

УДК 667.64:678.026

<sup>1</sup>Сапронов О.О., <sup>1</sup>Букетова Н.М., <sup>1</sup>Бень А.П., <sup>1</sup>Скирденко В.О., <sup>2</sup>Масляк Б.О.<sup>1</sup>Херсонська державна морська академія, Україна<sup>2</sup>Тернопільський національний економічний університет, Україна**ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ  
КОНСТРУКТИВНИХ ДЕТАЛЕЙ СЕУ МЕТОДОМ ІЧ-СПЕКТРОСКОПІЇ**

*Досліджено вплив вмісту двокомпонентного бідисперсного наповнювача на перебіг структурних процесів при полімеризації композитних матеріалів. Склад епоксидного композиту визначено на основі попередньо проведеного математичного планування експерименту. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20, який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю. Для шивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА, що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах.*

*На основі аналізу ІЧ-спектрів розроблених матеріалів наведено характеристичні частоти, параметри їх інтенсивності і на підвищину смуг поглинання, що дає можливість визначити наявність хімічних зв'язків чи їх відсутність у процесі формування епоксидних композитних матеріалів.*

*Показано, що глобулярною структура зламу характеризує підвищені фізико-механічні властивості епоксидних композитів.*

*Ключові слова:* композитний матеріал, ІЧ-спектральний аналіз, хімічні зв'язки, оптична мікроскопія.

Сапронов А.А., Букетова Н.Н., Бень А.П., Скирденко В.О., Масляк Б.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ  
КОНСТРУКТИВНЫХ ДЕТАЛЕЙ СЭУ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ**

*Исследовано влияние содержания двухкомпонентного дисперсного наполнителя на структурные процессы при полимеризации композитных материалов. Состав эпоксидных композитов определен на основе предварительно проведенного математического планирования эксперимента. В качестве основного компонента для связующего при формировании композитов выбрано эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20, который характеризуется высокой адгезионной и когезионной прочностью, незначительной усадкой и технологичностью при нанесении на длинномерные поверхности сложного профиля. Для шивания эпоксидных композиций использован отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА, что позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. На основе анализа ИК-спектров разработанных материалов приведены характеристические частоты, параметры их интенсивности и полуширина полос поглощения, что дает возможность определить наличие химических связей или их отсутствие в процессе формирования эпоксидных композитных материалов. Показано, что глобулярная структура излома характеризует повышение физико-механических свойств эпоксидных композитов.*

*Ключевые слова:* композитный материал, ИК-спектральный анализ, химические связи, оптическая микроскопия.

Sapronov A.A., Buketova N.N., Ben A.P., Skirdenko V.O., Masliyak B.A.

**INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF POLYMER COATINGS TO PROTECT  
THE STRUCTURAL PARTS SPP BY IR SPECTROSCOPY**

*The influence of the content of the two-component filler dispersed in the course of the polymerization process of structural composite materials. The composition of the epoxy composite determined on the basis of preliminary mathematical planning of the experiment. As the main component of the binder in the formation of epoxy composites selected bisphenol epoxy oligomer ED-20 brand, which is characterized by high adhesive and cohesive strength, low shrinkage and processability when applied on the surface of the lengthy complex profile. For crosslinking epoxy compositions used polyethylenepolyamine hardener PEPA that allows cure material at room temperature. Based on the analysis of the IR-spectra of the developed materials are given the characteristic frequency, the parameters of intensity and half-width of the absorption band, which makes it possible to determine the presence of chemical bonds or the lack thereof during the formation epoxy composites materials. It is shown that the globular structure fracture is characterized by increased physical and mechanical properties of epoxy composites.*

*Key words:* the composite material, IR-spectral analysis, chemical bonding, optical microscopy.

**Постановка проблеми.** В процесі експлуатації деталі машин і механізмів суднових енергетичних установок (СЕУ) втрачають свої експлуатаційні характеристики в результаті впливу статичних та динамічних навантажень і зношування. Вагомих збитків завдає корозійне руйнування. Особливо, впливу корозії піддаються палубні механізми судна. Вплив агресивного середовища (розчинів кислот, солей, лугів, морської води) зумовлює передчасний вихід із ладу конструктивних елементів як енергетичного устаткування так і палубних механізмів. Одним із способів захисту конструктивних елементів СЕУ і палубних механізмів є застосування захисних

покриттів. В цьому плані перспективним є використання захисних покриттів на основі епоксидних зв'язувачів. У епоксидних композитах після полімеризації формується просторова сітка, в якій частки наповнювачів різної фізичної природи і дисперсності впливають на структурні перетворення матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні дослідження структури епоксидних композитів методом ІЧ-спектроскопії та оптичної мікроскопії дозволяють більш глибоко зрозуміти процеси і закономірності структуроутворення епоксикомпозитів для аналізу особливостей перебігу фізико-хімічних процесів при їх формуванні, що дозволяє залежно від умов експлуатації конструктивних елементів підібрати склад захисного покриття [1-3]. Тому розробка нових захисних покриттів та дослідження їх структури є актуальним завданням сучасного полімерного матеріалознавства і носить практичний характер при експлуатації морського і річкового транспорту.

