

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОГО КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАМУ НА АДГЕЗІЙНІ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

*Букетова Н.М.*

*Херсонська державна морська академія*

*У роботі представлений ефективний спосіб використання відходів від киснево-конвертерного способу виробництва сталі для забезпечення необхідного комплексу властивостей епоксидних композитів. Для дослідження можливої взаємодії часток конвертерного шламу з епоксидним зв'язувачем і твердником використано ІЧ-спектральний аналіз, який дозволив встановити значну кількість зв'язків -C-N-, -C-C-, -C-O-, -SH-груп на поверхні часток наповнювача. Введення конвертерного шламу у епоксидний зв'язувач за оптимального вмісту дозволяє підвищити адгезійну міцність при відриві у 2 рази, адгезійну міцність при зсуві 1,1 рази, фізико-механічні властивості у 1,5 разів. Для дослідження структури зшитих полімерів використано оптичну мікроскопію. На основі аналізу топології матеріалів виявлено впорядковану структуру без наявних включень, що дає можливість стверджувати про максимальний ступінь зшивання композитних матеріалів за вмісту часток конвертерного шламу у кількості  $q = 40$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного зв'язувача. **Ключові слова:** дисперсний наповнювач, композит, ІЧ-спектральний аналіз, адгезія, фізико-механічні властивості, структура шламу, оптична мікроскопія*

**Постановка проблеми.** Розвиток киснево-конвертерного способу виробництва сталі отримав широке поширення у світі (70...75 % загального об'єму виробництва металу). Даний метод характеризується такими перевагами, як висока продуктивність, низькі питомі капітальні вкладення, наявність сировинної бази та ін. При цьому значної уваги приділяють утилізації або використанню вторинних енергоресурсів, тобто відходів промисловості. Відомо [1], що конвертерні гази у процесі виробництва сталі містять багато пилу. Разом із оксидом вуглецю з конвертеру захоплюється значна кількість парів металу та крапель, що викидаються з ванни у процесі зневуглицювання. Пари часток в основному містять наступні сполуки: FeO, Fe<sub>2</sub>C, FeCO<sub>3</sub>. Залежно від складу сировини, конструкції печей і умов плавки на тонну сталі утворюється 12...25 кг дисперсного пилу при «сухому» і шламу при «мокрому» способі виробництва із розміром часток 0,1...100 мкм. Переважно їх використовують як добавку у агломераційну шихту. Водночас, слід зауважити, що дані відходи різного розміру і складу є цікавими з наукової і практичної точки зору як наповнювачі для формування епоксидних композитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений комплекс досліджень авторів праць [2–5] дозволяє констатувати, що введення наповнювачів у епоксидний зв'язувач передбачає різні види хімічної та фізичної взаємодії при зшиванні епоксидкомполімерів на межі поділу фаз «зв'язувач – наповнювач». Введення у зв'язувач дисперсних часток різної природи та розміру за оптимального вмісту дозволяє поліпшувати адгезійні, фізико-механічні властивості композитних матеріалів (КМ) у комплексі. Взаємодія компонентів залежить від хімічної активності наповнювача, питомої площі його поверхні, співвідношення інгредієнтів і суттєво впливає на структуру матеріалів та їх характеристики у процесі експлуатації. При цьому актуальним є використання дешевих наповнювачів (відходи промислового виробництва), які, окрім підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних КМ, сприяють зменшенню вартості конструкційних матеріалів, що вигідно з економічної та екологічної точки зору.

**Метою роботи** є дослідження впливу наповнювача, що є відходом промислового виробництва сталі, від виробництва на властивості епоксидних композитів.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні 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 довговимірні 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 [5], що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається із таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-]_n$ . Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювач було використано частки конвертерного шламу (КвШ), який характеризується наступним складом, %:  $\text{SiO}_2$  – 20,85;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 2,42;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 12,69;  $\text{FeO}$  – 7,68;  $\text{MgO}$  – 5,08;  $\text{MnO}$  – 2,94;  $\text{CaO}$  – 46,70;  $\text{S}$  – 0,19;  $\text{Fe}$  – 14,85. Дисперсність часток становить  $d = 60 \dots 63$  мкм.

Епоксидний композит, наповнений частками КвШ, формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20, підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і її витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; дозування дисперсного наповнювача та подальше введення його у епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсного наповнювача впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau_3 = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год при температурі  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання КМ впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. Із метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі при температурі  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійна міцність при відриві, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТу 14760-69. Вимірювали силу відривання клейових з'єднань сталених зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  Н/с. Діаметр робочої частини сталених зразків при відриві становив –  $d = 25$  мм.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [6]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,5$  мм формували на сталій основі. Параметри основи: загальна довжина –  $l = 100$  мм; робоча довжина –  $l_0 = 80$  мм, товщина –  $\delta = 0,3$  мм.

Руйнівне напруження і модуль пружності 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.

