

---

---

# ПЛАСТИЧНІ МАСИ

---

---

УДК 618.029.5:669.536.21

Л.В. Базюк<sup>1</sup>, В.П. Свідерський<sup>2</sup>

## Вплив типу і форми наповнювачів на теплофізичні властивості композитів на основі політетрафторетилену і ароматичного поліаміду

<sup>1</sup>*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,*

*вул. Шевченка 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна*

<sup>2</sup>*Хмельницький національний університет,*

*вул. Інститутська 11, м. Хмельницький, 29016, Україна*

Досліджено залежність між розміром частинок наповнювача, їх формою та розподілом за розмірами, концентрацією, ступенем графітації, теплопровідністю частинок наповнювача та теплопровідністю композиту на основі політетрафторетилену і ароматичного поліаміду. Зроблено теоретичний аналіз результатів розрахунків теплопровідності композитів з різними наповнювачами за моделями Максвелла–Ейкена, Оделевського, Дуньєва і Нільсена.

**Ключові слова:** композиційні матеріали, політетрафторетилен, ароматичний поліамід, наповнювач, теплопровідність.

L.V. Bazyuk<sup>1</sup>, V.P. Svidersky<sup>2</sup>

## Influence of Type and Form of the Fillers on Thermophysical Properties for composite Materials on the base of the Polytetrafluoroethylene and Aromatic Polyamide

<sup>1</sup>*'Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,*

*57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

<sup>2</sup>*Hmelnytsky National University,*

*11, Instytutska Str., Hmelnytsky, 29016, Ukraine*

Dependence between size of components filler, its form and distribution for sizes, concentration, degree of the grafitation, thermal conductivity of components of the filler and thermal conductivity of composite material based on polytetrafluoroethylene and aromatic polyamide are explored. Theoretical analyze of results calculations of thermal conductivity of composite materials with different fillers using Maksvel-Eiken, Odelevsky, Dulnev and Nilsen's formulas are made.

**Key words:** composition materials, polytetrafluorethylene, aromatic polyamide, filler, thermal conductivity.

*Стаття постуила до редакції 21.01.2008; прийнята до друку 31.03.2008.*

### Вступ

При проектуванні композиційних матеріалів і розробці технології їх переробки у виробі необхідно знати залежності теплопровідності композитів від типу і форми наповнювачів. Разом з тим, знання теплофізичних властивостей матеріалів дозволяє прогнозувати їх поведінку в реальних умовах експлуатації.

Відсутність на сьогодні теорії теплопровідності полімерів і композиційних

матеріалів на їх основі та існування кількох розрахункових формул теплопровідності композиційних полімерних матеріалів ставить за завдання порівняти результати експериментального і емпіричного визначення теплопровідності цих матеріалів.

### І. Експериментальна частина

Об'єктом дослідження були композиційні матеріали на основі полімерної матриці з порошку

Таблиця 1

Гранулометричний склад мікропорошку карбиду титану				
Розмір зерна	Склад фракцій за зернистістю, мкм			
	гранична (не більше 2%)	груба (не більше 8%)	основна (не менше 55%)	мілка (не більше 35%)
5-7	14 – 10	10 – 7	7 – 5	5 – 2
3-5	10 – 7	7 – 5	5 – 3	3 – 1
2-3	7 – 5	5 – 3	3 – 2	>2
1-2	5 – 3	3 – 2	2 – 1	> 1

Таблиця 2

Теплопровідність композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду при 298К

Наповнювач	Форма частинок наповнювача	Розрахункова теплопровідність (Вт/м·К) за моделями				Експериментальна теплопровідність (Вт/м·К)
		Максвелла – Ейкена	Одєлевського	Нільсена	Дульєна	
Фторопласт-4	волокнувата	0,27	0,28	0,28	0,28	0,43
Фторопласт-4Д	сферична	0,28	0,28	0,34	0,28	0,40
Фторопласт-4А	лускова	0,27	0,28	0,28	0,28	0,34

політетрафторетилєну (фторопласт-4) з формою частинок волокнуватою, сферичною і у вигляді луски та порошку ароматичного поліаміду фенілон С-2. Політетрафторетилєн (фторопласт-4) з волокнуватою формою частинок наповнювали порошками: графітом марки С-1 із зольністю 1,5%, розміром частинок основної фракції 1-8 мкм (99,5% частинок менше 63 мкм); дисульфідом молібдену  $\text{MoS}_2$  марки МВЧ-1 з розміром частинок основної фракції 12-16 мкм (99% частинок менше 63 мкм); термообробленим при 1123 К коксом; порошками міді і нікєлю з розміром частинок менше 63 мкм (99%); карбідом титану з розміром частинок основної фракції (більше 55%) 0-1, 1-2, 2-3, 3-5, 5-7, 7-10 мкм (табл. 1); дроблені вуглецеві волокна з низьким (LM) та високим (HM) модулем пружності (на основі гідратцелюлози (ГЦ) та поліакрилонітрилу (ПАН) термооброблених при  $T_K = 1120 - 2670$  К). Низько модульні низько міцні вуглецеві волокна отримали з вуглецевої повсті, волокна із ГЦ – з вуглецевої тканини, а волокна з ПАН – з довгих вуглецевих волокон.