**Мета роботи** – методом ІЧ-спектроскопії і оптичної мікроскопії встановити закономірності формування та природу хімічних зв'язків при структуроутворенні захисного покриття для елементів СЕУ.

**Матеріали та методика дослідження.** Виходячи з наведеного вище, як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитних матеріалів (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.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо [2], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювачі при формуванні КМ було використано частки вугільного шлаку (ВШ) з дисперсністю 63...65 мкм і залізного сурику (ЗС) з дисперсністю 10...20 мкм.

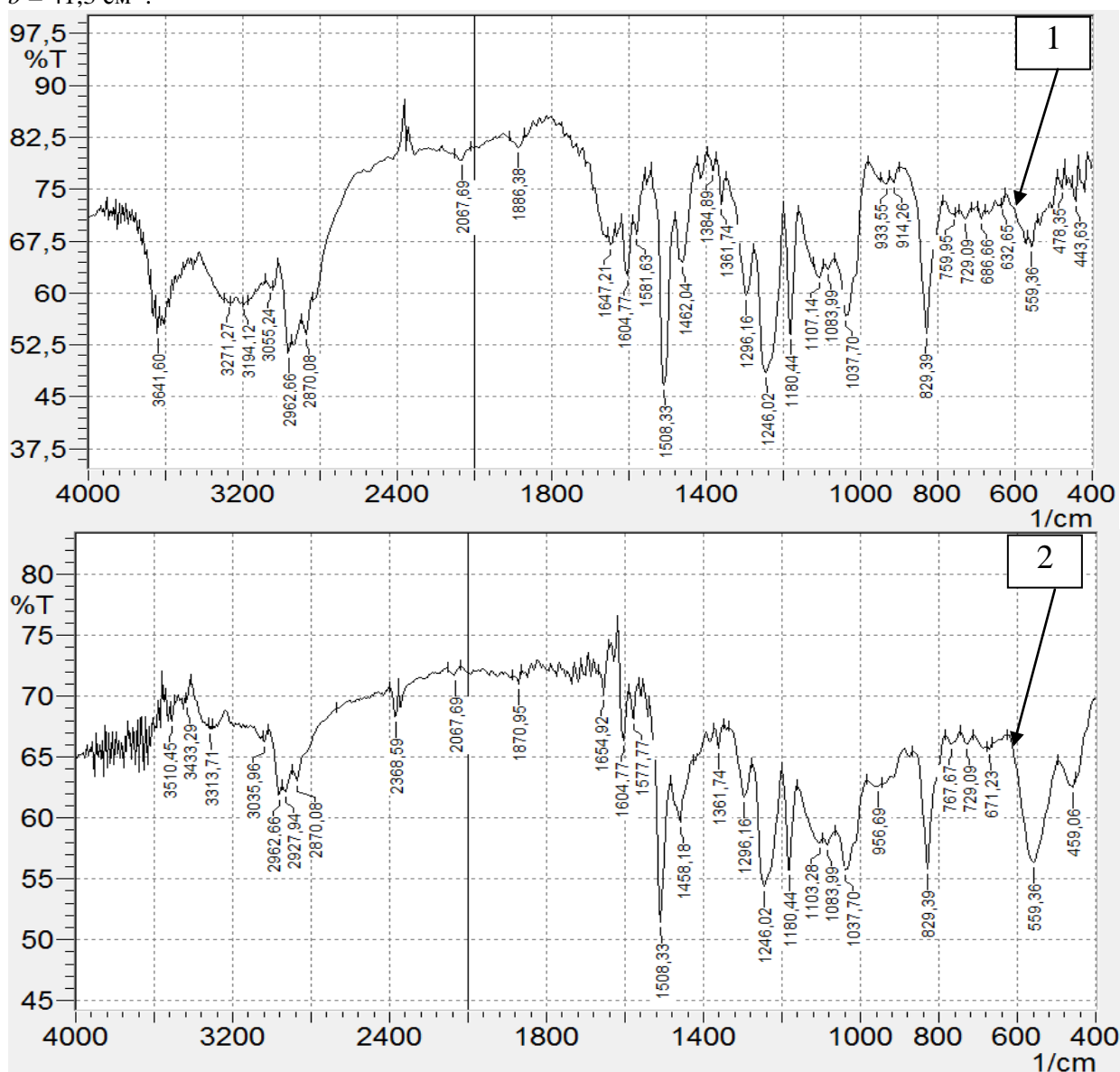
Для визначення природи хімічних зв'язків, які виникають при структуроутворенні матриці, використано метод ІЧ-спектроскопії. Аналіз ІЧ-спектрів проводили за законом Ламберта-Бера, враховуючи при цьому значення інтенсивності ( $T$ ) і напівширини ( $b$ ) смуг поглинання на спектрах матеріалів. Розшифровували ІЧ-спектри за методиками [4, 5]. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці частот 400...4000  $cm^{-1}$  однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектру за хвильовими числами  $\lambda^{-1} = \nu$  здійснювали на діаграмі у межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа  $\nu = \pm 0,01 cm^{-1}$ , визначення точності розташування піку  $\pm 0,125 cm^{-1}$ . Фотометрична точність становила  $\pm 0,2 \%$  при програмному управлінні щільною і тривалістю інтегрування –  $t = 10$  с. Крок інтегрування –  $\Delta\lambda = 4 cm^{-1}$ . Проводили незалежно аналіз ІЧ-спектрів вихідної матриці та композиту з різним вмістом двокомпонентного бідисперсного наповнювача. Матеріал попередньо подрібнювали, висушували при  $373 \pm 2$  К впродовж 20 хв., перемішували у агатовій ступці з порошком КВг, а далі на гідравлічному пресі із зусиллям  $F = 20$  МПа формували зразки за співвідношення – досліджуваній матеріал : КВг – 1 : 300.