Для дослідження хімічних зв'язків у наповнювачі використовували ІЧ-спектральний аналіз. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 2400$   $\text{cm}^{-1}$  однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектру за хвильовими числами  $\lambda^{-1} = \nu$  здійснювали на діаграмі в межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа, інтенсивність пропускання, напівширину та площу смуги поглинання визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа –  $\nu = \pm 0,01$   $\text{cm}^{-1}$ , а при визначенні точності розташування піку –  $\nu = \pm 0,125$   $\text{cm}^{-1}$ . Фотометрична точність становила  $\pm 0,2$  % при програмному управлінні щільною та тривалістю інтегрування –  $t = 10$  с. Крок інтегрування –  $\Delta\lambda = 4$   $\text{cm}^{-1}$ .

Дослідження структури (топології) 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».

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для розуміння процесів, які відбуваються на межі поділу фаз «епоксидний зв'язувач – наповнювач – твердник» при зшиванні КМ, попередньо визначали хімічну активність часток конвертерного шламу, тобто наявність активних груп на їх поверхні. Для цього використовували ІЧ-спектральний аналіз. Попередньо формували зразок із дисперсного наповнювача. Враховуючи значний розмір часток наповнювача –  $d = 60 \dots 63$  мкм зразок формували без використання порошку КВг (рис. 1). При цьому інтенсивність пропускання становила  $T = 49,4 \%$ , що свідчить про високу точність формування спектру, а, отже, і достовірність експерименту (рис. 2).

Згідно ІЧ-спектрального аналізу часток наповнювача виявлено смуги поглинання у діапазоні хвильових чисел  $\nu = 2353,16 \dots 2333,87 \text{ см}^{-1}$ , характерні для зв'язків  $-\text{C}\equiv\text{N}$ . Смуга поглинання при хвильовому числі  $\nu = 1114,86 \text{ см}^{-1}$  свідчить про валентні коливання зв'язків  $\text{C}-\text{O}$ , а відносна величина площі піку  $S = 100,2 \%$  вказує на значну їх кількість. При цьому, згідно аналізу праці [7] хвильове число  $\nu = 1114,86 \text{ см}^{-1}$  характеризує з'єднання  $\text{Si}-\text{O}_2$ .

Смуга поглинання при хвильовому числі  $\nu = 979,84 \text{ см}^{-1}$  свідчить про наявність валентних коливань зв'язків  $-\text{C}-\text{N}-$ ,  $-\text{C}-\text{C}-$ ,  $-\text{C}-\text{O}-$ . Водночас діапазон хвильових чисел  $\Delta\nu = 873,10 \dots 979,84 \text{ см}^{-1}$  характеризує наявність з'єднань  $\text{Fe}-\text{O}$ ,  $\text{Fe}-\text{O}_2$  [7].



Рисунок 1 – Сформований зразок для дослідження ІЧ-спектру КвШ з товщиною  $b = 0,000094$  мкм

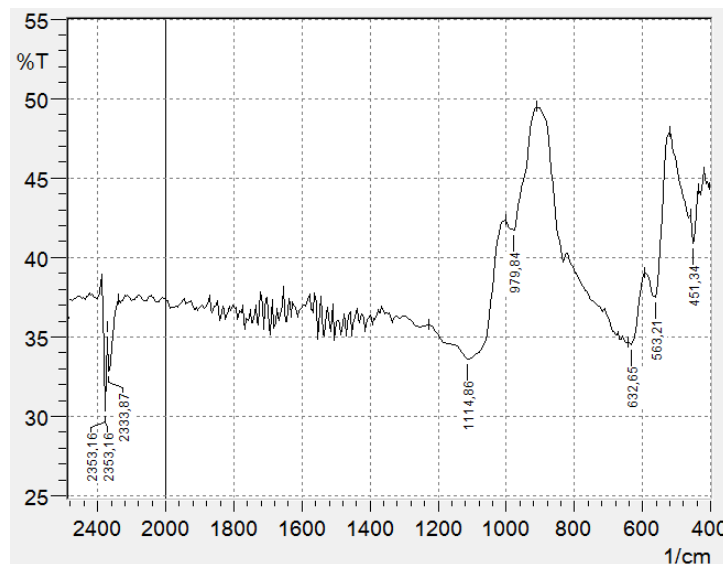


Рисунок 2 – Спектр КвШ у ділянці хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 2400 \text{ см}^{-1}$

Смуга поглинання при хвильовому числі  $\nu = 632,65 \text{ см}^{-1}$  свідчить про наявність маятникових коливань зв'язків  $-\text{C}-\text{H}-$ , а відносна величина площі піку  $S = 99,4 \%$  вказує на значну їх кількість. Водночас, згідно аналізу праці [7] хвильове число  $\nu = 632,65 \text{ см}^{-1}$  характеризує з'єднання  $\text{Ca}-\text{O}$ . Надалі, аналіз смуг поглинання у діапазоні хвильових чисел  $\Delta\nu = 600,00 \dots 400,00 \text{ см}^{-1}$  опосередковано свідчить про присутність з'єднань  $\text{Mg}-\text{O}$ ,  $\text{Mn}-\text{O}$ ,  $\text{S}$ . Отже, аналіз ІЧ-спектру наповнювача КвШ, який є відходом промислового виробництва сталі, дозволяє констатувати про можливість фізико-хімічної взаємодії

часток з компонентами зв'язувача (ЕД-20 – ПЕПА) за рахунок значної кількості активних груп на поверхні наповнювача.

