

УДК 539.213:536.63

## Особливості процесів теплопереносу в термореактивних нанокompозитах на основі нанонаповнювачів різної анізотропії

*В.В. Корсканов, І.Л. Карпова, Т.А. Шанталій, К.С. Драган*

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України  
48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна

*Досліджено теплофізичні властивості, термодинаміка формування та термодинамічний стан на кожному етапі формування епоксидних нанокompозитів на основі нанонаповнювачів різної природи та просторової ізометрії (нанотрубки, наносфери, нанопластики). Виявлено, що формування структурної організації нанокompозитів відбувається за різними механізмами вже на початкових стадіях їх приготування. Встановлено, що механізми формування структури та морфології нанокompозитів визначаються природою нанонаповнювача та його питомою зовнішньою поверхнею. Методом сканування досліджуваних зразків просторово-різноспрямованими тепловими потоками виявлено явище переспрямування теплових полів у напрямку орієнтації теплопровідних анізотропічних нанонаповнювачів, що призводить до значної анізотропії теплопровідності нанокompозитів. Аналіз експериментальних даних і результатів трансмісійної та рефлексійної оптичної мікроскопії показав, що саме орієнтація анізотропічних нанонаповнювачів у нанокompозитах визначає анізотропію їхньої теплопровідності.*

**Ключові слова:** теплофізичні властивості, термодинаміка, анізотропічні нанонаповнювачі, анізотропія.

### Вступ.

Модифікація полімерів теплопровідними нанонаповнювачами (НН) – один з найбільш перспективних способів підвищення термічних властивостей полімерних нанокompозитів (НК) [1]. У свою чергу, теплопровідність більшості нанонаповнених НК очевидно не залежить від власної теплопровідності відповідного НН, а є результатом сукупності факторів – геометричних параметрів частинок НН, його зовнішньої поверхні, загальної гетерогенності НК тощо [2, 3]. Ці фактори є похідними від густини упаковки НН, яка визначається просторовою анізотропією НН [4]. З іншого боку, орієнтація функціональних анізотропічних НН у об'ємі НК призводить до просторової анізотропії його властивостей.

Зазвичай, для вивчення процесів анізотропії анізотропічні НН у НК примусово орієнтують під можливості експериментального обладнання за допомогою сильних зовнішніх силових полів (електричного, магнітного тощо) [1, 2, 5, 6].

Принциповою новизною цієї роботи є дослідження явища анізотропії теплопровідності шляхом зондування одних і тих самих нанокompозитів двома незалежними експериментальними методиками з просторово-різноспрямованими тепловими потоками.

### Об'єкти та методи дослідження.

Основою для приготування епоксидного полімеру

(ЕП) слугував епоксидіановий олігомер (ЕДО) на основі бісфенолу А з відносно низькою в'язкістю ( $\approx 450\text{--}650$  мПа·с) та густиною  $1150$  кг/м<sup>3</sup> (торгова марка DER 321 від DOW Chemical). Для хімічного зшивання ЕДО використовували затверджувач Polyurox H354 (виробник UPPC, Німеччина).

Зразки вихідного ЕП (ЕП-I) отримували змішуванням ЕДО з Polyurox H354 за співвідношення 100:52 ваг. ч. відповідно [7]. Суміш формували 24 год. за кімнатної температури. Термічне дозшивання проводили протягом 4-х год. за температури 473 К (ЕП-II).

Ефективними НН для отримання НК є карбонанотрубки (КНТ) завдяки їхній значній геометричній анізотропії, високим механічним властивостям, значним величинам тепло- та електропровідності і високій спорідненості з більшістю карбонантогових полімерів [2]. Для формування НК використовували КНТ з густиною  $2100$  кг/м<sup>3</sup>, довжиною  $1,0\text{--}1,5$  мкм, зовнішнім діаметром  $20$  нм, теплопровідністю  $140$  Вт/(м·К) і питомою поверхнею  $196\,000$  м<sup>2</sup>/кг [8, 9].