Дослідження структури матеріалів проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, 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».

**Результати досліджень та їх обговорення.** Попередніми дослідженнями фізико-механічних і теплофізичних властивостей КМ було встановлено, що поліпшеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями відзначаються композити з вмістом двокомпонентного бідисперсного наповнювача. Вміст основного та додаткового наповнювачів при формуванні КМ вибрано на основі попередніх результатів постановки активного експерименту. Досліджували незалежно епоксидну матрицю (контрольний зразок) та композитні матеріали (КМ) за різного вмісту двокомпонентного бідисперсного наповнювача ( $q_1 + q_2$ ), мас.ч.: КМ 1 – ВШ (10) + ЗС (40), КМ 2 – ВШ (20) + ЗС (30), КМ 3 – ВШ (30) + ЗС (20).

Для встановлення закономірностей перебігу фізико-хімічних процесів при структуроутворенні матеріалів проводили ІЧ-спектральний аналіз сформованих композитів. Попередньо досліджували характеристики смуг поглинання епоксидної матриці (рис. 1).

При дослідженні ІЧ-спектру епоксидної матриці, виявлено смугу з частотою  $\nu = 559,36$   $\text{cm}^{-1}$ , яка має інтенсивність пропускання  $T = 7,7\%$  і напівширину  $b = 56,1$   $\text{cm}^{-1}$ . Дана смуга характеризує валентні коливання  $-\text{CH}_2$ -груп та алкенної  $-\text{C}=\text{CH}_2$ -групи. Смуга поглинання при хвильовому числі  $\nu = 640,37$   $\text{cm}^{-1}$  свідчить про маятникові коливання  $-\text{CH}$ -групи та наявність алкенів  $-\text{C}-\text{CH}_2$  і має інтенсивність пропускання  $T = 1,3\%$  і напівширину  $b = 6,7$   $\text{cm}^{-1}$ . Смуга поглинання для матриці при хвильовому числі  $\nu = 759,95$   $\text{cm}^{-1}$  має інтенсивність пропускання  $T = 1,4\%$  і напівширину  $b = 10,2$   $\text{cm}^{-1}$ , при цьому утворена смуга відносяться до маятникових коливань  $-\text{CH}$ -,  $-\text{NH}$ - груп і первинної аміногрупи  $-\text{NH}_2$ . Також виявлені валентні коливання епоксидних,  $-\text{C}-\text{C}$ -,  $-\text{C}-\text{N}$ - та  $-\text{C}-\text{O}$ - груп на спектрі матриці при частоті  $\nu = 933,55$   $\text{cm}^{-1}$ . При цьому спектр з частотою  $\nu = 933,55$   $\text{cm}^{-1}$  має інтенсивність пропускання  $T = 3,3\%$  і напівширину  $b = 41,3$   $\text{cm}^{-1}$ .