Надалі досліджували вплив вмісту КвШ на адгезійну міцність при відриві ( $\sigma_a$ ), зсуві ( $\tau$ ) і залишкові напруження ( $\sigma_3$ ) у КМ.

Експериментально встановлено (рис. 3), що адгезійна міцність модифікованої УЗО епоксидної матриці становить  $\sigma_a = 24,4$  МПа. Введення у епоксидний олігомер часток дисперсного наповнювача КвШ за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. (тут і далі за текстом вміст дисперсних часток наведено у мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20) приводить до монотонного збільшення адгезійної міцності при відриві КМ до  $\sigma_a = 37,4 \dots 43,1$  МПа (рис. 3, крива 1). Максимум на кривій залежності міцності адгезійних з'єднань від вмісту часток КвШ встановлено при введенні наповнювача за вмісту  $q = 40$  мас.ч. Такі композити відзначаються адгезійною міцністю, яка становить  $\sigma_a = 52,83$  МПа. Аналіз праць [8, 9] дозволяє стверджувати, що підвищення показників адгезійної міцності вказує на взаємодію сегментів олігомеру з активними групами чи зв'язками на поверхні часток дисперсного наповнювача. Це сприяє підвищенню адгезії за даного наповнення КМ. Надалі збільшення вмісту наповнювача до  $q = 60 \dots 80$  мас.ч. призводить до погіршення адгезійної міцності КМ. Значення адгезійної міцності таких композитів становить –  $\sigma_a = 33,0 \dots 41,2$  МПа, що свідчить про підвищення в'язкості композиції та, як наслідок, зменшення змочування часток КвШ олігомером ЕД-20. За таких умов формується композит, який характеризується дефектною структурою.

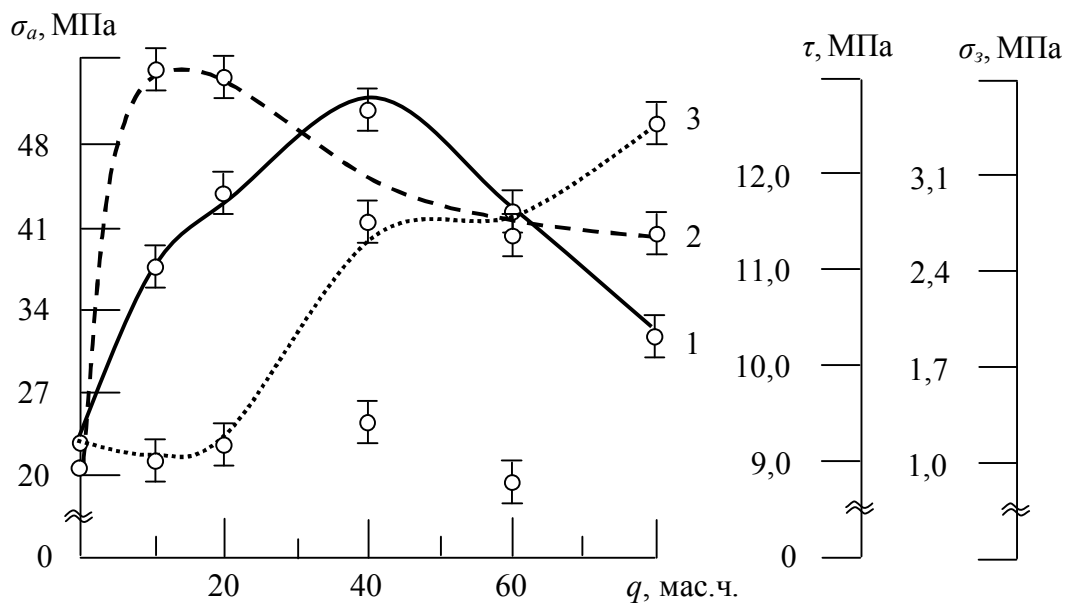


Рисунок 3 – Залежність адгезійної міцності ( $\sigma_a$ ,  $\tau$ ) і залишкових напружень ( $\sigma_3$ ) КМ від вмісту наповнювача конвертерного шлаку (КвШ): 1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ ); 3 – залишкові напруження

При дослідженні впливу часток КвШ на адгезійну міцність при зсуві спостерігали аналогічну залежність (рис. 3, крива 2), тобто при введенні у зв'язувач дисперсних часток спостерігали підвищення показників адгезійної міцності. При цьому максимальне значення адгезійної міцності при зсуві ( $\tau = 12,6 \dots 12,7$  МПа) спостерігали при введенні часток КвШ за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. Надалі введення часток конвертерного шлаку за вмісту  $q = 40 \dots 80$  мас.ч. призводить до зменшення показників адгезійної міцності до  $\tau = 11,4$  МПа.

