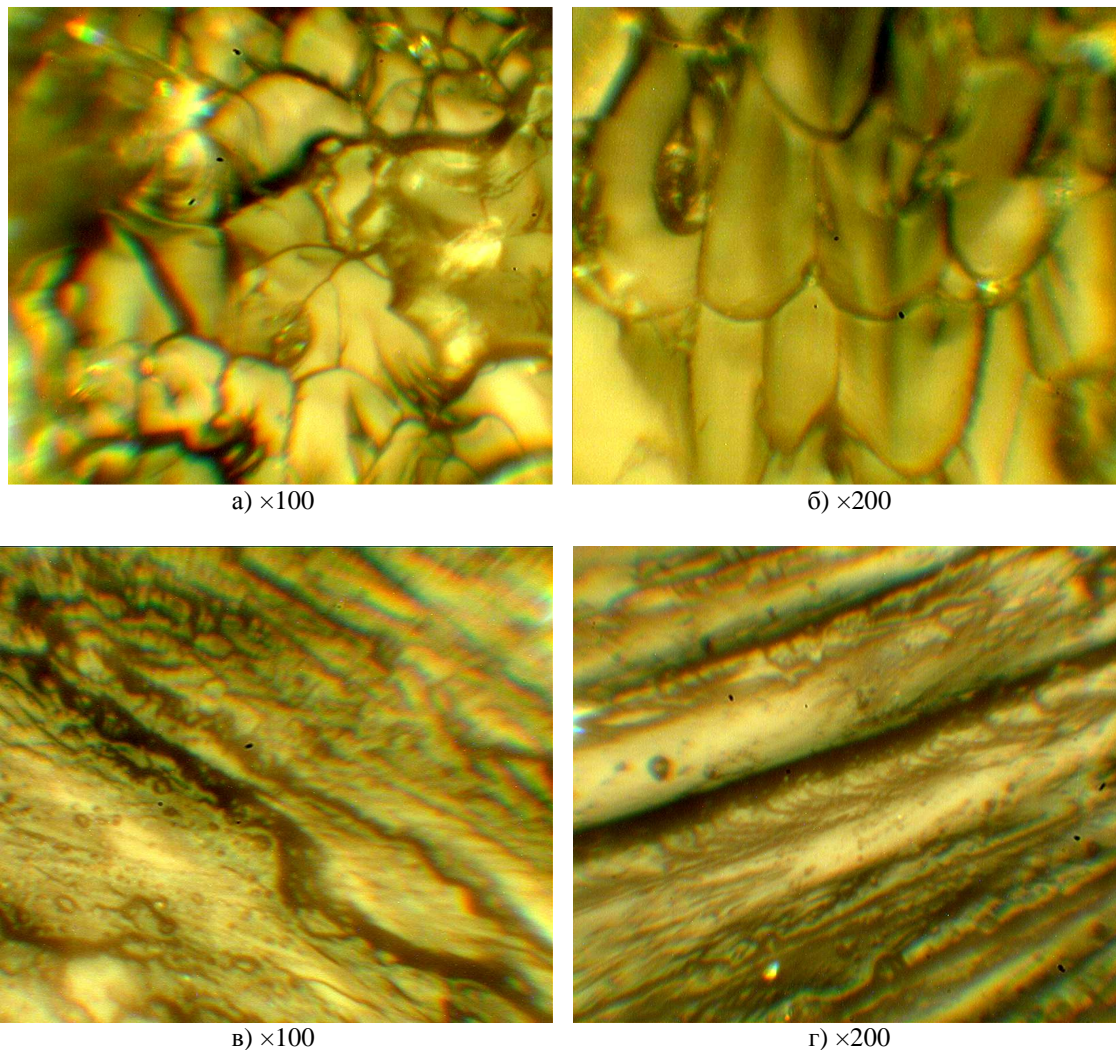


Рисунок 3. Фрактограми зламу епоксидних матриць:
 а), б) $(q_1 + q_2) = (10 + 0)$ мас.ч.; в), г) $(q_1 + q_2) = (5 + 5)$ мас.ч.; г), д) $(q_1 + q_2) = (0 + 10)$ мас.ч.