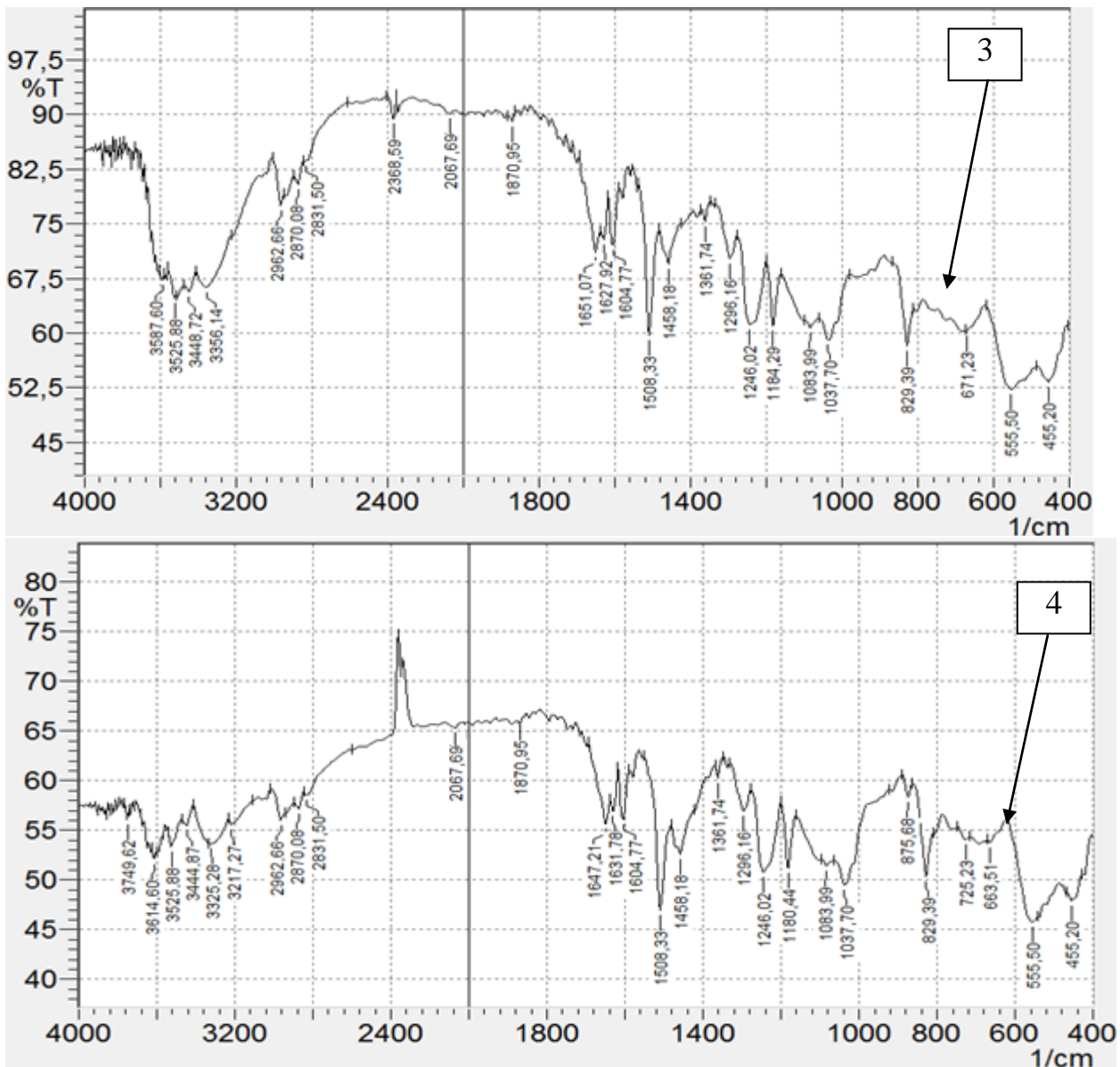


Рис. 1. ІЧ – спектри епоксидної матриці і композитів з двокомпонентним бідисперсним наповнювачем, мас.ч.: 1 – матриця; 2 – ВШ (10) + ЗС (40); 3 – ВШ (20) + ЗС (30); 4 – ВШ (30) + ЗС (20).

Слід відмітити наявність смуги поглинання з частотою  $\nu = 1180,44 \text{ см}^{-1}$ , яка має інтенсивність пропускання  $T = 18,3\%$  і напівширину  $b = 20,1 \text{ см}^{-1}$ . Дана смуга свідчить про валентні коливання -C-C-, -C-N- і -C-O-груп, а також первинних -CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>- і вторинних -CH<sub>2</sub>-NH-CH<sub>2</sub> аміногруп. Смуга поглинання при хвильовому числі  $\nu = 1647,21 \text{ см}^{-1}$  має інтенсивність пропускання  $T = 2,3\%$  і напівширину  $b = 20,5 \text{ см}^{-1}$ . Наявність цієї смуги свідчить про подвійні зв'язки валентних коливань -C=C-, -C=N- та -C=O-груп. Також виявлено валентні коливання епоксидної групи при частотах  $\nu = 2306,86 \dots 1886,38 \text{ см}^{-1}$  та потрійні C≡C, C≡N-групи.