Слід зауважити, що при дослідженні впливу вмісту КвШ на адгезійну міцність при зсуві не спостерігали узгодження значень із результатами дослідження адгезійної міцності при відриві (рис. 3, крива 1, 2). Аналіз праці [10] дозволяє стверджувати, що для гетерогенних систем існують різні механізми впливу нормальних і тангенціальних напружень на міцність адгезійних з'єднань. Тобто, при руйнуванні клейового з'єднання

утворюється широкий спектр напружень, де при зсуві – здебільшого переважають дотичні, а при відриві – нормальні напруження. Тому спостерігали різні значення адгезійної міцності за незалежних методик проведення експерименту.

У процесі експлуатації технологічного устаткування з полімерними покриттями важливими є показники залишкових напружень, на які безпосередньо впливає природа дисперсного наповнювача. Встановлено, що значення залишкових напружень у матриці, обробленої ультразвуком, складає  $\sigma_3 = 1,4$  МПа (рис. 3, крива 3). При введенні часток КвШ за вмісту  $q = 10$  мас.ч. залишкові напруження дещо зменшуються на  $\Delta\sigma_3 = 0,24$  МПа (у межах похибки експерименту). Надалі введення КвШ за вмісту  $q = 20 \dots 80$  мас.ч. приводить до монотонно збільшення залишкових напружень, які становлять  $\sigma_3 = 1,32 \dots 3,34$  МПа, що узгоджується з результатами досліджень адгезійної міцності, оскільки за такого наповнення адгезія також поліпшується. Водночас, високі показники залишкових напружень негативно впливають на довговічність покриття у процесі експлуатації (відшарування матеріалу, крихке руйнування, сколювання та ін.).

У результаті експериментальних досліджень стосовно впливу наповнювача на адгезійну міцність та залишкові напруження у КМ встановлено оптимальний вміст часток КвШ для формування адгезійного шару захисних покриттів:

– для формування адгезійного шару покриття, де при експлуатації устаткування здебільшого переважають нормальні напруження, оптимальний вміст часток КвШ становить  $q = 40$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20, при цьому –  $\sigma_a = 52,83$  МПа,  $\sigma_3 = 2,8$  МПа;

– для формування адгезійного шару, де при експлуатації устаткування переважають дотичні напруження, оптимальний вміст часток КвШ становить –  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20, при цьому –  $\tau = 12,7$  МПа,  $\sigma_3 = 1,4$  МПа.

На наступному етапі досліджували фізико-механічні властивості КМ, наповнених частками КвШ. Встановлено, що руйнівні напруження при згинанні для епоксидної матриці становлять  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа (рис. 4, крива 1).

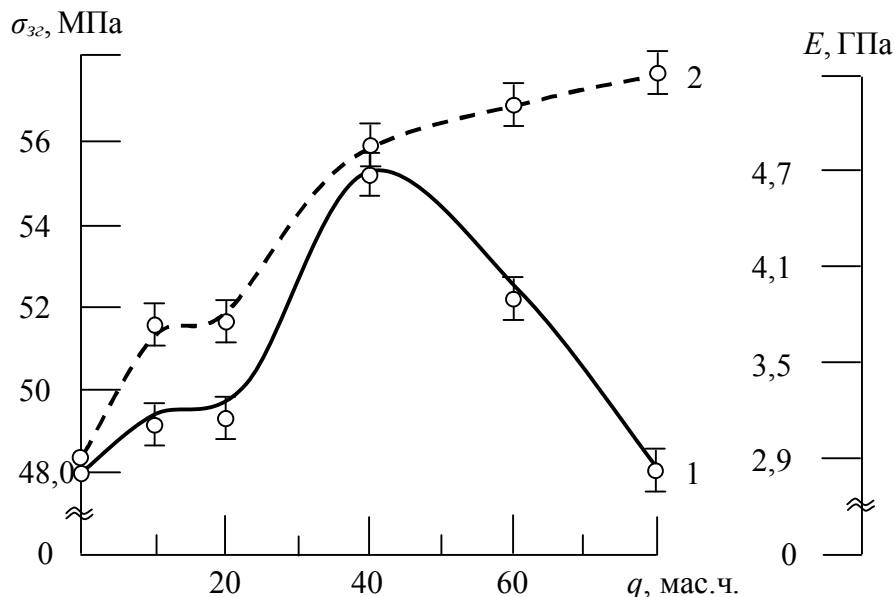


Рисунок 4 – Залежність руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) і модуля пружності при згинанні ( $E$ ) КМ від вмісту наповнювача конвертерного шлаку (КвШ): 1 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ); 2 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ).

Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач наповнювача КвШ за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. приводить до підвищення показників руйнівних напружень при згинанні КМ відносно матриці на  $\Delta\sigma_{32} = 1,41$  МПа. Це свідчить про взаємодію зв'язків -C-N-, -C-C-, -C-O-, -CH- наповнювача із боковими групами та сегментами епоксидного зв'язувача. При цьому зрозумілим є те, що при збільшенні вмісту часток КвШ зростає і кількість зв'язків

-C-N-, -C-C-, -C-O-. Тобто, формується просторова сітка полімеру з високим ступенем зшивання. Очевидно, цим можна пояснити максимальне значення руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32} = 55,0$  МПа) за вмісту КвШ –  $q = 40$  мас.ч. Слід зауважити, що при збільшенні вмісту дисперсних часток підвищується і густина композиції, при цьому обмежується рухливість молекул. Тому, під впливом зовнішнього навантаження відбувається мінімальне видовження молекул за рахунок ущільненої просторової сітки, що й спричиняє руйнування композитного матеріалу. Очевидно цим можна пояснити зменшення показників руйнівних напружень при згинанні до  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа при введенні часток КвШ за вмісту  $q = 60 \dots 80$  мас.ч.

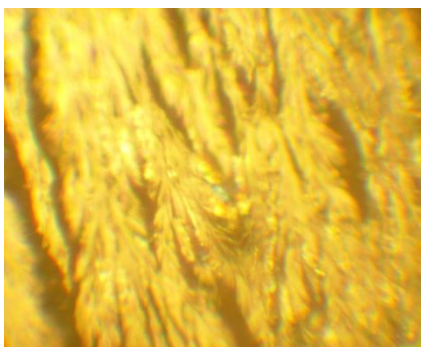
Паралельно досліджували залежність модуля пружності при згинанні від вмісту КвШ (рис. 4, крива 2). Експериментально встановлено, що при введенні часток КвШ, як і для руйнівних напружень при згинанні, спостерігали аналогічну динаміку збільшення показників модуля пружності залежно від вмісту часток. Тобто, при введенні КвШ за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. спостерігали монотонне збільшення модуля пружності з  $E = 2,90$  ГПа (для епоксидної матриці) до  $E = 3,7$  ГПа. Подальше введення наповнювача за вмісту  $q = 40 \dots 80$  мас.ч. зумовлює монотонне зростання модуля пружності до  $E = 4,7 \dots 5,3$  ГПа. Як було зазначено попередньо, при збільшенні вмісту часток КвШ збільшується густина просторової сітки (обмежується рухливість молекул), тобто зростає жорсткість системи. Таким чином ставили завдання отримання матеріалу, який задовольняє комплекс вимог, а саме – максимальне значення руйнівних напружень при згинанні з наперед заданими і допустимими показниками жорсткості та пружності системи. Дану вимогу забезпечено шляхом введення часток КвШ за вмісту  $q = 40$  мас.ч. Такий композит характеризується руйнівними напруженнями при згинанні –  $\sigma_{32} = 55,0$  МПа і модулем пружності при згинанні –  $E = 4,7$  ГПа.

На завершальному етапі методом оптичної мікроскопії досліджували поверхню зламу епоксидної матриці та композитів, наповнених частками КвШ (рис. 5). Аналіз фрактограм зламу епоксидної матриці (рис. 5, а, б) дозволяє стверджувати про формування поверхні руйнування з розгалуженими лініями сколювання, які мають виражені заглиблення, що характеризують напружений стан матеріалу й опосередковано свідчать про можливу крихкість полімеру у процесі експлуатації.

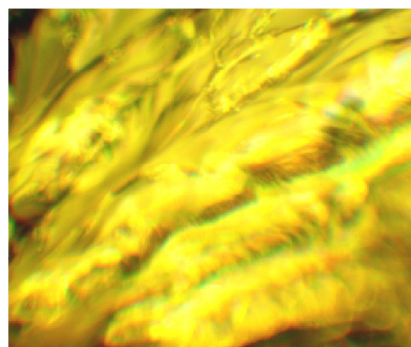
Аналіз поверхні зламу КМ із вмістом часток КвШ у кількості  $q = 10$  мас.ч. (рис. 5, в, г) дозволяє стверджувати, що при такому наповненні формуються матеріали з термодинамічно та кінетично врівноваженою структурою внаслідок незначного вмісту наповнювача. При дослідженні поверхні зламу КМ із вмістом часток КвШ у кількості  $q = 20$  мас.ч. (рис. 3, д, е) спостерігали схожу топологію матеріалу із незначними дефектами у вигляді незначних тріщин розгалуженого характеру. Відповідно, такі матеріали відзначаються незначним напруженим станом, а, отже, і поліпшеними механічними властивостями відносно матриці.

Як уже зазначено попередньо, при збільшенні вмісту часток КвШ збільшується густина зв'язувача, а, отже, і ущільнюється просторова сітка полімеру. При цьому важливим є рівномірність розподілених часток за об'ємом КМ. За таких умов зменшується можливість утворення концентраторів напружень і як наслідок – поліпшуються властивості епосикомпозитного матеріалу. Характерна структура такого матеріалу наведена на рис. 5, ж, з при наповненні КМ частками КвШ у кількості  $q = 20$  мас.ч. При цьому, слід зауважити, що дані матеріали характеризуються структурою, у якій відсутні широкі лінії сколювання та чітко виражені агломерати. Це свідчить про можливість використання даних матеріалів впродовж значного терміну експлуатації.

