

УДК 621.762:621.893

П.П. Савчук<sup>1</sup>, А.Г. Косторнов<sup>2</sup>, В.П. Кашицький<sup>1</sup>  
**Вплив технологічних параметрів на властивості епоксидних  
композиційних матеріалів**

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,  
вул. Кржижанівського, 3, м. Київ, 03680

В роботі проаналізовано сучасні варіанти впливу на полімерні композиції при формуванні для покращення їх властивостей. Оптимізовано температурно-часові параметри обробки епоксидних композитів з різним ступенем наповнення. Показано ефективність трьохступеневої обробки композицій, а також доцільність термічної та фізичної модифікації систем на стадії їх отримання.

**Ключові слова:** епоксидний композиційний матеріал, властивості, структура, взаємодія, параметри, наповнювачі, в'язуче.

P.P. Savchuk<sup>1</sup>, A.G. Kostornov<sup>2</sup>, V.P. Kashytsky<sup>1</sup>

**Influence of technological parameters on properties of epoxy  
composition materials**

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University, 75, Lvivska Str., Lutsk, 43018

<sup>2</sup>Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, Ukrainian National Academy of Science,  
3 Krzhyzhanovsky str., Kiev, 03680

The modern variants of influence are in-process analysed on polymeric compositions at their forming for the improvement of properties. The temperature-sentinel parameters of treatment of epoxy composites are optimized with the different degree of the filling. Efficiency of three-sedate treatment of compositions, and also expedience of thermal and physical modification of the systems, is rotined on the stage of their receipt.

**Keywords:** epoxy composition material, properties, structure, co-operation, parameters, filling agents, astringent

*Стаття поступила до редакції 16.09.2008; прийнята до друку 30.10.2008.*

## Вступ

Отримання композиційного матеріалу з наперед заданими високими експлуатаційними характеристиками є одним із найважливіших завдань сучасного матеріалознавства. Це забезпечується шляхом направленою регулювання структурної сітки епоксидної матриці, досягненням термодинамічної, кінетичної та механічної сумісності інгредієнтів системи, науково обгрутованим введенням структурно активних компонентів, а також

ефективним зовнішнім впливом на систему на різних етапах її формування [1].

При цьому важливу роль відіграють силові фізичні й теплові поля, з допомогою яких змінюють структуру реактопластів і композиту в цілому. Залежно від етапу технологічного процесу силовий вплив здійснюють як на стадії формування епоксидного композиту, на стадії його тверднення, так і на етапі експлуатації [2, 3].

Доведено [4-7], що попередня обробка полімерної матриці у магнітному полі, ультрафіолетовим опроміненням або ультразвуком дає можливість зменшити внутрішні

напруження в системі, підвищити когезійну та адгезійну міцність матеріалу. Силі поля діють на рівні субструктури [8], змінюючи при цьому конформаційний набір молекул, що забезпечує створення оптимальної структурної сітки в'язучого.

Полімерні композиційні матеріали на сьогодні активно застосовуються в усіх сферах життєдіяльності людини. При цьому особливий науковий та практичний інтерес становлять композити на основі епоксидних смол. Цей зв'язувач, маючи розвинуту сировинну базу, здатний забезпечити високу адгезію на границі розділу полімер-наповнювач, є технологічним при формуванні композицій, а також у поєднанні з силіційорганічними складовими ініціює самоорганізовані процеси при фрикційній взаємодії [3, 6].

Аналіз структури епоксидних олігомерів, оброблених у магнітному полі, свідчить про зміни ступеня зшивання за рахунок перебудови глобул молекул та утворення додаткових вузлів зшивання внаслідок зближення реакційноздатних груп під дією додаткового моменту, який розвертає макромолекули і зміщує їх вздовж градієнту поля [9, 10].

Обробка епоксидної композиції в магнітному полі є ефективною при використанні наповнювачів феро- та парамагнітної природи. При цьому відбувається орієнтація макромолекул реактопласту навколо частинки наповнювача внаслідок електромагнітної взаємодії диполів полімеру з магнітним полем. Це забезпечує формування в композиті орієнтованих шарів в'язучого з підвищеною адгезійною міцністю [11].

У роботах [9, 12] відмічено про позитивний вплив ультразвукової обробки на структуру та фізико-механічні властивості епоксикомпозитів незалежно від магнітної сприйнятливості наповнювача. При цьому зафіксовано підвищення адгезійної міцності на 6-10 % та зниження внутрішніх напружень на 25-35 %. Ультразвукова обробка також прискорює процес тверднення системи внаслідок інтенсивного перемішування компонентів [12], що сприяє їх рівномірному розподілу в об'ємі композиту. При цьому відбувається краще змочування наповнювача внаслідок збільшення питомої площі поверхні дисперсних частинок, що призводить до зниження в'язкості обробленої ультразвуком (УЗ) композиції на 30 %, в порівнянні із необробленою [6]. Також УЗ-обробка інтенсифікує процеси дегазації в епоксидній матриці, що сприяє формуванню бездефектних покриттів, особливо при отриманні високонаповнених систем з великим вмістом газових включень і високою в'язкістю композиції [13]. Видаленню газових включень сприяє підвищення температури системи внаслідок її розігріву поглинутою

енергією.