Figure 3. Fraktogramy fracture of epoxy matrix:
 а), б) $(q_1 + q_2) = (10 + 0)$ parts; в), г) $(q_1 + q_2) = (5 + 5)$ parts; г), д) $(q_1 + q_2) = (0 + 10)$ parts

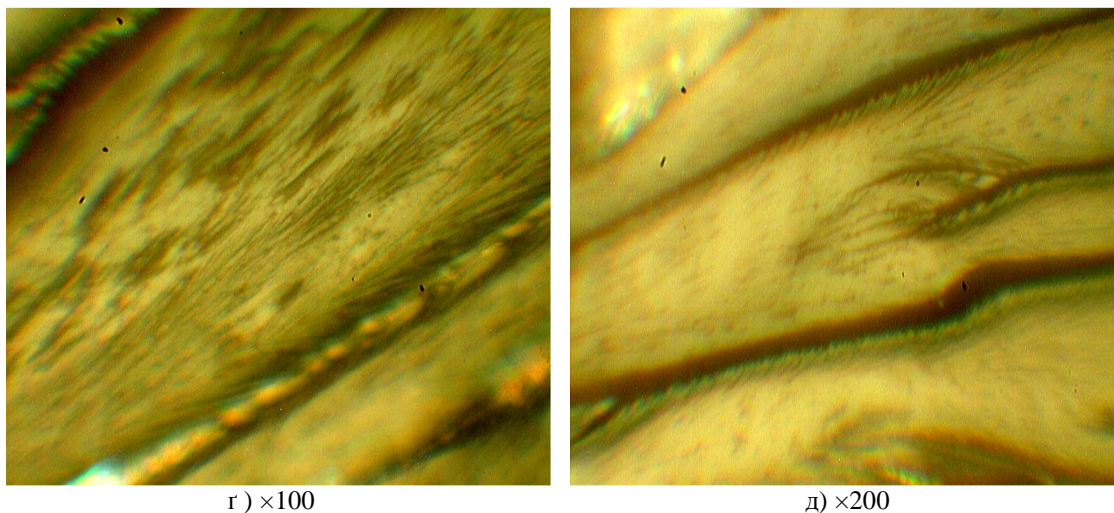


Рисунок 3 (продовження)

Figure 3 (continuation)

Висновки. Встановлено, що підвищення температури полімеризації матриці на основі епоксидного олігомеру і твердника ПЕПА з $T = 393$ до $T = 433$ К за вибраних часових параметрів формування забезпечує поліпшення фізико-механічних та теплофізичних властивостей матеріалу.

Проаналізовано тенденцію динаміки властивостей матриці при взаємодії твердників у комплексі й встановлено, що показники характеристик отриманого матеріалу змінюються пропорційно вмісту того чи іншого твердника.

Відповідно до отриманих результатів досліджень запропоновано застосовувати матеріали з різною концентрацією твердників для формування адгезійного та когезійного шарів у двошарових покриттях. Це сприятиме поліпшенню як адгезійних властивостей покриттів, так і їх когезійних характеристик, особливо при експлуатації матеріалів при знакозмінних навантаженнях і підвищених температурах.

Експериментально встановлено, що при використанні покриттів з поліпшеними адгезійними властивостями слід формувати матеріал на основі матриці з епоксидної смоли СНS-Ероху 525 (100 мас.ч.) і твердників ПЕПА + Telalit 410 ($q_1 + q_2$) = (4 + 6) мас.ч. При цьому адгезійна міцність матриці при відриві становить $\sigma_a = 33,8$ МПа, при зсуві $\tau = 11,6$ МПа, а залишкові напруження – $\sigma_3 = 3,4$ МПа.