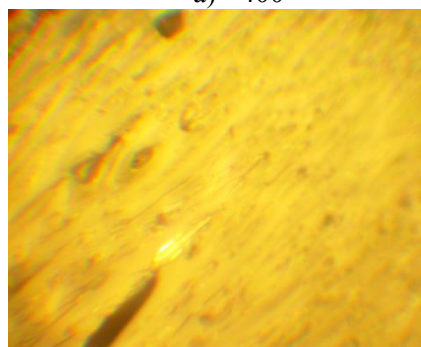
Відповідно ущільненою структурою також характеризуються композити із вмістом часток КвШ у кількості  $q = 60 \dots 80$  мас.ч. (рис. 5, і-м). Однак, на поверхні зламу таких КМ спостерігали незначні агломерати, поява яких не приводить до стабільності когезійних властивостей при експлуатації захисних покриттів.



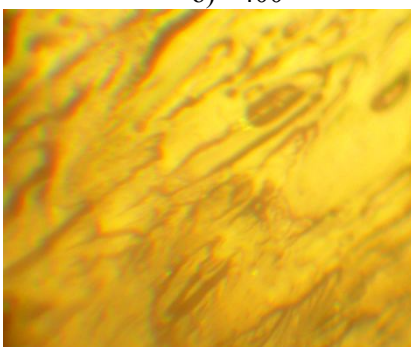
а) ×400



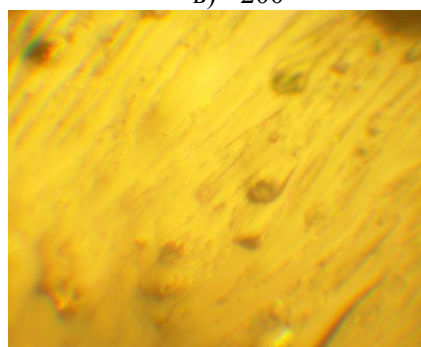
б) ×400



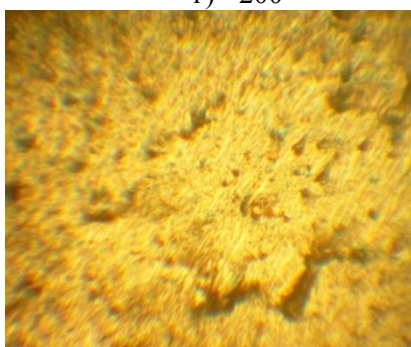
в) ×200



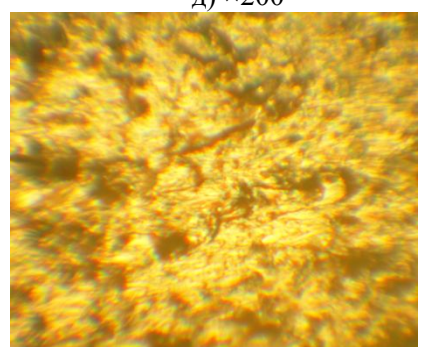
г) ×200



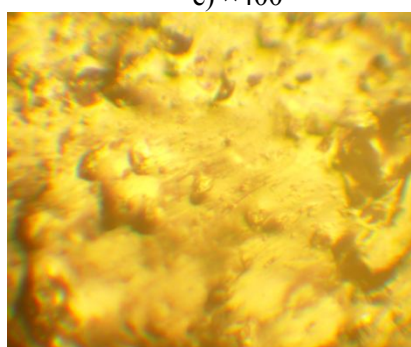
д) ×200



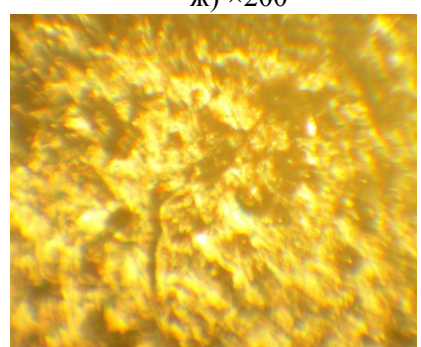
е) ×400



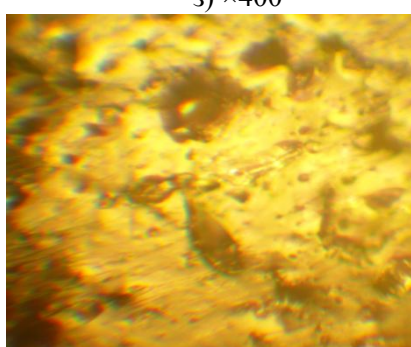
ж) ×200



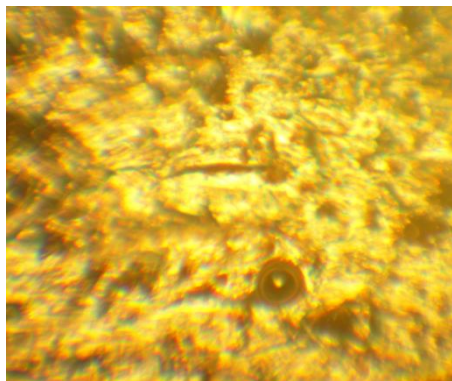
з) ×400



і) ×200



к) ×400



л) ×200



м) ×400

Рисунок 5 – Фрактограми зламу КМ, наповнених частками КвШ:

а), б) матриця; в), г) 10 мас.ч.; д), е) 20 мас.ч.; є), ж) 40 мас.ч.; з), и) 60 мас.ч.; і), й) 80 мас.ч.