Обробка композиції на стадії формування ультрафіолетовими променями призводить до руйнування ланцюгів макромолекул та утворення вільних макрорадикалів, здатних до хімічної взаємодії з поверхнею субстрату. Зокрема, авторами роботи [11] експериментально зафіксовано підвищення адгезійної міцності епоксидного в'язучого на 20 %. Опромінення дає позитивний результат у випадку обробки матриці без наповнювачів, які є бар'єром для проходження ультрафіолетових променів. На інтенсивність поглинутої енергії системи впливає товщина композиції, при збільшенні якої зменшуються кількість макрорадикалів та утворення додаткових вузлів зшивання через низьку здатність реактопласту пропускати промені.

У світовій практиці широкого розповсюдження набули способи тверднення епоксидних композитів із застосуванням струмів високої частоти [14], електронного опромінення та інфрачервоного нагріву. Авторами роботи [10] підтверджено факт інтенсивного розвитку реакції синтезу і збільшення ділянок упорядкування у разі тверднення полімерного в'язучого з використанням силових полів, порівняно з конвекторним нагрівом, що відбувається без якісної зміни кінцевих продуктів реакції. Це пов'язано з тим, що під впливом опромінення у процесі синтезу енергія активації сприймається молекулами безпосередньо, а не за рахунок теплопровідності системи.

У композитів, оброблених такими полями, зафіксовано більшу міцність зв'язків між макромолекулами та високий ступінь завершеності хімічного процесу взаємодії [7], який досягає близько 100%, порівняно з 88-95% при термічному твердненні. Опромінення впливає на швидкість утворення активних центрів та інтенсифікує процес протікання фізико-хімічної взаємодії між складовими системи, а також відбувається вільний та послідовний вихід летких речовин, що істотно впливає на підвищення міцності ЕКМ.

У разі опромінення процеси прогріву та тверднення реакційно здатних олігомерів суміщаються [7, 15], внаслідок чого час формування виробів скорочується у 10-20 разів. Радіаційне тверднення дає змогу точніше регулювати реакцію ініціювання полімеризації, швидкість й температуру процесу за рахунок зміни інтенсивності опромінення. Енергія, яка потрібна для радіаційного тверднення, у 3-4 рази нижча, ніж при термохімічному впливі, що дає змогу значно скоротити енергетичні витрати.

Широке застосування енергетичних полів для структурування полімерних в'язучих й формування наповнених систем в цілому зумовлене тим, що реалізація цих процесів не викликає технічних труднощів і може бути

використане для виготовлення виробів будь-якої товщини. Найперспективнішим напрямком є застосування комбінованих методів тверднення, що включають термохімічну і фізичну обробку у різних поєднаннях [16].

Таким чином, науково обгрунтоване застосування фізичних і термічних полів при формуванні епоксикомпозитних систем суттєво сприяє покращенню функціональних характеристик ЕКМ, керованості процесів, а отже їх поведінці при експлуатації. Актуальним у цьому напрямку досліджень також є визначення сукупної дії зовнішніх полів на покращення взаємодії на межі розділу фаз. Найбільш значимі результати можуть бути досягнуті при дії фізичних полів на стадії структуроутворення при формуванні композитів у виробі, або при нанесенні покриттів.

Метою досліджень є узагальнення результатів комплексного впливу технологічних параметрів енергетичної обробки на структуру й властивості ЕКМ.

### III. Експериментальна частина

У роботі для формування композитів використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20, яку структурували поліетиленполіаміном (ПЕПА) в кількості 12 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. Як модифікатори застосовано силіційорганічні сполуки КО-921, КО-08К, КО-978, КО-075, що являють собою розчини поліметилфенілсилоксанової смоли в толуолі, а також продукт часткової поліконденсації силіційорганічної смоли КО-08К (ТКОС). Як наповнювачі ЕКМ використано порошки фторопласту, лускатого графіту, купрум оксиду, а також подрібнене вуглецеве, базальтові тонке- та супертонке волокна.

Дослідження макро- та мікроструктур матеріалів, застосовуючи метод пластмасографії, проводили на оптичному мікроскопі МБС-9 при збільшенні ( $\times 30$ ) та металографічному мікроскопі МИМ-10 ( $\times 100 \dots 600$ ). Фрактограми зламу досліджували на скануючому електронному мікроскопі SUPERPROBE 733 (JEOL, Японія) при прискорюючій напрузі 25 кВ.

Фізико-механічні характеристики визначали за стандартними методиками. У роботі також використано установки для обробки епоксидних композицій на стадії формування ультразвуком та ультрафіолетовим опроміненням [3, 5, 7].