Аеросил (АЕ – сферичні наночастинки SiO<sub>2</sub> розміром  $7\text{--}40$  нм залежно від марки) широко використовують для покращення властивостей НК завдяки його міцності, високій адгезії до епоксидвмісних матеріалів та яскраво вираженим адсорбційним властивостям. З хімічної точки зору наявність на поверхні частинок АЕ силосанових груп забезпечують його високі

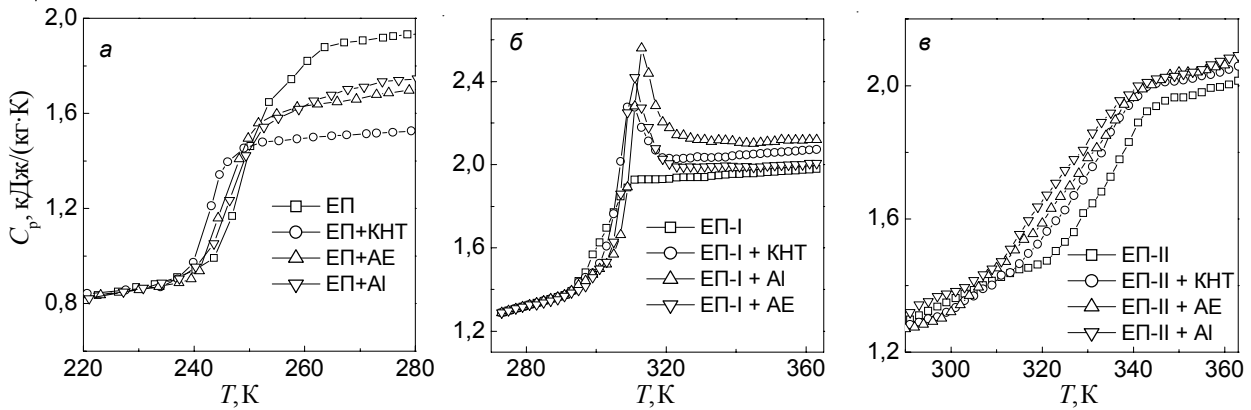


Рис. 1. Еволюція термограм ДСК досліджених зразків: а — вихідних; б — отриманих за кімнатної температури; в — термооброблених зразків ЕП, та ЕП, наповнених 0,5% КНТ, АЕ чи АІ

адсорбційні властивості та спорідненість з полярними полімерами. Для приготування НК використовували АЕ марки А-170 (сфери з діаметром 20 нм, густиною 2650 кг/м<sup>3</sup>, теплопровідністю 1,08 Вт/(м·К) і питомою поверхнею 175 000 м<sup>2</sup>/кг [10]).

Алюмінієвий порошок (АІ – пластинки товщиною близько 200 нм [11]) має високу міцність, хімічну та термічну стійкість. Завдяки високій адгезії до полімерів і шаруватій будові широко використовують як пігмент та застосовують для покращення термічних і механічних властивостей НК. Дисперсні частинки алюмінію використовували як теплопровідний анізотричний НН (пластинки густиною 2800 кг/м<sup>3</sup>, теплопровідністю 237 Вт/(м·К), середнім лінійним розміром у площині 2500 нм і питомою поверхнею близько 2000 м<sup>2</sup>/кг).

Приблизні оцінки маси окремо взятої наночастинки кожного типу (виходячи з геометричних розмірів і густини) становлять:  $m_{\text{КНТ}} \approx 6,6 \cdot 10^{-19}$  кг,  $m_{\text{АЕ}} \approx 1,1 \cdot 10^{-18}$  кг,  $m_{\text{АІ}} \approx 5,1 \cdot 10^{-10}$  кг, тобто для окремо взятих наночастинок  $m_{\text{КНТ}} < m_{\text{АЕ}} < m_{\text{АІ}}$ .

Теплоємність вимірювали за допомогою диференціального сканувального калориметра на діатермічній оболонці (ДСК) у діапазоні температур 180–400 К за швидкості нагрівання 2 К/хв. Калібрацію за абсолютними значеннями теплоємності проводили за допомогою еталонного кварцового порошку.

Величини основних термодинамічних потенціалів визначали з експериментальних термограм ДСК у рамках класичної термодинаміки [12].

Зміну ентальпії термодинамічної системи ( $\Delta H$ ) при нагріванні зразків від температури  $T_1$  до  $T_2$  розраховували зі значень теплоємності ( $C_p$ ):

$$\Delta H(T_1 \rightarrow T_2) (P = \text{const}) = \int_{T_1}^{T_2} \partial Q = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT. \quad (1)$$

Ентропію (впорядкованість) зразків за кожної температури  $T_i$  ( $T_1 \leq T_i \leq T_2$ ) визначали як:

$$\Delta S_{T_i} = \Delta H_{T_i} / \Delta T_i. \quad (2)$$

З термодинамічної точки зору величина ентропії ( $\Delta S_{T_i}$ ) – це кількість тепла, необхідного для нагрівання

термодинамічної системи до температури  $T_i$ . Надалі у статті цю величину будемо називати *провідністю тепла*.

