

І.Г.Добротвор, доц., канд.техн.наук, П.Д.Стухляк, проф., д-р техн.наук,  
А.В.Букетов, доц., д-р техн.наук, К.М.Мороз, асп.

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## Фазова модель процесу поширення мікроструктур епоксикомпозитів із дисперсним наповнювачем

Запропонована модель осциляції поширення зовнішніх поверхневих шарів, що відображає динаміку формування мікроструктур при зшиванні епоксидних композитних матеріалів. Встановлено, що залежно від фізичної і хімічної природи введеного у епоксидний олігомери наповнювача на різних етапах зшивання матеріалів, формуються зовнішні поверхневі шари різного об'єму. Використовуючи експериментальні результати досліджень і математичну модель можна цілеспрямовано керувати експлуатаційними характеристиками епоксикомпозитів.

**епоксидні композитні матеріали, керування експлуатаційними характеристиками, поверхневі шари, динаміка формування мікроструктур, осциляція зовнішніх поверхневих шарів**

**Вступ.** Сучасне матеріалознавство полімерних матеріалів вимагає досліджень структурних процесів, що проходять на межі поділу фаз «наповнювач – олігомерний зв'язувач» при структуроутворенні композитних матеріалів (КМ). Такі фізичні і хімічні процеси залежать від фізичної природи введеного у олігомер дисперсного наповнювача, яка визначає структуру зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ), які означають як матеріал в стані граничних прошарків та шарів внутрішніх напружень [1, 2], що формуються у матриці і, в основному, визначають когезійні властивості КМ. Тому важливим є дослідження кінетики зміни ЗПШ від часу тверднення КМ, що містять дисперсні частки (зерна) різної фізичної природи.

Мета роботи – виділити часові проміжки тверднення КМ, суттєво різні за своїм характером поширення ЗПШ.

**Матеріали і методика дослідження.** Досліджувані КМ сформовані на основі зв'язувача - епоксидного діанового олігомера марки ЕД-20 і твердника поліетеленполіаму. Як наповнювачі в КМ використано порошки електрокорунду, фериту марки 1500 НМЗ, карбиду кремнію та карбиду бору з дисперсністю 63мкм, які вводили у зв'язувач при вмісті 20мас.ч. на 100мас.ч. епоксидної смоли.

На основі розробленої методики досліджено об'єм ЗПШ, що визначають експлуатаційні характеристики КМ. На першому етапі фотографували зразки за допомогою мікроскопа марки OLYMPUS C-8080 з витримкою при фотографуванні  $2\pm 0,1$  с, в результаті чого отримували фотографії у форматі JPEG при збільшенні у  $10^4$  разів. Зображення з отриманих фотографій записували на комп'ютері. Далі проводили обробку фотографій у інтерактивному режимі. Для цього з кожної фотографії були вибірково вибрані фрагменти, які містили одну дисперсну частку наповнювача з поверхневими шарами, а також фрагменти з трьома такими частками. Для аналізу результатів дослідження застосовували створену програму з використанням вбудованої мови програмування у системі MathCad. Проведення таких операцій над фрагментами дозволило розрахувати зміну протяжності ЗПШ навколо наповнювачів різної природи на різних етапах зшивання КМ.

**Обговорення результатів дослідження.** В дослідженні поширення ЗПШ користуватимемось поняттям магістральної лінії – прямої чи кривої, яка прийнята у вибраній системі координат для задання зміни параметра, що може описувати поширення змін в

структурі КМ. Явище руху точок-показників розглядуваної моделі представляє множини точок фіксації змін стану матеріалу композиту і є подібним за своєю геометричною природою до явища розповсюдження імпульсного сигналу.

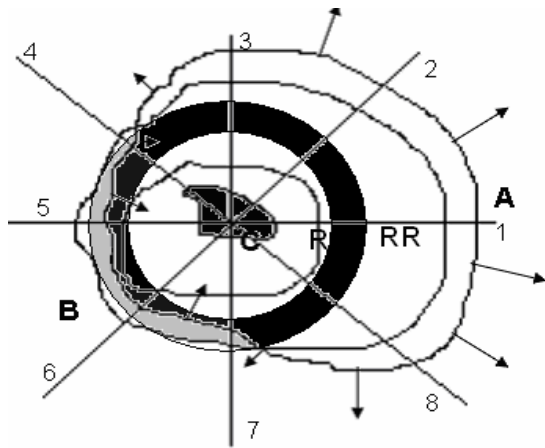
Експериментальні дослідження показують, що формування ЗПШ проходить проміжки часу, які на різних магістральних лініях можуть бути як інтервалами зростання так і спадання. Тому зауважимо, що інтегральна оцінка приросту протяжності ЗПШ по кільці **K**:  $R_i \leq r \leq R_{i+1}$  по усіх магістральних лініях може мати знак, що відрізняється від знаку приросту по деякій вибраній лінії на проміжку часу  $T_i \leq t \leq T_{i+1}$ .