Композиції формували шляхом механічного суміщення інгредієнтів при почерговому введенні в епоксидні олігомери відповідно модифікаторів, твердника та підготовленої суміші наповнювачів з подальшою полімеризацією композицій за кімнатної та підвищеної (до 503 К) температурах при сталому та ступінчастому режимах обробки.

### IV. Результати та обговорення

Важливий технологічний етап розробки епоксидних композитів – оптимізація температурно-часових режимів їх тверднення. Відомо [6], що недостатній час структуровання при кімнатній температурі не забезпечує утворення оптимальної кількості фізико-хімічних зв'язків між матрицею та частинками наповнювача, а при високій температурі має місце зниження фізико-механічних характеристик матеріалу внаслідок руйнування зв'язків у композиті через термодеструктивні процеси та ріст внутрішніх напружень в таких системах.

Процес тверднення епоксидної смоли ЕД-20 в присутності ПЕПА доцільно проводити за максимальної кінцевої температури 433 К. Однак ця температура є недостатньою для повної поліконденсації силіційорганічних сполук, термічне тверднення яких відбувається в діапазоні температур 473-523 К [6, 17]. Аналіз фрактограм зламу епоксисиліційорганічних полімерів, термічно оброблених при 433 К, підтверджує наявність в структурі матриці неструктурованих золь-частих (рис. 1).

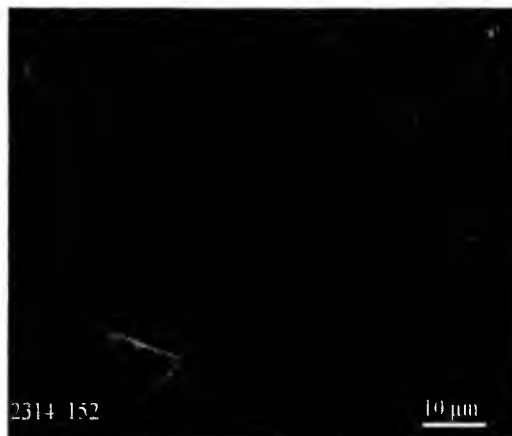


Рис.1. Фрактограма зламу епоксисиліційорганічного полімеру термічно обробленого за  $T_k = 433$  К.

Для визначення оптимального режиму термічної обробки проведено дослідження впливу кількості та природи модифікаторів на адгезійно-міцнісні характеристики вихідного епоксидного полімеру за різних температур термічної обробки.

Експериментально встановлено, що найвищі значення адгезійної міцності при нормальному відриві ( $\sigma_a = 16,5$  МПа) серед немодифікованих епоксиолімерів властиві матеріалам, сформованим за кінцевою температурою 483 К. Необхідно зауважити, що, порівняно з температурою обробки 453 К, відбулось суттєве підвищення досліджуваної характеристики, зокрема при введенні КО-921 – у 1,8 раз (рис. 2).

ЕКМ, термічно оброблені при 513 К, мають найнижчі значення адгезійної міцності ( $\sigma_a =$

3,8...4,4 МПа). Це пояснюється тим, що за високими температурами суттєво примножується кількість дефектів структури [6, 18] через термічну деструкцію епоксидної матриці, що в комплексі найбільш катастрофічно впливає на систему.

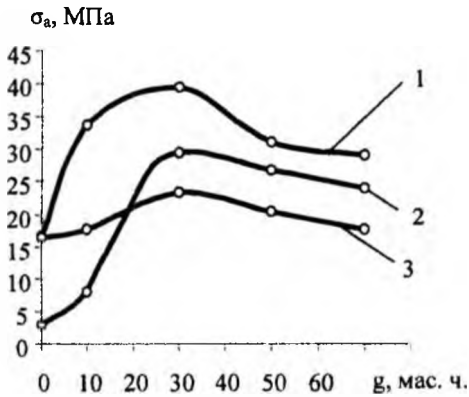


Рис. 2. Вплив модифікатора КО-921 на адгезійну міцність епоксидної матриці за кінцевої температури термічної обробки: 1 – 483 К; 2 – 513 К; 3 – 453 К.

Введення до епоксидної композиції силіційорганічних модифікаторів у кількості до 40 мас. ч. призводить до підвищення адгезійної міцності незалежно від режиму термічної обробки (див. рис. 2). Найвищі значення ( $\sigma_a = 39,4$  МПа) отримано для епоксисиліційорганічних полімерів, термічно оброблених за 483 К, для яких зафіксовано найнижчі внутрішні напруження ( $\sigma_{вн} = 0,17$  МПа). Встановлено, що досліджувана характеристика, термічно обробленого за  $T_k = 483$  К епоксисиліційорганічного полімеру, із зростанням вмісту КО-921 зростає на 58,9 %, порівняно з немодифікованим епоксиолімером. Значення адгезійної міцності модифікованих полімерів симбатно зростають у 1,3 та 7,8 раз за температур термообробки 453 К та 513 К відповідно. Збільшення концентрації модифікаторів призводить до зниження адгезійної міцності композитів при усіх досліджуваних режимах термічної обробки.