Оскільки у фізико-хімічних процесах одночасно діють два протилежних фактори – ентропійний ( $T\Delta S$ ) та ентальпійний ( $\Delta H$ ), то сумарний ефект цих факторів за температури  $T_i$  визначає зміну вільної енергії, або енергії Гіббса ( $\Delta G$ ) (рівняння Гіббса-Геймгольца) [12]:

$$\Delta G_{T_i} = \Delta H_{T_i} - T_i \cdot \Delta S_{T_i}. \quad (3)$$

Теплопровідність між нижньою та верхньою площинною дископодібних зразків НК на основі ЕП-II діаметром 15 мм і товщиною близько 1 мм визначали за допомогою модернізованого вимірювача теплопровідності ИТ-λ-400 за швидкості нагрівання 4 К/хв. у температурному інтервалі 320–470 К з відносною похибкою, що не перевищує 5%.

Теплопровідність між бічними поверхнями циліндричних зразків діаметром 8 мм і висотою 15 мм визначали за допомогою диференційного скануючого калориметра на діатермічній оболонці (ДСК). Для калібрації обладнання ДСК за теплопровідністю використовували спеціально виготовлені *суцільні циліндричні зразки еталонного кварцу* різної висоти [13].

Досліджено зразки вихідного епоксидного полімеру та НК з масовим вмістом кожного НН  $w = 0,5\%$ .

#### Експериментальні результати та їх обговорення.

В температурному інтервалі 180–300 К були отримані термограми вихідного ЕП (суміші ЕДО з отверджувачем) і вихідних НК (рис. 1а). В діапазоні температур 260–360 К визначали теплоємність НК, які були отримані за кімнатної температури (ЕП-I і НК на його основі (рис. 1б)). Термічно оброблені (4 год. за  $T = 473$  К) матеріали (ЕП-II та НК на його основі) досліджували за температури від 290 до 400 К (рис. 1в).

На термограмі ДСК вихідного ЕП спостерігали стрибок теплоємності  $\Delta C_{p0} = 0,997$  Дж/(кг·К) за температури склування ( $T_{g0}$ ), рівної 247,0 К (рис. 1а). Додавання НН в ЕП супроводжувалось несподіваним ефектом «вимушеної пластифікації» (зниження  $T_{g0}$ ) з одночасним зменшенням  $\Delta C_{p0}$  (табл. 1). При цьому, теплофізичні

Таблиця 1. Теплофізичні властивості зшитих ЕП та НК на їх основі

№	Зразок	$T_g, K$	$\Delta T_g, K$	$\Delta C_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\alpha$
1	ЕП	247,0	26,7	0,997	1150	–
2	ЕП +КНТ	242,7	18,4	0,576	1154	–
3	ЕП +АЕ	245,0	19,2	0,659	1157	–
4	ЕП +АІ	246,0	30,4	0,774	1158	–
5	ЕП-І	302,3	22,6	0,488	1166	0,858
6	ЕП-І+КНТ	301,9	18,4	0,577	1170	0,896
7	ЕП-І+АЕ	301,3	20,6	0,650	1167	0,907
8	ЕП-І+АІ	299,4	22,8	0,544	1168	0,897
9	ЕП-ІІ	332,0	22,0	0,321	1167	1,000
10	ЕП-ІІ+КНТ	322,0	42,0	0,531	1172	0,960
11	ЕП-ІІ+АЕ	319,5	43,4	0,575	1169	0,949
12	ЕП-ІІ+АІ	319,0	46,0	0,580	1171	0,945

властивості змінюються симбатно питомій поверхні нанонаповнювача, тобто, значення  $T_{g0\text{ЕП}} > T_{g0\text{АІ}} > T_{g0\text{АЕ}} > T_{g0\text{КНТ}}$  і  $\Delta C_{p0\text{ЕП}} > \Delta C_{p0\text{АІ}} > \Delta C_{p0\text{АЕ}} > \Delta C_{p0\text{КНТ}}$ . На нашу думку, такі залежності теплофізичних властивостей вихідних зразків від питомої поверхні та природи НН можуть бути зумовлені наявністю граничного шару полімеру (ГШ) внаслідок специфічних взаємодій між компонентами вихідної суміші з поверхнею частинок наповнювача [10, 12].