**Висновки.** На основі проведених досліджень можна констатувати, що використання відходів киснево-конвертерного способу виробництва сталі є досить ефективним. При цьому забезпечується їх утилізація та водночас суттєве поліпшення показників адгезійної міцності композитів та їх фізико-механічних властивостей. У роботі встановлено:

1. Проведено ІЧ-спектральний аналіз часток конвертерного шламу, який дозволив виявити значну кількість зв'язків у діапазоні хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 2400 \text{ см}^{-1}$ , що свідчить про активність наповнювача і його здатність взаємодіяти із компонентами системи «ЕД-20 – ПЕПА».

2. Встановлено оптимальний вміст конвертерного шламу для формування композитного матеріалу з поліпшеними адгезійними властивостями: для забезпечення адгезійної міцності при відриві необхідно у епоксидний зв'язувач вводити  $q = 40$  мас.ч. конвертерного шламу на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20, при цьому показники адгезійної міцності становлять –  $\sigma_a = 52,83 \text{ МПа}$ , а залишкових напружень –  $\sigma_z = 2,8 \text{ МПа}$ ; для забезпечення адгезійної міцності при зсуві необхідно у епоксидний зв'язувач вводити  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. конвертерного шламу на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20, при цьому показники адгезійної міцності становлять –  $\tau = 12,7 \text{ МПа}$ , а залишкових напружень –  $\sigma_z = 1,4 \text{ МПа}$ .

3. Доведено, що для формування матриці з поліпшеними фізико-механічними властивостями у комплексі необхідно у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) вводити наповнювач конвертерний шлам за вмісту  $q = 40$  мас. ч. У такому випадку формується матеріал із наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 55,0 \text{ МПа}$ , модуль пружності при згинанні –  $E = 4,7 \text{ ГПа}$ .

4. Методом оптичної мікроскопії досліджено поверхню зламу епоксидної матриці та розроблених композитних матеріалів. Епоксидна матриця характеризується структурою зламу з розгалуженими лініями сколювання, які мають виражені заглиблення, що свідчить про напружений стан системи, а, отже, і її недовговічність. Фрактограми зламу епоксидного композиту за вмістом наповнювача  $q = 40$  мас.ч. характеризуються впорядкованою структурою, без наявних включень, що дає можливість стверджувати про максимальний ступінь зшивання таких композитів і можливість тривалої експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенгарт Ю. И. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование / Ю. И. Розенгарт, Б. И. Якобсон, З. А. Мурадова. – К. : Высшая шк., 1988. – 328 с.
2. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы. – С-Пб. : Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.



3. Богданова Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов / Ю. Г. Богданова. – М. : Научно-образовательный центр по нанотехнологиям, 2010. – 68 с.
4. Кандырин Л. Б. Исследование механических свойств наполненных композиций и полимербетонов на основе смесей фура-новых и эпоксидных смол / Л. Б. Кандырин, Б. Е. Усольцев и др. // Пласт. массы. – 2000. – № 7. – С. 34-37.
5. Букетов А. В. Епоксидні нанокompозити : монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
6. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Корякина. – М. : Химия, 1988. – 272 с.
7. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. – М. : Мир, 1991. – 536 с.
8. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів / [О. О. Сапронов, В. Д. Нігалатій, К. М. Клевцов, І. В. Смирнов, М. А. Долгов] // Вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2013. – № 2 (9). – С. 228-237.
9. Букетов А. В. Дослідження залежності властивостей епоксидних композитів від вмісту дисперсних наповнювачів з метою формування захисних покриттів для підйомно-транспортних механізмів / А. В. Букетов, О. О. Сапронов // Підйомно-транспортна техніка. – 2013. – №3 (39). – С. 92-107.
10. Букетов А. В. Влияние микродисперсного карбоната серебра на свойства эпоксикомпозитов / А. В. Букетов, А. А. Сапронов, Д. А. Зинченко, В. Н. Яцюк // Механика композиционных материалов и конструкций – 2015. – № 4. – С. 533-547.