Нами також показано [6, 19], що вищий ступінь зшивання ( $G = 94,1$  %) мають епоксиолімери термічно оброблені за температури 483 К. Експериментально встановлено, що вміст гель-фракції в модифікованих епоксиолімерах термічно оброблених при температурах 513 К та 453 К є нижчим, порівняно з обробкою при температурі 483 К та поступово знижується пропорційно вмісту модифікатора. Зафіксовано, що різке зниження значень дослідних даних характерне для епоксисиліційорганічних полімерів з вмістом модифікатора понад 40 мас. ч.

Таким чином, термообробка за  $T_k = 453$  К не

забезпечує достатнього теплового впливу на процеси структурування в присутності силіційорганічної добавки, а висока температура (понад 513 К) призводить до ініціювання термодеструктивних процесів. Температура 483 К є оптимальною для епоксисиліційорганічних полімерів, оскільки при даному режимі термічної обробки досягається висока рухливість конгломератів макромолекул матриці, що призводить до зниження внутрішніх напружень у системі (рис. 3) та забезпечує найвищий ступінь структурування композиту ( $G = 94,2$  %), порівняно з іншими режимами, про що також свідчить погіршення фізико-механічних характеристик епоксисиліційорганічної матриці, обробленої за  $T_k = 513$  К (табл. 1).

Експериментально встановлено, що введення модифікатора в інтервалі концентрацій 20...40 мас. ч. у термічно оброблену систему призводить до зниження у ній внутрішніх напружень. Так, підвищення вмісту КО-921 зумовлює подальше зниження характеристики в досліджуваному інтервалі концентрацій епоксисиліційорганічного полімеру, термічно обробленого за кінцевої температури 483 К. Це свідчить про достатню рухливість макромолекул матриці та високий ступінь протікання процесів релаксації. Термообробка за кінцевої температури 483 К забезпечує формування просторової сітки епоксисиліційорганічного полімеру з найнижчими внутрішніми напруженнями, порівняно з іншими режимами обробки. Поява піку на кривій 1 (рис. 3) пов'язана з локальним виникненням напружених ділянок в інтервалі концентрацій 40...60 мас. ч. за високої температури ( $T_k = 513$  К) термообробки.

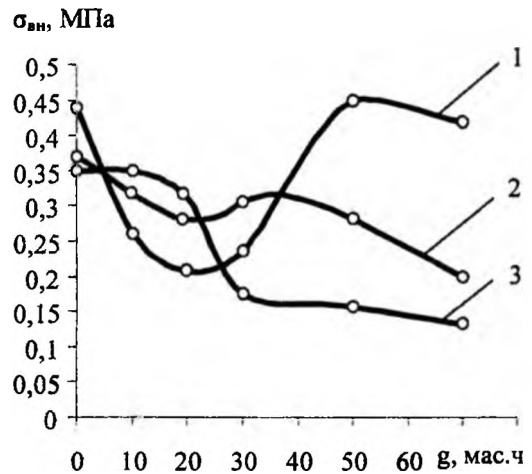


Рис. 3. Вплив модифікатора КО-921 на внутрішні напруження епоксиолімеру за кінцевої температури термічної обробки: 1 – 513 К; 2 – 453 К; 3 – 433 К.

Фізико-механічні характеристики ЕКМ, термічно оброблених за  $T_k = 483/513$  К

Вміст КО-921, мас.ч.	Ударна міцність, Дж	Модуль пружності, ГПа	Міцність при стиску, МПа	Міцність при згині, МПа
–	5,6/4,8	27,3/26,1	90,3/78,5	81,2/76,4
10	15,6/13,5	26,5/25,8	79,7/67,3	64,1/62,3
30	29,9/20,3	24,8/24,2	58,4/50,9	52,7/49,6
50	34,8/25,4	14,6/13,5	51,3/40,2	45,6/41,3
70	32,0/25,3	14,5/13,2	42,9/28,6	39,8/36,7

Підвищення вмісту модифікатора призводить до симбатного зниження модуля пружності, межі міцності при згині та стиску, що можна пояснити зростанням молекулярної рухливості та вільного об'єму, які в комплексі послаблюють міжмолекулярну взаємодію. При цьому, в досліджуваному інтервалі концентрацій відбувається підвищення ударної міцності, максимальне значення якої ( $A = 34,8$  Дж) зафіксовано для композиту з вмістом модифікатора 50 мас. ч., термічно обробленого за 483 К. Термообробка за кінцевої температури 513 К також погіршує інші фізико-механічні характеристики системи порівняно з оптимальним режимом.