Відносну масову частку ГШ ( $\alpha_{\text{ГШ}}$ ) оцінювали за допомогою співвідношення:

$$\alpha_{\text{ГШ}} = \frac{\Delta C_{p0} - \Delta C_{p0\text{НК}}}{\Delta C_{p0}}$$

де:  $\Delta C_{p0\text{НК}}$  – стрибок теплоємності вихідної суміші.

Значення  $\alpha_{\text{ГШКНТ}} = 0,42 > \alpha_{\text{ГШАЕ}} = 0,34 > \alpha_{\text{ГШАІ}} = 0,22$  цілком відповідають просторовим геометричним параметрам і зовнішній поверхні вибраних НН.

Отже, у вихідних НК частка граничного шару між епоксидною матрицею та модифікатором прямо пропорційна зовнішній поверхні НН.

Для зразка ЕП-І  $\Delta C_p$  при склуванні більш ніж удвічі нижчий ніж у вихідному ЕП, а його температура склування значно вища (табл. 1). Разом з цим, наявність ендотемічних ефектів на термограмах ДСК, наповнених ЕП-І, за температури 300–320 К є наслідком взаємодії недозшитих полімерних ланцюгів з частинками НН (рис. 1б). Істотна відмінність термограм свідчить про різну енергетику взаємодії НН з полімерною матрицею. Збільшення площі під цими піками (надлишкової ентальпії  $\Delta H_{\text{add}}$ ) у ряду  $\Delta H_{\text{addКНТ}} = 3,8 \text{ кДж}/\text{кг} < \Delta H_{\text{addАЕ}} = 4,0 \text{ кДж}/\text{кг} < \Delta H_{\text{addАІ}} = 4,6 \text{ кДж}/\text{кг}$  з одночасним зменшенням  $T_g$ , теж є результатом різної термодинамічної спорідненості НН з полімерною матрицею та різниці

геометричних параметрів (тобто масою окремо взятих наночастинок наповнювача  $m_{\text{КНТ}} < m_{\text{АЕ}} < m_{\text{АІ}}$ ). Отже, масивні анізотричні частинки НН здатні створювати більші стеричні перешкоди для формування полімерної сітки ЕП, ніж дрібні. На користь цього висновку свідчить зменшення  $T_g$  термооброблених зразків у ряду:  $T_{g\text{ЕП-ІІ}} > T_{g\text{ЕП-ІІ+КНТ}} > T_{g\text{ЕП-ІІ+АЕ}} > T_{g\text{ЕП-ІІ+АІ}}$  (рис. 1в, табл. 1).

Для детальнішого розуміння особливостей процесів теплопереносу в анізотропних НК вивчали термодинаміку їх формування та термодинамічний стан на кожному етапі формування.

Ступінь завершеності реакції зшивання зразків ( $\alpha$ ) оцінювали за рівнянням ДіБенедетто, що виявилось найбільш придатним для багатьох сітчастих полімерних систем, у тому числі і для полімерних сіток на епоксидній основі [14]:

$$\alpha = \left[ \frac{\Delta C_{p\infty}}{\Delta C_{p0}} \cdot \frac{T_g - T_{g\infty}}{T_g - T_{g0}} + 1 \right]^{-1}, \quad (4)$$

де:  $T_{g0}$ ,  $\Delta C_{p0}$  – температура склування та стрибок теплоємності при склуванні вихідних компонентів;  $T_{g\infty}$ ,  $\Delta C_{p\infty}$  – температура склування та стрибок теплоємності для повністю зшитого ЕП-ІІ;  $T_g$ ,  $\Delta C_p$  – ці ж значення для недозшитих зразків.

Дані табл. 1 свідчать, що ступінь завершеності реакції зшивання зразків серії ЕП-І ( $\alpha$ ) становить 0,86–0,91. Для термічно доотверджених нанонаповнених ЕП-ІІ полімерна сітка також залишається недозшиною ( $\alpha=0,95\text{--}0,96$ ).

Ефект термічного дозшивання зразків відображається підвищенням температури склування на величину  $\delta T_g = T_{g\infty} - T_g$  та супутнім зменшенням стрибка теплоємності ( $\delta C_p$ ) (табл. 2).