Вихідний карбід титану мав розмір частинок від 0 до 1000 мкм. За допомогою технології [1], використовуючи ситовий класифікатор, отримували вихідні порошки для мікроаналізу ситами вузьких фракцій 50-63, 40-50 мкм. Мікропорошки вузьких фракцій отримували із ситових порошків. Спочатку до порошку карбиду титану додавали желатини з содою і висаджували з в'язкого водного розчину вузькі фракції 40-60 із фракції 50-63 або 28-40 із фракції 40-50 мкм. Потім, змінюючи концентрацію

желатину (в'язкість та густину розчину), послідовно висаджували вузькі фракції 28-40, 20-28, 14-20, 10-14 мкм. З останньої фракції шляхом центрифугування, змінюючи концентрацію желатину і, змінюючи число обертів центрифуги від 465 до 2500 на хвилину, послідовно отримували більш мілкі фракції карбиду титану 7-10, 5-7, 3-5, 2-3, 1-2, 0-1 мкм.

Вихідні вуглецеві матеріали довжиною 3-15 мм здрибнювали в дробарці МРП-1 при 7000 об./хв. (при частоті  $117\text{с}^{-1}$ , діаметрі ножів 0,205 м і максимальній лінійній швидкості 75м/с). Внаслідок чого отримували дроблені вуглецеві волокна, які мали об'ємний (масовий) гамма-розподіл за довжинами:

$$\varphi(l) = \frac{\theta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} l^{\alpha-1} \exp(-\theta \cdot l), \quad (1)$$

де  $\theta = 0,002 - 0,04\text{мкм}^{-1}$ ,  $\alpha = 0,5 - 2,5$  – параметри розподілу;

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} \exp(-x) dx \quad \text{— гамма-функція;} \quad (2)$$

$\varphi(l) = 1,3 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}^{-1}$  – щільність ймовірності об'ємного (масового) розподілу за довжинами при  $l = 20 - 3500$  мкм.

Композицію отримували шляхом 5 хвилинного змішування дроблених вуглецевих волокон з порошком матричного матеріалу в дробарці МРП-1 при 7000 об./хв. Внаслідок цього змішування вуглецеві волокна в композиті мали об'ємний (масовий) розподіл за довжинами за гамма-законом зі щільністю ймовірностей  $\varphi(l) = 1,3 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}^{-1}$  при  $l = 20 - 3500$  мкм з

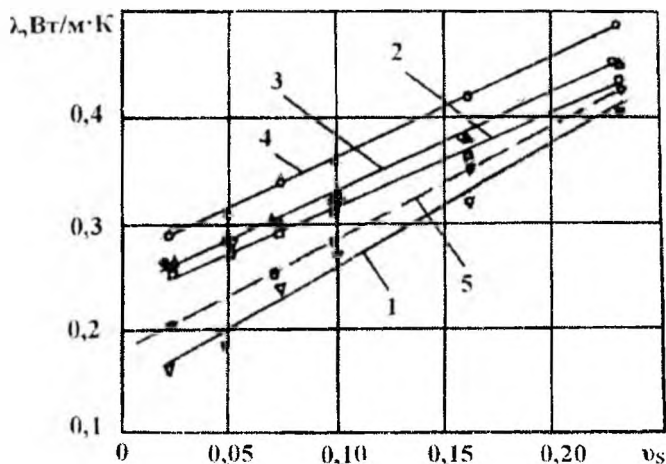


Рис. 1. Відхилення експериментальних даних (1) теплопровідності композиту на основі фторопласту-4 і карбїду титану (фракція 1-2 мкм) від розрахункових даних за рівнянням Нільсена (2), Максвелла-Ейкена, Оделевського (3) і Дульнева (4). Теоретична крива теплопровідності (5),  $\nu_s$  – об'ємна частка наповнювача.

параметрами:  $\theta = 0,005-0,045 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $\alpha = 1,0-2,55$ . Вуглецеві волокна були розподілені статистично в шарах, перпендикулярних напрямку пресування і напрямку теплового потоку при теплофізичних випробуваннях.