Встановлено, що смуга поглинання при хвильовому числі  $\nu = 3035,96 \text{ см}^{-1}$  відповідає валентним коливанням -CH-, -OH- і -NH- груп, а також виявлено коливання бензольного кільця. Не менш важливим є наявність смуги поглинання при хвильовому числі  $\nu = 3641,60 \text{ см}^{-1}$ , яка має інтенсивність пропускання  $T = 10,6\%$ , та напівширину  $b = 118,3 \text{ см}^{-1}$  і відповідає валентним коливанням -OH-, -NH- груп. Більш детально результати ІЧ-спектрального аналізу вихідної матриці наведено у працях [1, 2].

Надалі проводили порівняння ІЧ-спектрів зшитої матриці із композитами, які наповнені двокомпонентним бідисперсним наповнювачем (рис. 1, спектри 2-4).

Відомо [3], що зміщення смуг поглинання у бік менших хвильових чисел, а також збільшення інтенсивності та напівширини, які відповідають валентним коливанням груп вказує на

утворення водневих зв'язків. При цьому встановлено збільшення інтенсивності смуги поглинання (табл. 1), які відповідають валентним коливанням  $-CH_2$ -груп ( $T = 9,0\%$ ,  $b = 61,2\text{ см}^{-1}$ ) у матеріалі з вмістом часток двокомпонентного наповнювача ВШ (10 мас.ч.) + ЗС (40 мас.ч.) відносно епоксидної матриці ( $T = 7,7\%$ ,  $b = 56,1\text{ см}^{-1}$ ). Хоча енергія розриву водневого зв'язку  $-OH$ -набагато менша (23 кДж/моль) за енергію розриву ковалентного  $O-H$  зв'язку (470 кДж/моль), проте утворення водневого зв'язку забезпечує підвищення показників фізико-механічних і теплофізичних характеристик матеріалу.

Також встановлено зміщення смуг поглинання (валентні коливання  $-CH_2$ -груп) у бік менших хвильових чисел на  $\Delta\nu = 3,86\text{ см}^{-1}$ , які характерні для матеріалів з вмістом часток ВШ (20 мас.ч.) + ЗС (30 мас.ч.) та ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.) (рис. 1, спектри 3, 4).

При цьому слід зазначити, що найбільшою інтенсивністю  $T = 4,9\%$  і напівшириною  $b = 61,3\text{ см}^{-1}$  (серед двох наведених вище композитів), а, отже, і більшою кількістю водневих  $-OH$ -зв'язків, відзначається композит з вмістом часток двокомпонентного бідисперсного наповнювача ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.) (рис. 1, спектри 3, 4), що вказує на підвищені показники фізико-механічних властивостей матеріалу.

Таблиця 1

**Характеристичні частоти і параметри їх інтенсивності згідно  
ІЧ-спектрального аналізу**

Характеристики смуги	Матриця			ВШ (10) + ЗС (40)		ВШ (20) + ЗС (30)		ВШ (30) + ЗС (20)	
	Група	$\nu$ , $\text{см}^{-1}$	$T$ , %	$b$ , $\text{см}^{-1}$	$T$ , %	$b$ , $\text{см}^{-1}$	$T$ , %	$b$ , $\text{см}^{-1}$	$T$ , %
$-CH_2$ -валентні коливання, алкени- $C=CH_2$ -	559,36	7,7	56,1	9,0	61,2	-	-	-	-
NH-, -CH-маятникові коливання, -C-C- валентні коливання, первинні аміни: $-CH_2$ - $NH_2$ , -CH- $NH_2$ , епоксидний цикл, -S-O-	829,39	19,8	32,2	10,1	19,3	6,8	19,3	6,6	19,3
-C-C-, -C-N-, -C-O- валентні коливання, третинні аміни: $(CH_2)_3N$ ,	1037,70	11,5	32,2	4,4	32,2	4,6	19,3	3,8	29,0
-C-C-, -C-N-, -C-O- валентні коливання, епоксидний цикл, вторинні аміни: $CH_2-NH-CH_2$ , первинні аміни: $CH_2-NH_2$	1180,44	18,3	20,1	7,7	17,0	-	-	6,1	13,1
-C-C-, -C-N-, -C-O- валентні коливання, епоксидний цикл, вторинні аміни: $CH_2-NH-CH_2$ , первинні аміни: $CH_2-NH_2$	1184,29	-	-	-	-	7,8	13,1	-	-
-OH- деформаційні коливання, -C-N-, -C-O- валентні коливання, епоксицикл, третинні аміни: -N- $R_2$ , вторинні аміни: -NH-R	1246,02	20,6	49,7	10,1	45,6	9,7	45,0	7,5	42,7