Таблиця 2. Параметри термічного дозшивання досліджених зразків

№	Зразок	$\delta T_g, K$	$\delta C_p, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\delta H, \text{кДж}/\text{кг}$	$\delta H_{\text{НК-ЕП}}, \text{кДж}/\text{кг}$	$\delta S_{\text{НК-ЕП}}, \text{кДж}/\text{кг}$	$\delta G_{\text{НК-ЕП}}, \text{кДж}/\text{кг}$
1	ЕП-ІІ	29,7	-0,167	2645	0	0	0
2	ЕП-ІІ+КНТ	21,8	-0,046	2682	36,4	0,105	0,967
3	ЕП-ІІ+АЕ	18,2	-0,075	2711	65,7	0,196	2,874
4	ЕП-ІІ+АІ	19,6	-0,054	2734	88,5	0,271	5,039

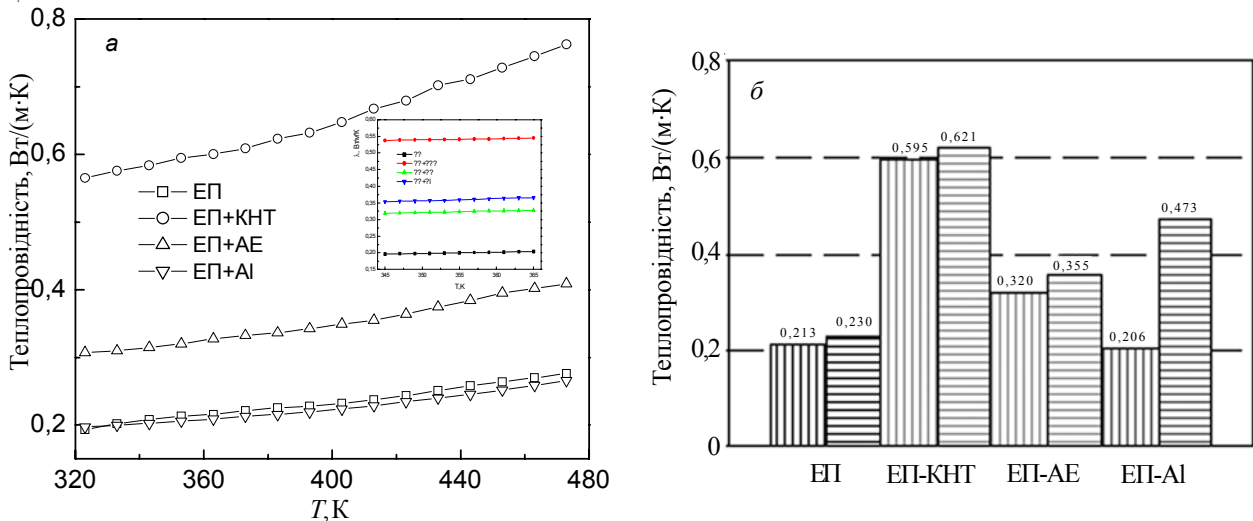


Рис. 2. температурна залежність теплопровідності у напрямку теплового потоку від нижньої до верхньої основи (вставка – у напрямку бічних поверхонь) циліндричних зразків (а); порівняльна діаграма теплопровідності у напрямку теплового потоку від нижньої до верхньої основи (вертикальний штрих) та у напрямку бічних поверхонь (горизонтальний штрих) за температури 353 К (б)

Оскільки величини теплових потоків за температури, вищої 330 К, у всіх зразках приблизно однакові (рис. 1б, в), то процеси теплопереносу мають контролюватися міжфазними явищами між їхніми компонентами (гетерогенністю). Оцінку гетерогенності досліджуваних матеріалів проводили шляхом порівняння їхніх термодинамічних властивостей.

Зміну ентальпії при формуванні EP-I можна розрахувати за формулою:

$$\Sigma \delta H_{EP-I} = \Sigma (\Delta H_{EP-I} - \Delta H_{EDO}) = 2301,3 \text{ кДж/кг.}$$

Тоді ентальпію повного зшивання EP можна оцінити як:

$$\Sigma \delta H_{EP-II} = \Sigma \delta H_{EP-I} / \alpha_{EP-I} = 2682,2 \text{ кДж/кг,}$$

де:  $\alpha_{EP-I} = 0,858$  – ступінь завершеності реакції зшивання EP-I (табл. 1).