Введення силіційорганічного модифікатора забезпечує вищу термостабільність системи в інтервалі температур 323...463 К, порівняно з немодифікованим полімером, про що свідчить початок ендотермічного ефекту за температури 323 К для епоксиполімеру та 463 К – для епоксисиліційорганічної матриці [6]. Початок ендотермічного ефекту пов'язаний з частковим топленням системи через незавершеність процесів структурування, тому ЕКМ стабільніший до високих температур, порівняно з епоксиполімерами [20]. Експериментально встановлено, що максимуми на кривих термічних ефектів у діапазоні температур 533...573 К свідчать про процеси термоокиснювальної деструкції, які в основному пов'язані з руйнуванням епоксидної складової.

Для модифікованих композитів характерна поява піків у ділянці високих температур 723...823 К [21], що пов'язано з деструкцією органічних радикалів силіційорганічної складової. Це вказує на вищу термостійкість епоксисиліційорганічного полімеру порівняно з немодифікованим епоксиполімером, для якого в ділянці високих температур характерне катастрофічне руйнування системи.

Аналіз кривої 1 (рис. 4) свідчить про зростання вмісту гель-фракції пропорційно тривалості термообробки. Встановлено, що найвищий ступінь структурованості епоксисиліційорганічного полімеру термічно

обробленого ( $T_{кін} = 483$  К) характерний при повільному нагріві матеріалу із швидкістю 7 К/хв. протягом 4 год. При нагріві зі швидкістю 42 К/хв. максимальне тверднення відбувається через 5 год. Це пов'язано з тим, що при швидкому нагріві частина епоксидної матриці залишається у неструктурованому стані через локальне утворення вузлів зшивання, які блокують структуроутворюючий процес. Нагрів понад п'яти год. є недоцільним, оскільки не спостерігається зростання досліджуваних характеристик.

Незалежно від тривалості термічної обробки найвищі внутрішні напруження ( $\sigma_{вн} = 0,23...0,41$  МПа) зафіксовано для епоксисиліційорганічного

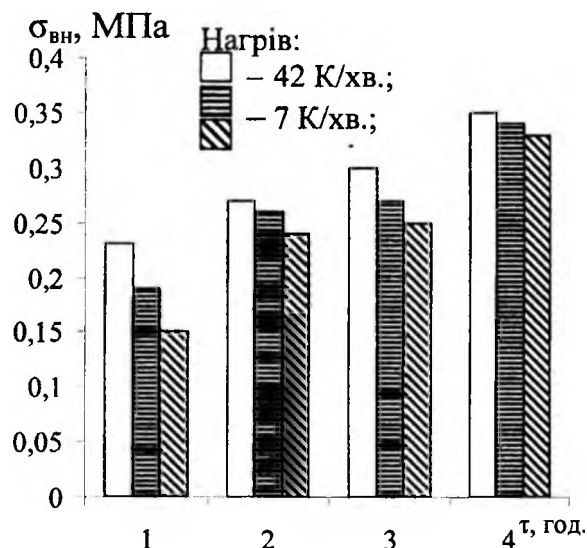


Рис. 4. Діаграма залежності внутрішніх напружень епоксисиліційорганічного полімеру від тривалості термічної обробки: 1 – 1 год.; 2 – 3 год.; 3 – 4 год.; 4 – 6 год.

полімеру при швидкому нагріві (див. рис. 4), а найнижчі – при ступінчастому ( $\sigma_{вн} = 0,12...0,33$  МПа).

Високі значення досліджуваної характеристики пов'язані із локальним зшиванням макромолекул матриці, при цьому процес відбувається хаотично та нерівномірно, відповідно частина системи знаходиться у напруженому

стані. При нагріві зі швидкістю 7 К/хв. до кінцевої температури 483 К спостерігається обмежена рухливість конгломератів макромолекул через високий ступінь структурованості, і, як наслідок, зменшення когезійної міцності системи (границя міцності на стиск та твердість зменшуються на 16,7% і 23,4% відповідно порівняно зі ступінчастим нагрівом) через сповільнені релаксаційні процеси.

Оптимальні характеристики ЕКМ отримано при ступінчастому нагріві, оскільки він забезпечує максимально повне структурування ( $G = 94,3\%$ ), аналогічно до повільного нагріву, та створює умови для зниження внутрішніх напружень ( $\sigma_{\text{вн}} = 0,18$  МПа), адже формування тривимірної сітки відбувається рівномірно з достатнім часом для конформаційних перетворень, що підтверджують результати фрактографічного аналізу (рис. 5).