## REFERENCES

1. Rozengart Yu. I. Vtorichnihe ehnergeticheskie resursih chernoyj metallurgii i ikh ispoljzovanie / Yu. I. Rozengart, B. I. Yakobson, Z. A Muradova. – K. : Vihsshaya shk., 1988. – 328 s.
2. Mikhayjlin Yu. A. Specialjnihe polimernihe kompozicionnihe materialih. – S-Pb. : Nauchnihe osnovih i tekhnologii, 2009. – 660 s.
3. Bogdanova Yu. G. Adgeziya i ee rolj v obespechenii prochnosti polimernih kompozitov / Yu. G. Bogdanova. – M. : Nauchno-obrazovateljniyhj centr po nanotekhnologiyam, 2010. – 68 s.
4. Kandihrin L. B. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv napolnennih kompoziciyj i polimerbetonov na osnove smesey furanovihkh i ehpoksidnihkh smol / L. B. Kandihrin, B. E. Usoljcev i dr. // Plast. massih. – 2000. – № 7. – S. 34-37.
5. Buketov A. V. Epoksidni nanokompозити : monografiya / A. V. Buketov, O. O. Saprnov, V. L. Aleksenko. – Kherson : KhDMA, 2015. – 184 s.
6. Koryakina M. I. Ispihtanie lakokrasochnihkh materialov i pokrihtiyj / M. I. Koryakina. – M. : Khimiya, 1988. – 272 s.
7. Nakamoto K. IK-spektrih i spektrih KR neorganicheskikh i koordinacionnihkh soedineniyj / K. Nakamoto. – M. : Mir, 1991. – 536 s.
8. Vpliv vmistu i prirodi dribnodispersnogo napovnyuvacha na mekhanichni vlastivosti i strukturu polimernih zakhisnih pokrittiv / [O. O. Saprnov, V. D. Nigalatiyj, K. M. Klevcov, I. V. Smirnov, M. A. Dolgov] // Visnik Khersons'koi derzhavnoi mors'koi akademii : naukoviy zhurnal. – Kherson : Vidavnictvo KhDMA, 2013. – № 2 (9). – S. 228-237.
9. Buketov A. V. Doslidzhennya zalezhnosti vlastivostey epoksidnih kompozitiv vid vmistu dispersnih napovnyuvachiv z metoyu formuvannya zakhisnih pokrittiv dlya pidyjomno-transportnih mekhanizmiv / A. V. Buketov, O. O. Saprnov // Pidyjomno-transportna tekhnika. – 2013. – №3 (39). – S. 92-107.

10. Buketov A. V. Vliyanie mikrodispersnogo karbonata serebra na svoystva epoksidnykh kompozitov / A. V. Buketov, A. A. Sapronov, D. A. Zinchenko, V. N. Yacyuk // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy – 2015. – № 4. – S. 533-547.

**Букетова Н.Н. ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО КОНВЕРТНОГО ШЛАМА НА АДГЕЗИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

*В работе представлен эффективный способ использования отходов от кислородно-конвертерного способа производства стали для обеспечения необходимого комплекса свойств эпоксидных композитов. Для исследования возможного взаимодействия частиц конвертерного шлама с эпоксидным связующим и отвердителем использован ИК-спектральный анализ, который позволил установить значительное количество связей -C-N-, -C-C-, -C-O-, -CH- на поверхности частиц наполнителя. Введение конвертерного шлама в эпоксидное связующее при оптимальном содержании позволяет повысить адгезионную прочность при отрыве в 2 раза, адгезионную прочность при сдвиге 1,1 раза, физико-механические свойства в 1,5 раза. Для исследования структуры шитых полимеров использована оптическая микроскопия. На основе анализа топологии материалов выявлена упорядоченная структура без видимых включений, что позволяет утверждать о максимальной степени сшивания композитных материалов с содержанием частиц конвертерного шлама в количестве  $q = 40$  мас.ч. на 100 мас.ч. эпоксидного связующего.*

**Ключевые слова:** дисперсный наполнитель, композит, ИК-спектральный анализ, адгезия, физико-механические свойства, структура излома, оптическая микроскопия.

**Buketova N.M. ESPECIALLY THE IMPACT OF PARTICULATE ENVELOPE CUTTINGS AND ADHESION OF TWO PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE COMPOSITES EPOKSIDNYH**

*This paper presents an efficient way to use waste from BOF steelmaking method to provide the necessary complex properties of epoxy composites. To investigate the possible interaction of particles converter sludge with epoxy binder and hardener used infrared spectral analysis, which revealed a large number of links -C-N-, -C-C-, -C-O-, -CH- on the surface of the filler particles. Introduction converter sludge in epoxy binder for optimal content can increase the adhesive strength in the separation of 2 times, shear adhesion strength of 1.1 times the physical and mechanical properties of 1.5 times. To study the structure of cross-linked polymers used optical microscopy. The analysis of the topology of the materials ordered structure found without inclusions available that enables assert the maximum degree of crosslinking of composite material parts for the content converter sludge  $q = 40$  parts.*

**Keywords:** particulate filler, composite, infrared spectral analysis, adhesion, physical and mechanical properties, fracture structure, optical microscopy.

© Букетова Н. М.

Статтю прийнято  
до редакції 20.10.2015