З іншого боку, прякий розрахунок дає практично таку саму величину:

$$\Sigma \delta H_{EP-II} = \Delta H_{EP-II} - \Delta H_{EDO} = 2645,6 \text{ кДж/кг.}$$

Аналогічним чином розраховували і ентальпії формування НК.

Енергію міжфазної взаємодії епоксидної матриці з НК (табл. 2) розраховували як:

$$\delta H_{EP-NK} = \Delta H_{NK} - \Delta H_{EP-II}.$$

Гетерогенність термодинамічної системи зазвичай чисельно виражають величиною ентропії (впорядкованості). Відносну ентропію НК визначали як:

$$\delta S_{EP-NK} = \Delta S_{NK} - \Delta S_{EP-II}.$$

Відповідним чином, різниця вільної енергії становила:

$$\delta G_{EP-NK} = \Delta G_{NK} - \Delta G_{EP-II}.$$

Як видно з табл. 1, величини  $\Delta T_g$ ,  $\delta S_{EP-NK}$  (рис. 1в, вставка) та  $\delta G_{EP-NK}$  (табл. 2) підвищуються в ряду КНТ > АЕ > АІ. Це значить, що в цьому ряду зростає температурний інтервал склування, гетерогенність і

супутня їм вільна енергія нанонаповнених НК у порівнянні з EP-II.

Згідно із загальноприйнятим уявленням про механізми теплопереносу, це значить, що зразок EP-II+Al має найбільший рівень розсіювання фононів на флуктуаціях густини [12].

Отже встановлено, що *термодинамічна гетерогенність НК визначає їхню теплову провідність*.

Експериментальні значення теплопровідності у напрямку зовнішнього теплового потоку від нижньої до верхньої основи (IT-λ-400) та у напрямку теплового потоку між бічними поверхнями (розраховували згідно з окремою калібрацією ДСК на еталонних зразках кварцу [13]) наведені на рис. 2.

Абсолютні значення теплопровідності EP-II двох незалежних експериментів співпадають у межах похибки (до 5 %) і близькі до літературних [3, 7, 9, 13]. Для зразків EP+KHT теплопровідності в обох напрямках зовнішнього теплового потоку теж близькі і майже у три рази перевищують теплопровідність епоксидної матриці за рахунок високої теплопровідності КНТ [2,

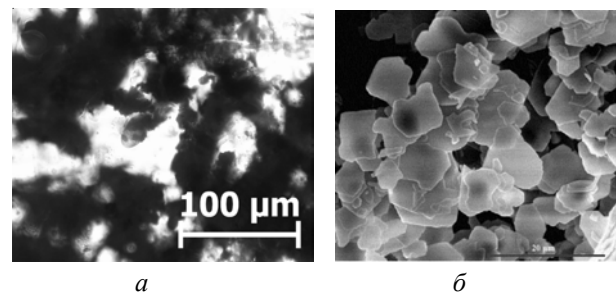


Рис. 3. Мікрофотографії нанокompозиту на основі EP та Al: а – трансмісійна оптична мікроскопія; б – рефлексійна оптична мікроскопія [11]

11]. Теплопровідність епоксидних композитів на основі сферичних наночастинок АЕ значно вища від провідності ЕП-П і теж не чутлива до напрямку зовнішнього теплового потоку (рис. 2а). На відміну від попередніх НК, значна анізотропія плоских наночастинок АІ (рис. 3) приводить до сильної анізотропії теплопровідності у нанокompозитах ЕП+АІ (рис. 2б). Тобто, у цьому випадку проявляється ефект перерозподілу зовнішнього теплового потоку в напрямку самоорієнтації пластин теплопровідного НН вздовж поверхні підкладки. Подібні ефекти були виявлені в епоксидних НК на основі пластинчастого графену [15].

Аналіз експериментальних даних і результатів трансмісійної оптичної мікроскопії (ТОМ) та рефлексійної оптичної мікроскопії (РОМ) показав, що саме орієнтація анізотричних НН у НК визначає їхню анізотропію (рис. 3).