-ОН-, -СН- деформаційні коливання, третинні аміни: -N-R <sub>2</sub> , метил CH <sub>3</sub> -C	1361,74	4,8	10,1	1,5	7,1	1,5	6,5	1,4	6,9
-СН- деформаційні коливання, метилен -СН <sub>2</sub> -, метил CH <sub>3</sub> -C-	1458,18	-	-	3,7	29,3	4,8	26,5	4,1	26,5
-NH- деформаційні коливання, вторинні аміни: -NH-R, СН-NH-СН, СН <sub>2</sub> -NH-СН <sub>2</sub> ,	1508,33	24,9	20,1	13,6	19,2	15,8	16,2	10,2	16,2
-СН- валентні коливання, -СН <sub>3</sub> -С метил	2870,08	3,6	19,3	1,2	12,9	0,9	18,7	0,9	19,0
-СН- валентні коливання -СН <sub>3</sub> -С метил, метилен -СН <sub>2</sub> -	2962,66	3,3	12,7	2,7	12,7	3,2	12,7	1,6	9,7
-СН-, -ОН- і -NH- валентні коливання, вторинні аміни: -СН-NH-СН-, -СН <sub>2</sub> -NH-СН <sub>2</sub> -	3271,27	0,3	3,3	-	-	-	-	0,3	6,7
-ОН-, -NH- валентні коливання	3641,60	10,9	103,4	-	-	-	-	-	-

Додатково встановлено, зменшення інтенсивності смуг поглинання (рис. 1, спектри 3, 4) в області хвильових чисел  $\nu = 767,67 \dots 663,51 \text{ см}^{-1}$ , що свідчить про взаємодію компонентів зв'язувача з частками наповнювача при зшиванні і, як наслідок, підвищення показників фізико-механічних властивостей КМ. Також зменшення інтенсивності смуги поглинання (відносно матриці) виявлено при хвильовому числі  $\nu = 829,39 \text{ см}^{-1}$ , що характерно для маятникових -NH-, -СН-, валентних -С-С- коливань, первинної СН<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>, СН-NH<sub>2</sub> аміногрупи і епоксидциклу. При цьому найменшу інтенсивність смуги поглинання, яка становить  $T = 6,6 \%$ , з напівшириною  $b = 19,3 \text{ см}^{-1}$  (табл. 1) виявлено для матеріалу із вмістом часток ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.), що свідчить про підвищений ступінь зшивання композиту. Водночас встановлено зменшення інтенсивності пропускання ( $T \%$ ) і напівширини ( $b \text{ см}^{-1}$ ) смуг поглинання у діапазоні хвильових чисел  $\nu = 1037,70 \dots 1508,33 \text{ см}^{-1}$  у всіх досліджуваних композитах. Це свідчить про взаємодію між атомами кисню і молекулами (ВШ і ЗС) з протонами груп NH полімерної матриці, зокрема і фрагментів молекул твердника ПЕПА.

Відсутність чи зменшення смуг поглинання у області хвильових чисел  $\nu = 2400 \dots 2100 \text{ см}^{-1}$  свідчить про зшивання потрійних С $\equiv$ С, С $\equiv$ N-груп у досліджуваних композитах (рис. 1, спектри 2-4).

Не менш важливим є розгалужений характер смуг поглинання у області хвильових чисел  $\nu = 3749,62 \dots 2831,50 \text{ см}^{-1}$ , який, як відомо [2], виникає внаслідок хімічної взаємодії сусідніх макроланцюгів зв'язувача. Крім того, відсутність смуг поглинання чи зменшення їх оптичної густини, порівняно з матрицею, у області частот  $\nu = 3749,62 \dots 2831,50 \text{ см}^{-1}$  (табл. 1) свідчить про зменшення кількості -СН- і водневих -ОН-груп. При цьому слід зазначити, що найменшою інтенсивністю смуг поглинання у вищезгаданій області хвильових чисел, а, отже, найвищими показниками фізико-механічних і теплофізичних властивостей характеризуються матеріали з вмістом часток ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.) і ВШ (10 мас.ч.) + ЗС (40 мас.ч.).

З метою підтвердження наведених вище результатів досліджували фрактограми зламу епоксидних композитів методом оптичної мікроскопії. При дослідженні фрактограм зламу матриці встановлено формування напруженого стану у структурі матеріалу, що характеризується наявністю пологих ліній сколювання, які формують рельєф поверхні (рис. 2, а). При збільшенні