Досліджено, що при використанні покриттів з поліпшеними когезійними властивостями слід формувати матеріал на основі матриці з епоксидної смоли СНS-Ероху 525 (100 мас.ч.) і твердників ПЕПА + Telalit 410 ($q_1 + q_2$) = (5 + 5) мас.ч. Показники властивостей матриці є такими: модуль пружності – $E = 3,4$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 103,4$ МПа, теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 344$ К, а термічний коефіцієнт лінійного розширення (у діапазоні $\Delta T = 303 \dots 423$ К) $\alpha = 10,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з випробуваннями фізико-механічних та теплофізичних властивостей матеріалів. При цьому аналіз фрактограм зламу дозволив не лише підтвердити динаміку залишкових напружень від умісту твердників, але й констатувати про достовірність попередньо отриманих результатів і правильність вибору матриці за концентрації твердників ($q_1 + q_2$) = (5 + 5) мас.ч. для практичного застосування матеріалів, які експлуатуються в умовах впливу підвищених знакозмінних навантажень і температур.

У майбутньому планується дослідити вплив умісту і дисперсності наповнювачів різної фізичної природи на властивості епоксикомпозитів, сформованих на основі розроблених зв'язувачів.

Conclusion. It was found that the rise of temperature of matrix polymerization on the basis of epoxy oligomer and PEPA hardener from $T = 393$ up to $T = 433$ K under certain time parameters of formation provides improvement of physical, mechanical and thermal properties of the material.

The tendency of matrix properties dynamics during complex interaction of hardeners was analysed and it was found that factors of the obtained material characteristics are changed in proportion to the content of this or that hardener.

According to the results of researches materials with different concentration of hardeners for adhesive and cohesive characteristics of coatings were proposed to be used, especially for operation of materials during variable loadings and increased temperatures.

It was experimentally testified that while using coatings with refined adhesive properties material on the basis of matrix from epoxy resin CHS-Epoxy 525 (100 parts) and PEPA hardeners + Telalit 410 ($q_1 + q_2$) = (4 + 6) should be formed. At the same time adhesive strength of matrix while tearing is $\sigma_a = 33,8$ MPa, while shearing $\tau = 11,6$ MPa, and residual stress – $\sigma_3 = 3,4$ MPa.

While using coatings with improved cohesive properties material on the basis of epoxy resin matrix CHS-Epoxy 525 (100 parts) and PEPA hardeners + Telalit 410 ($q_1 + q_2$) = (5 + 5) should be formed. Matrix properties indexes are as follows: module of elasticity – $E = 3,4$ GPa, fracture stresses while bending – $\sigma_{3z} = 103,4$ MPa, heat resistance (according to Martens) – $T = 344$ K, thermal coefficient of linear expansion (ranging $\Delta T = 303 \dots 423$ K) $\alpha = 10,8 \times 10^{-5}$ K⁻¹.

The results obtained by the method of optical microscopy are well correlated with tests of physical, mechanical and thermal properties of materials, the analysis of wrecking fractogram being possible to confirm not only the dynamics of residual stresses from hardeners content, but also to testify the reability of the preliminary obtained and the proper results matrix choice at hardeners concentration ($q_1 + q_2$) = (5 + 5) parts for practical application of materials operating in conditions of increased variable loadings and temperatures.

In future it is expected to research the content and dispersion of different nature fillers influence upon the properties of epoxy composites formed on the basis of developed connectors.

Список використаної літератури

1. Чернин, И.З. Эпоксидные полимеры и композиции [Текст] / И.З. Чернин, Ф.М. Смахов, Ю.В. Жердев. – М.: Химия, 1982. – 232 с.
2. Тхір, І.Г. Фізико-хімія полімерів: навч. посібник [Текст] / І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький. – Львів: Вид. нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие для вузов по специальности «Технология перераб. пласт. масс и эластомеров» [Текст] / Кербер М. Л. и др.; под общ. ред. Берлина А.А. – СПб.: Профессия, 2008. – 557 с.
4. Корякина, М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий [Текст] / М.И.Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
5. Стухляк, П.Д. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості [Текст] / П.Д.Стухляк, А.В.Букетов, О.І.Редько. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.

Отримано 3.01.2014