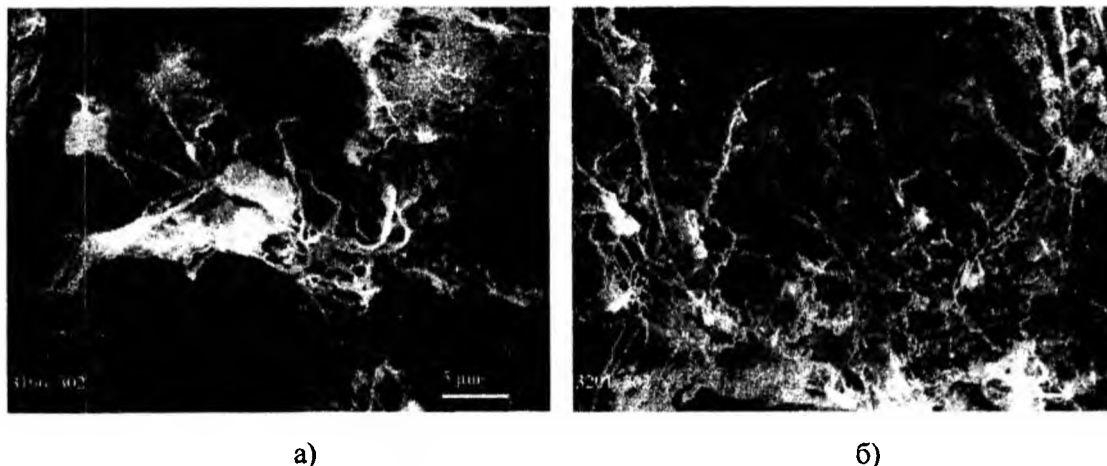


Рис. 5. Фрактограми зламу ЕКМ при сталому (а) і ступінчастому (б) режимах термічної обробки.

Таким чином, епоксидні полімери з вмістом модифікаторів 30-35 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли мають найвищий ступінь структурованості та найнижчі внутрішні напруження. Додаткова високотемпературна термічна обробка таких систем при ступінчастому нагріві до кінцевої температури 483 К є оптимальною для розроблених матеріалів, оскільки при цьому спостерігається максимальне підвищення фізико-механічних характеристик композитів.

Також вивчали ефективність комплексного впливу ультразвукової обробки, ультрафіолетового опромінення й магнітного поля на процеси структурування та фізико-механічні характеристики ЕКМ. Експериментально встановлено, що підвищення вмісту гель-фракції відбувається після обробки немодифікованих та модифікованих композицій на стадії формування ультразвуком та ультрафіолетовим опроміненням (рис. 6). Найвищий ступінь структурування ( $G = 94,8\%$ ) при обробці одиничним полем отримано після ультразвукової обробки. При обробці магнітним полем не відбувається суттєвого підвищення ступеня структурування через відсутність наповнювачів феромагнітної природи в такого типу композиціях, тому подальше використання даної обробки було недоцільним. Виходячи з неефективності обробки композицій у магнітному полі запропоновано комплексну обробку проводити з використанням

ультразвукової обробки та УФ-опромінення. Це дозволило підвищити ступінь структурування епоксисиліційорганічного композиту ( $G = 95,7\%$ ), внаслідок утворення додаткових вузлів зшивання між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксисиліційорганічної компоненти.

Обробка у фізичних полях забезпечила формування оптимальної структури та відповідне підвищення фізико-механічних характеристик композитів (рис. 6; табл. 2). Вищі значення адгезійної міцності, межі міцності при стиску та твердості отримано після обробки ультрафіолетовим опроміненням епоксисиліційорганічної матриці на стадії формування, порівняно з ультразвуковою обробкою. Це пов'язано з формуванням нових функціональних груп епоксидної та силіційорганічної складових внаслідок крекінгу макромолекул, що призводить до утворення додаткових вузлів зшивання. Отримані результати добре узгоджуються з даними робіт [7, 9].

Ударна міцність епоксисиліційорганічних композитів зростає при застосуванні ультразвукової обробки, яка забезпечує вищий ступінь однорідності композиту внаслідок інтенсифікації взаємодії складових системи та зниження дефектності структур в цілому.

Зростання фізико-механічних характеристик після комплексної обробки енергетичними полями пов'язане з підвищенням впорядкованості

системи, оскільки обробка ультразвуком забезпечила додаткове механічне перемішування складових на мікрорівні. Це привело до зменшення кількості пор в обробленому композиті, порівняно з необробленим (рис. 7). При цьому полімери без обробки енергетичними полями менш здатні до активної взаємодії компонентів на границях розділу фаз.

Таким чином, комплексна обробка у фізичних полях підвищила ступінь структурованості та в цілому фізико-механічні характеристики епоксисиліційорганічних композитів внаслідок формування оптимальної структури з мінімальною кількістю дефектів та високою адгезійною здатністю епоксисиліційорганічної матриці.