Для випадку зображеному на рис.1 сумарний приріст протяжності ЗПШ по кільці формування **K** є додатним:

$$\iint_K y(r, \psi) d\sigma > 0, \quad (1)$$

де змінна  $0 \leq \psi < 2\pi$  – кутовий параметр, що визначає орієнтацію магістральної лінії;

$r$  – радіальна змінна:  $R \leq r \leq RR$ .



**A** – фронт росту ; **B** – фронт зменшення протяжності структур ЗПШ. **R** – внутрішня, **RR** – зовнішня межа кільця формування ЗПШ. Стрілками показано нормальні вектори локальних поширень фронту ЗПШ

Рисунок 1 – Формування ЗПШ в околі частки наповнювача із центром **C** по магістральних лініях 1, 2, 3, 8 проходить в напрямку зростання, а по лініях 4, 5, 6 та 7 по спаданню протяжності

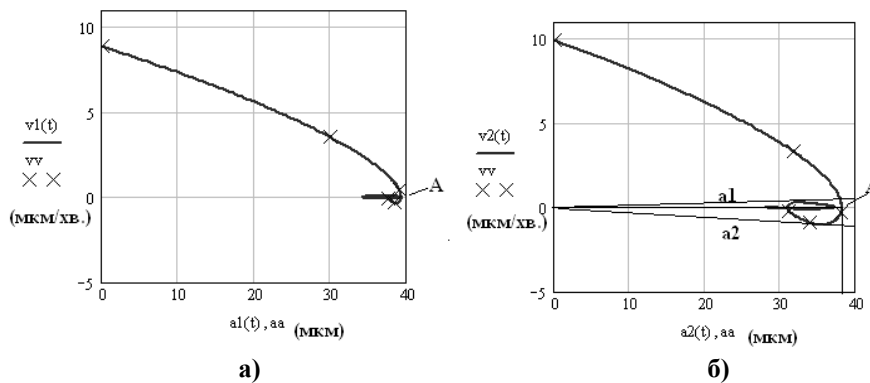
Поведінку елементу КМ на одній із вибраних магістральних ліній можна простежити на фазових портретах процесу поширення структур ЗПШ для кожного із дисперсних наповнювачів (рис.2). По фазових діаграмах

точок  $(a, v)$ , де  $a = a(t)$  - протяжність ЗПШ на момент часу  $t$ ,  $v = \frac{d}{dt}a$ , досліджуваних

процесів визначаємо положення точки **A** локального максимуму протяжності ЗПШ в часі із наступними відкатами, які візуалізуються у вигляді петель, що охоплюють горизонтальну вісь. Такі діаграми описують систему із в'язким тертям, сила якого

$$F(v) = \frac{F_0}{\varepsilon}, \quad F_0 > 0, \quad |v| < \varepsilon. \quad (3)$$

Параметр  $\varepsilon$  визначається положенням прямих **a1** та **a2**, розміщених по обидві



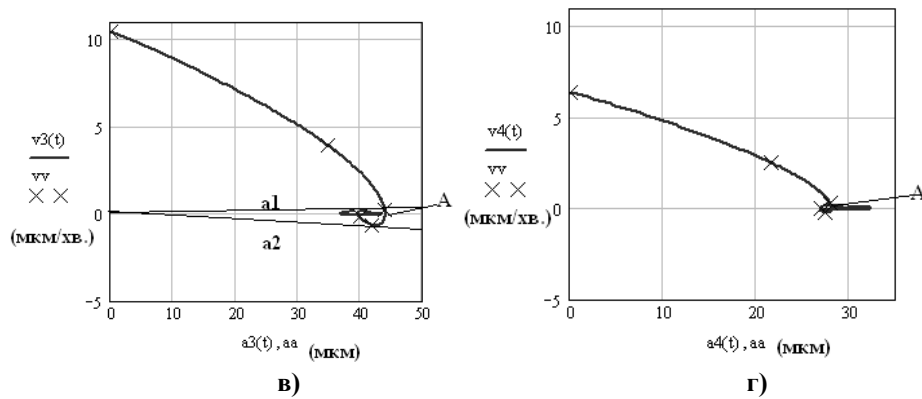


Рисунок 2 - Визначення точки *A* локального максимуму протяжності ЗПШ для КМ з карбідом кремнію (а), феритом (б), електрокорундом (в) та карбідом бору (г) в якості дисперсного наповнювача по фазових діаграмах: протяжність (мкм)- швидкість (мкм/хв.). Часові точки (перші 5) з проміжком у 10хв. на діаграмах позначені значком  $\times$ . Прямі зміни режиму зображені лише у випадках візуальної віддаленості від горизонтальної осі