## Література

1. Paul D.R., Robeson L.M. // Polymer. – 2008. – **49**. – P. 3187–3204.
2. Wang M., Pan N. // Materials Science and Engineering. – 2008. – **1**. – P. 1–30.
3. Fu Y., He Zh., Mo D., Lu Sh. // Applied Thermal Engineering. – 2014. – **66**. – P. 493–498.
4. Caulkin R., Tian W., Pasha M., A. Hassanpour, Jia X. // Computers & Chemical Engineering. – 2015. – **76**. – P. 160–169.
5. Boudenne A., Мамуня Ye., Levchenko V., Garnier B., Lebedev Ye. // Europ. Polymer J. – 2015. – **63**. – P. 11–19.
6. Yoonessi M., Gaier J.R., Peck J.A., Meador M.A. // Carbon. – 2015. – **84**. – P. 375–382.
7. Диннисен Т., Ташикова Ю., В. // Лакокрасоч. материалы и их применение. – 2007. – **1**, № 4. – С. 1–6.
8. Лемеш Н.В., Лысенков Э.А., Гомза Ю.П. и др. // Укр. хім. журн. – 2010. – **76**, № 5. – С. 29–36.
9. Корсканов В.В., Мамуня С.П., Карпова І.Л. та ін. // Полімер. журн. – 2011. – **33**, № 2. – С. 107–110.
10. Пахаренко В.А., Зверлин В.Г., Кириенко Е.М. Наполненные термопласты: Справочник / Под общ. ред. акад. Ю. С. Липатова. – К.: Техніка, 1986. – 182 с.
11. Parameswaran V., Shukla D. // Materials Sci. and Engineering. – 2010 – **527**, № 16. – P. 3792–3799.
12. Базаров И. П. Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1991. – 376 с.
13. Hu M., Yu D., Wei J. // Polymer Testing. – 2007. – **26**. – P. 333–337.
14. Montserrat S. // Polymer. – 1995. – **36**, N 2. – P. 435–436.
15. Song Yu., Yang Ch., Liu D., Lin Y., Nan C.W. // Ceramics International. – 2012. – **38**. – P. 591–594.

Надійшла до редакції 25 червня 2015 р.

## **Особенности процессов теплопереноса в термореактивных нанокompозитах на основе нанонаполнителей различной анизотропии**

*В.В. Корсканов, І.Л. Карпова, Т.А. Шанталій, Е.С. Драган*

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины  
Харьковское шоссе 48, Киев, 02160, Украина

*Исследованы теплофизические свойства, термодинамика формирования и термодинамическое состояние на каждом этапе формирования эпоксидных нанокompозитов на основе нанонаполнителей разной природы и пространственной изотропии (нанотрубки, наносферы, нанопластины). Обнаружено, что формирование структурной организации нанокompозитов происходит по различным механизмам уже на начальных стадиях их приготовления. Установлено, что механизмы формирования структуры и морфологии нанокompозитов определяются природой нанонаполнителя и его удельной внешней поверхностью. Методом сканирования исследуемых образцов пространственно-разнонаправленными тепловыми потоками обнаружено явление перераспределения тепловых полей в направлении ориентации теплопроводных анизотропических нанонаполнителей, которое приводит к значительной анизотропии теплопроводности нанокompозитов. Анализ экспериментальных данных и результатов трансмиссионной и рефлексионной оптической микроскопии показал, что именно ориентация анизотропических нанонаполнителей в нанокompозитах определяет анизотропию их теплопроводности.*

**Ключевые слова:** теплофизические свойства, термодинамика, анизотропические нанонаполнители, анизотропия.

## **The Features of the Processes of Heat Transfer in Thermoset Nanocomposites Based on Nanofillers with Different Anisometry**

*V.V. Korskanov, I.L. Karpova, T.A. Shantalii, E.S. Dragan*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine  
48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine

*The thermophysical properties, thermodynamics of formation and thermodynamic state at every stage of formation of the epoxy nanocomposites based on nanofillers with different spatial isometry (nanotubes, nanospheres, nanoplates) were investigated. It has been found that the formation of the structural organization of nanocomposites occurs by various mechanisms at early stages of their preparation. It is shown that the formation of the structure and morphology of nanocomposite dependence from the nature and specific outside surface of nanofiller. The phenomenon of redistribution of the thermal fields to direction orientation towards isometric heat-conducting nanofillers were discovered by methods of the scanning of samples of the thermal fields with different spatial directions. The analysis of the experimental data shown that the orientation of the isometric nanocomposites nanofillers in nanocomposites leads to anisotropy their thermal conductivity.*

**Key words:** thermophysical properties, thermodynamics, anisometric nanofillers, anisotropy.