## Висновки

1. Оптимізовано режими формування ЕКМ. Показано, що епоксисиліційорганічні полімери з вмістом модифікаторів до 40 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли мають найвищий ступінь структурованості та максимальні фізико-механічні характеристики.
2. Найвищі значення адгезійної міцності ( $\sigma_a = 39,2$  МПа) отримано для епоксисиліційорганічних полімерів, термічно оброблених при 483 К з вмістом модифікатора 30-35 мас. ч., для яких зафіксовано найнижчі внутрішні напруження ( $\sigma_{вн} = 0,17$  МПа) та найвищий ступінь зшивання ( $G = 94,1$  МПа), що пов'язано з позитивним впливом силіційорганічної складової, особливо в діапазоні високих температур.
3. Встановлено, що додаткова термічна обробка систем, яка полягала у ступінчастому нагріві на кожному етапі (24 год при 293 К, 1 год при 333 К, 1 год при 393 К, 1 год при 453 К, 4 год при 483 К до кінцевої температури 483 К), є оптимальною для розроблених матеріалів, оскільки спостерігається підвищення фізико-механічних

характеристик ЕКМ в цілому за рахунок створення найбільш сприятливих умов для конформаційних перетворень в системі та більш

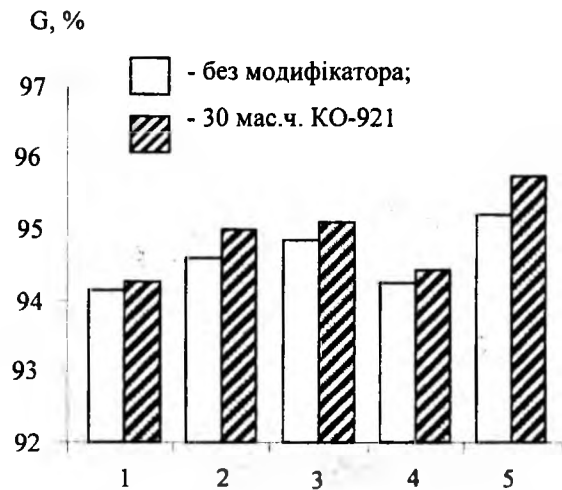


Рис. 6. Діаграма залежності вмісту гелевої фракції від обробки у фізичних полях композитів: 1 – без обробки; 2 – обробка УФ-опроміненням; 3 – УЗ-обробка; 4 – обробка магнітним полем; 5 – комплексна обробка УЗ-та УФ-опроміненням.

рівномірного формування тривимірної сітки.

4. Додаткова комплексна обробка епоксидних композицій на стадії отримання сприяє їх структурованості за рахунок більш рівномірного розподілу структурних складових, активізації взаємодії на межі розділу фаз, а також зменшення дефектності систем. Це дозволило підвищити ступінь структурованості епоксисиліційорганічного композиту ( $G = 95,7$  %) внаслідок утворення додаткових вузлів зшивання між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксисиліційорганічної компоненти.

Таблиця 2

### Фізико-механічні характеристики ЕКМ, оброблених у фізичних полях

Вид обробки	Адгезійна міцність, МПа	Міцність при стиску, МПа	Твердість НВ, МПа	Ударна міцність, Дж
–	39,3/41,3	58,9/60,3	10,9/14,5	28,8/31,1
УЗ-обробка	40,4/44,6	60,5/61,8	14,4/16,0	34,9/37,9
УФ-обробка	41,2/45,9	63,4/62,2	15,3/16,8	30,4/35,6
Комплексна обробка	43,7/49,3	65,6/66,7	17,5/18,9	37,0/39,4

Примітка: чисельник – ЕКМ, модифіковане КО-08К, знаменник – ТКОС

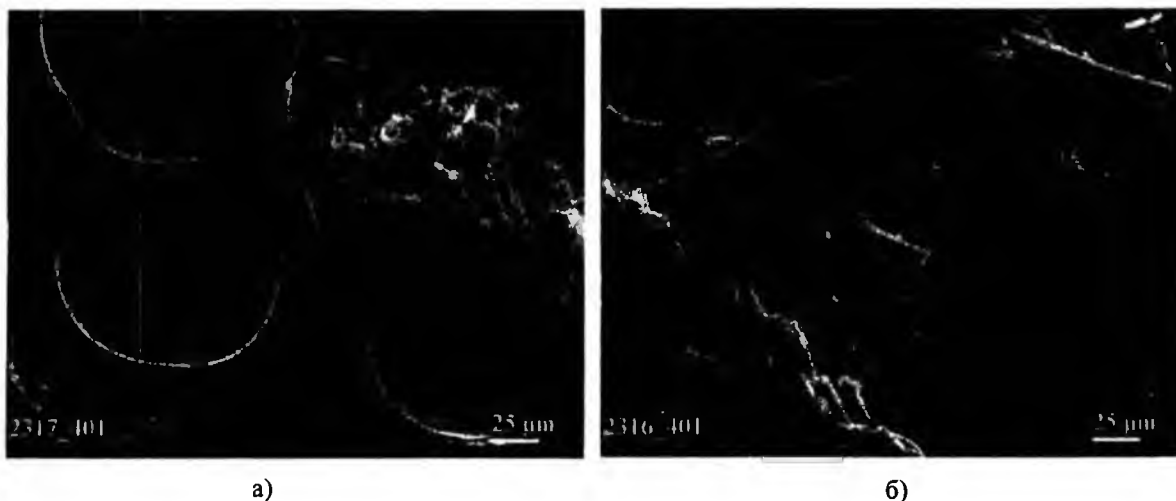


Рис. 7. Фрактограми зламу ЕКМ до (а) і після (б) комплексної обробки енергетичними полями.