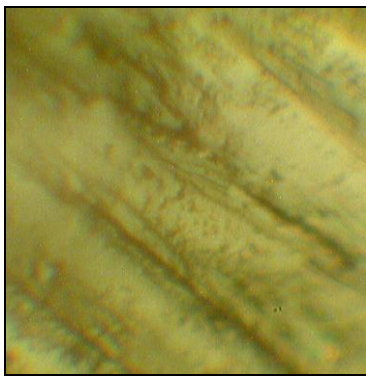
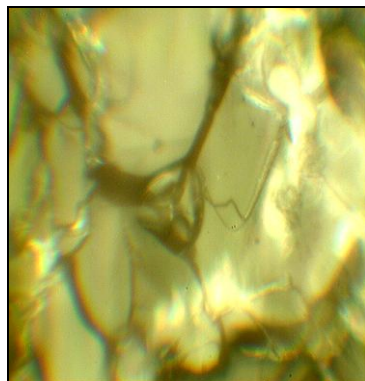
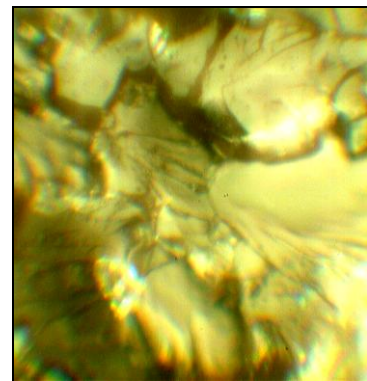
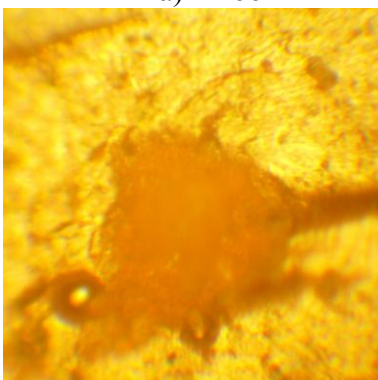
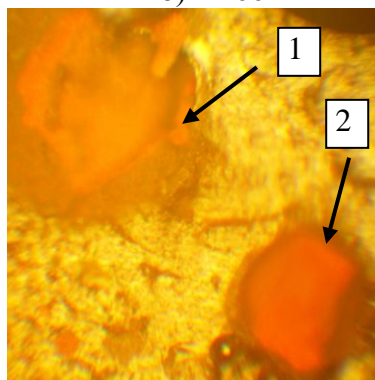
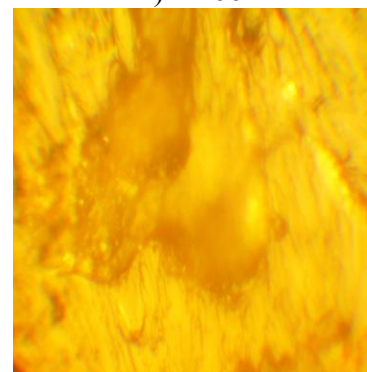
зображення до  $\times 400$  (рис. 2, б, в) встановлено, що поверхня зразка матриці характеризується присутністю кратерів блочної і пелюсткової структури, розділених широкими лініями сколювання. Причому такі об'єкти відмінні за формою і площею, розміщені у різних площинах. Складна топологія поверхні таких зразків опосередковано свідчить про суттєву крихкість матриці, внаслідок неповної взаємодії груп -NH- твердника з епоксигрупами олігомера ЕД-20, що характерно для в'язкого зламу.

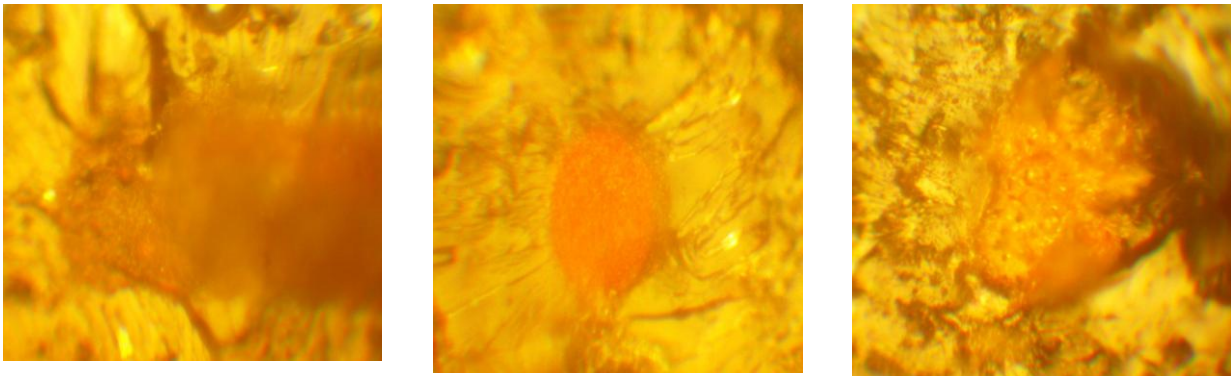
Водночас слід зазначити, що при дослідженні наповнених композитів (рис. 2, г-з) встановлено відсутність агломерації часток двокомпонентного бідисперсного наповнювача. Підтвердженням чого є чітко помітні частки наповнювача, розташовані у зв'язувачі на певній відстані (рис. 2, д), які виявлено при збільшенні у  $\times 600$ . Можна припустити, що відсутність агломерації у наповнених КМ пов'язано із орієнтацією у зв'язувачі бідисперсних часток, що частково зумовлено їх попередньою обробкою високочастотним імпульсним магнітним полем.