сторони горизонтальної осі діаграм, на яких  $F(v)$  стрибкоподібно змінює своє значення, створюючи гістерезисну неідеальність. Прямі **a1** та **a2** утворюють кут із деякою віссю симетрії **b**, на якій здійснюються перемикання режимів поширення ЗПШ, тобто забезпечується осциляція поширення (1) з певною частотою

$$\gamma = \frac{c}{k(t)}, \quad c > 0, \quad (3)$$

яка на самій осі **b** повинна бути нескінченно великою. Оскільки  $\gamma \rightarrow \infty$  в околі нулів знаменника  $\gamma$ , (коренів  $k(t)$ ), то наближення частоти осциляції, яка на різних етапах тверднення буде різною, ми здійснюємо по часових координатах точок діаграм (рис.2), в яких проходить зміна режиму поширення ЗПШ, тобто тих, що лежать на фазовій траєкторії близько до осі **b**.

На основі результатів експериментальних досліджень отримано значення протяжності ЗПШ на різних етапах зшивання КМ з наповнювачами різної фізичної природи (табл. 1).

Таким чином, для кожного виду КМ отримано декілька осциляційних проміжків поширення ЗПШ із індивідуальною характеристикою частоти (табл.2).

Таблиця 1 – Значення протяжностей ЗПШ (мкм) для дисперсних наповнювачів (63мкм) різної фізичної природи

Час тверднення КМ (хв.)	електрокорунд (мкм)	ферит (мкм)	карбід кремнію (мкм)	карбід бору (мкм)
0	0	0	0	0
5	34,8	31,79	30,02	21,57
15	41,76	33,90	38,42	27,39
30	40,46	32,56	38,23	28,19
60	41,75	37,09	37,03	29,61
120	42,69	32,37	38,93	32,35
180	43,06	28,14	34,61	28,41
240	38,05	28,99	35,77	28,57
300	38,98	29,11	38,09	26,80

Таблиця 2 – Аналітичний вираз наближення характеристики  $k(t)$  частоти (2) осциляції швидкості поширення ЗПШ КМ для різних дисперсних наповнювачів

Дисперсний наповнювач	електрокорунд ферит	карбід кремнію	карбід бору	
Часові проміжки поширення (хв.) ЗПШ та відповідна характеристика $k(t)$ частоти	(50; 160) $t^2-210t+800$	(70;190) $t^2-260t+13300$	(70;120) $t^2-190t+8400$	(40;100) $t^2-140t+400$
	(160;270) $t^2-430t+43200$	(190;280) $t^2-470t+53200$	(120;200) $t^2-320t+24000$	(100;230) $t^2-330t+23000$
	–	–	(200;300) $t^2-500t+60000$	(230;400) $t^2-630t+92000$

**Висновки.** Отримані результати досліджень та побудована модель осциляції поширення ЗПШ дозволяє краще розуміти динаміку формування мікроструктур КМ в залежності від фізико-хімічної природи наповнювача та часових проміжків тверднення. Інформація про часові проміжки режимів поширення мікроструктур дозволяє покращити експлуатаційні характеристики плівок КМ, нанесених в якості покриття у відповідний часовий проміжок тверднення КМ.

В подальших дослідженнях характеристик тверднення покриттів планується встановлення і прогноз умов осциляції фазових координат діаграм поширення мікроструктур КМ.

## Список літератури

1. Бардзокас Д.И., Зобнин А.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
2. П.Стухляк, І.Добротвор. Використання методів кластерного аналізу моделей процесів формування епоксикомпозитів. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення», 11-15 вересня 2007 року, Севастополь, С.14-16.
3. Гашук П.М. Лінійні динамічні системи і звичайні диференціальні рівняння. – Львів: Українські технології, 2002. – 608 с.

Предложена модель осциляции распространения внешних поверхностных слоев, которая отображает динамику формирования микроструктур при сшивании эпоксидных композитных материалов. Установлено, что в зависимости от физической и химической природы введенного в эпоксидный олигомер наполнителя на разных этапах сшивания материалов, формируются внешние поверхностные слои разного объема. Используя экспериментальные результаты исследований и математическую модель можно целенаправленно регулировать эксплуатационные характеристики эпоксикомпозитов.

The model of oscillation distributions of external layers which gives the chance to understand the formation dynamics of microstructures at sewing of epoxycomposites is constructed. It is established, that depending on the physical and chemical nature of entered filler at different sewing stages of materials, external layers with different sizes are formed. On the basis of the received experimental results and the received mathematical model it is possible to supervise purposefully over operational characteristics of epoxycomposites.