### Література

1. Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2-х т. – Т.1: Основы науки о материалах / В.В. Скороход, Г.Г. Гнесин, В.М. Ажажа и др. – К.: Наукова думка, 2008. – 1152 с.
2. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. – М.: Химия, 1971. – 364 с.
3. Кашицкий В.П., Савчук П.П. Особливості обробки епоксикомпозитних композицій на стадії формування у фізичних полях // Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: міжвузівський збірник. – Луцьк. - 2007. – Вип. 19. – С. 150–155.
4. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Кальба Є.М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
5. Вплив зовнішніх фізичних полів на властивості захисних покриттів / П. П. Савчук, С. М. Голотенко, Є. М. Кальба та ін. // Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: міжвузівський збірник. – Луцьк. - 2007. – Вип. 20 (2).– С. 163-167.
6. Кашицкий В.П. Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів, модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.01 – Луцьк: ЛДТУ, 2006. – 20 с.
7. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Добротвор І.Г. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.
8. Mikelson A.E., Karklin Ya, Kh. Control of crystallization processes by means of magnetic fields // J. Cryst. Growth. – 1986. – N 52. – P. 524-529.
9. Букетов А.В. Розробка полімеркомпозиційних захисних покриттів із самоорганізуючою структурою: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.01 – Тернопіль: ТДПУ, 2001. – 20 с.
10. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці/ Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399 с.
11. Стухляк П.Д., Бадищук В.І., Чихіра І.В. Підвищення властивостей епоксикомпозитних матеріалів при ультрафіолетовому випромінюванні// Композиційні матеріали: тези доповідей III-ї міжнародної конференції. – К.: КПІ, 2004. – С. 128.
12. Отверждение эпоксидных компаундов при ультразвуковой обработке/ М.С. Тризно, Л.П. Вишневская, Е.В. Москалев та ін.// Пластические массы. – 1982. – №5. – С. 60.
13. Монолитизация полимеров при ультразвуковом воздействии/ Ю.М. Будницкий, А.Л. Голод, А.Н. Грибанов та ін.// Пластические массы. – 1991. – №1. – С. 33-35.
14. Штурман А.А., Черкашина А.Н. Ускоренное отверждение эпоксидных компаундов в поле ТВЧ // Пластические массы. – 1987. – №6. – С. 30-32.
15. Родин Ю.П., Молчанов Ю.М. Пространственное расположение элементов сетки компаунда ЭДТ-10 в слое, граничащем с проводящей поверхностью – источником неоднородного постоянного магнитного поля// Механика композитных материалов. – 1990. – №5. – С. 783-788.
16. Букетов А.В., Савчук П.П., Кальба Є.М. Синергетика комплексного впливу магнітного поля і



- ультразвуку при формуванні епоксикомпозитів// Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: міжвузівський збірник. – Луцьк. - 2003. – Вип. 12. – С. 27–31.
17. Применение кремнийорганических связующих для получения термостойких лакокрасочных материалов естественной сушки/ В.В. Северный, Н.В. Олейник, Ю.В. Голенко и др.// Пластические массы. – 1991. – №10. – С. 38-42.
  18. Влияние условий формирования адгезионного соединения эпоксидно-тиокольный компаунд со сталью на его прочность/ А.В. Виксне, Л.К. Ренце, В.М. Корюкин и др.// Пластические массы. – 1988. – №9. – С. 31-33.
  19. Савчук П. П., Отченашенко О. А., Гулай О. І. Вплив природи кремнійорганічного модифікатора і умов тверднення на властивості епоксидних композитів// Наукові нотатки Луцького державного технічного університету: міжвузівський збірник. – Луцьк. - 2007. - Вип. 20. – С. 429–431.
  20. Гулай О.І. Вплив органічних та неорганічних модифікаторів на властивості термостійких кремнійорганічних протикорозійних покриттів: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.01 – Львів: ФМІ, 2000. – 18 с.
  21. Круглицкий М.Н., Круглицкая В.Я. Структурообразование в органических и кремнийорганических средах. – К.: Наукова думка, 1981. – 316 с.

*Савчук П.П.* – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та обробки металів тиском Луцького національного технічного університету.

*Косторнов А.Г.* – академік НАН України, доктор технічних наук, професор, зав. відділом Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

*Кашицький В.П.* – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та обробки металів тиском Луцького національного технічного університету.

#### **Рецензент**

*Сіренко Г.О.* – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної хімії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.