Додатково виявлено широку і чітку лінію сколювання на фрактограмах зламу КМ (рис. 2, г), яка є свідченням того, що навколо дисперсних часток наповнювача формуються фізичні та хімічні зв'язки. Відповідно такі матеріали відзначаються поліпшеними як фізико-механічними, так і теплофізичними властивостями.

Виявлені лінії сколювання у КМ (рис. 2, е), свідчать, що при руйнуванні матеріалів виникають тріщини не у об'ємі самого наповнювача, а навколо дисперсних часток. Це забезпечує дефектну структуру матеріалів і, як наслідок, властивості таких КМ нестабільні при експлуатації.

Зрихлена і частково глобулярна структура зламу навколо дисперсних часток наповнювача (рис. 2, ж, з), свідчить проте, що за такого наповнення відбуваються структурні перетворення з утворенням надмолекулярних структур. Відповідно такі композити відзначаються поліпшеними фізико-механічними властивостями.

а)  $\times 200$ б)  $\times 400$ в)  $\times 400$ г)  $\times 600$ д)  $\times 600$ е)  $\times 400$



е) × 600

ж) × 600

з) × 600

**Рис. 2. – Фрактограми зламу епоксидної матриці і композитів з двокомпонентним бідисперсним наповнювачем: а-в) матриця; г, д) ВШ (10 мас.ч.) + ЗС (40 мас.ч.); е, є) ВШ (20 мас.ч.) + ЗС (30 мас.ч.); ж, з) ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.).**

**Висновки.** На основі результатів експериментальних досліджень можна констатувати наступне.

Методом ІЧ-спектрального аналізу досліджено природу хімічних зв'язків, які виникають при структуроутворенні епоксидних композитів, що містять частки двокомпонентного бідисперсного наповнювача. Встановлено механізм міжмолекулярної взаємодії двокомпонентного наповнювача (ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.)) з епоксидним олігомером ЕД-20, який полягає в утворенні значної кількості водневих -ОН- зв'язків, що зумовлює підвищенню показників фізико-механічних властивостей захисного покриття. Додатково встановлено зменшення інтенсивності пропускання і напівширини смуг поглинання у діапазоні хвильових чисел  $\nu = 1037,70 \dots 1508,33 \text{ см}^{-1}$ , що свідчить про взаємодію між атомами кисню і молекулами (ВШ і ЗС) з протонами груп NH полімерної матриці, зокрема і фрагментів молекул твердника ПЕПА.

Методом оптичної мікроскопії досліджено поверхню зламу композитних матеріалів. Доведено, що композити із вмістом часток ВШ (30 мас.ч.) + ЗС (20 мас.ч.) характеризуються глобулярною структурою зламу. Значної уваги заслуговує структура зламу композиту із вмістом часток ВШ (10 мас.ч.) + ЗС (40 мас.ч.). При збільшенні у 600 раз виявлено відсутність агломерації у наповнених КМ. Тобто, такі матеріали характеризуються поліпшеними фізико-механічними властивостями у процесі експлуатації захисного покриття.

Отримані результати дослідження структури полімерів корелюють із попередньо проведеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями, що свідчить про достовірність отриманих результатів та дає можливість використовувати розроблені матеріали для захисту елементів СЕУ.

### Література

1. Сапронов О.О. Дослідження природи хімічних і фізичних зв'язків епоксидних нанокompозитів методом ІЧ-, ЕПР-спектрального аналізу та оптичної мікроскопії / О.О. Сапронов // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ.–Випуск 43.–2013. – С. 62-73.
2. Букетов А.В. Дослідження властивостей епоксикompозитів, наповнених нанодисперсним алмазом, методом ІЧ-спектрального аналізу та оптичної мікроскопії / А.В. Букетов, О.О. Сапронов // Вісник ТНТУ, 2013. – № 4. – С. 190-198.
3. Методы исследования современных полимерных материалов: Составитель: Замышляева О.Г. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 90 с.
4. Рабек Я.Р. Экспериментальные методы в химии полимеров: пер. с англ. под ред. В.В. Коршака.- М.:Мир, 1983.-Ч.1.-384с.
5. Вербицкая Н.А. Влияние комплексных соединений рения (R), молибдена (V) с макроциклическими лигандами на процессы структурообразования эпоксиполиуретанового связующего / Н.А.Вербицкая // Пластические массы, 2001. – №7. – С.10-14.

Стаття надійшла до редакції 22.10.2015.