Дослідження залежності теплопровідності композиційних матеріалів від температури виконано із застосуванням приладу ИТЛ – 400 в монотонному режимі нагрівання на зразках циліндричної форми діаметром  $15 \pm 0,4$  мм і висотою 3-5 мм в залежності від очікуваного значення теплопровідності. Плоскі поверхні зразків притиралися шліфувальним порошком на контрольній плиті до шорсткості  $R_z = 0,63$ . Число повторних дослідів дорівнювало 5. Вимірювання проводили в діапазоні температур 323 – 473 К згідно стандартної методики.

## II. Результати та їх обговорення

Дані по впливу форми частинок наповнювача фторопласту-4 з низькою теплопровідністю на теплопровідність композиту на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 наведені в табл.2. Композит, який містить фторопласт-4 з волокнуватими частинками, має найбільшу теплопровідність. Найменша теплопровідність відповідає композиту з наповнювачем у лусковій формі частинок. Теоретичний аналіз концентраційних залежностей показав розходження експериментальних і обчислених даних, які проведені за моделями Максвелла-Ейкена Дульнева, Оделевського, і Нільсена [3-5].

Формула Максвелла-Ейкена описує найпростішу модель для ізольованих сферичних включень, які рівномірно розподілені в ізотропно – неперервному середовищі [3-5]:

$$\lambda_{КМ(Н)} = \lambda_{П} \frac{2\lambda_{П} + \lambda_{Н} + 2\varphi_{П}(\lambda_{П} - \lambda_{Н})}{2\lambda_{П} + \lambda_{Н} - \varphi_{Н}(\lambda_{Н} - \lambda_{П})} \quad (3)$$

де  $\lambda_{КМ(Н)}$  – теплопровідність наповненого композиційного матеріалу;  $\lambda_{П}$  – теплопровідність полімеру;  $\lambda_{Н}$  – теплопровідність наповнювача.

Такий же результат дає аналіз концентраційної залежності теплопровідності композитів в рамках теорії загальної провідності – рівняння Дульнева [3]:

$$\frac{1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda_{П}}{\lambda_{Н}}\right)\right] \varphi_{П}^{\frac{1}{2}} (1 - \varphi_{П}^{\frac{1}{2}})}{1 - \varphi_{П}^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{П}}{\lambda_{Н}}\right)\right] \varphi_{П}^{\frac{1}{2}} (1 - \varphi_{П}^{\frac{1}{2}})} \leq \frac{\lambda_{КМ}}{\lambda_{П}} \leq \frac{\lambda_{П} + \left[1 - \left(\frac{\lambda_{П}}{\lambda_{Н}}\right)\right] \varphi_{П}^{\frac{2}{3}}}{\lambda_{П} + \left[1 - \left(\frac{\lambda_{П}}{\lambda_{Н}}\right)\right] \varphi_{П}^{\frac{1}{3}} (1 - \varphi_{П}^{\frac{1}{3}})} \quad (4)$$

де  $\varphi_{Н}$  – об'ємна частка наповнювача;  $\varphi_{П}$  – об'ємна частка полімеру.

Модель Оделевського застосовується для розрахунку коефіцієнтів теплопровідності композиційних матеріалів, які наповнені сферичними частинками (при  $\varphi_{Н} < 0,3$ ) [5]:

$$\frac{\lambda_{КМ}}{\lambda_{П}} = 1 - \frac{\varphi_{Н}}{1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda_{П}}{\lambda_{Н}}\right)\right]^{-1} - \varphi_{Н}} \quad (5)$$

Недолік всіх перелічених підходів полягає в тому, що вони не враховують вплив ступеня дисперсності частинок наповнювача, тобто вплив розмірів і питомої поверхні.

Можна очікувати, що найбільш точною є модель Нільсена [4], яка є модифікацією моделі Кернера для обрахунку модуля пружності композитів. Нільсен використав свою модель для опису модуля пружності, в'язкості, а також і теплопровідності композиту, так як об'ємна властивість теплопровідності аналогічна в'язкості і модулю пружності відносно впливу

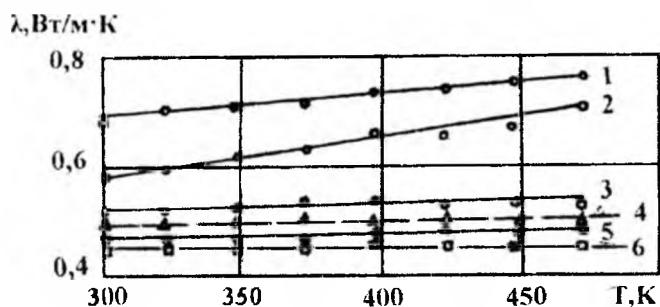


Рис. 2. Залежність теплопровідності від температури для композитів на основі фторопласту-4, наповнювача на основі 15 об.%. коксу та 7об.%. вуглецевих волокон.

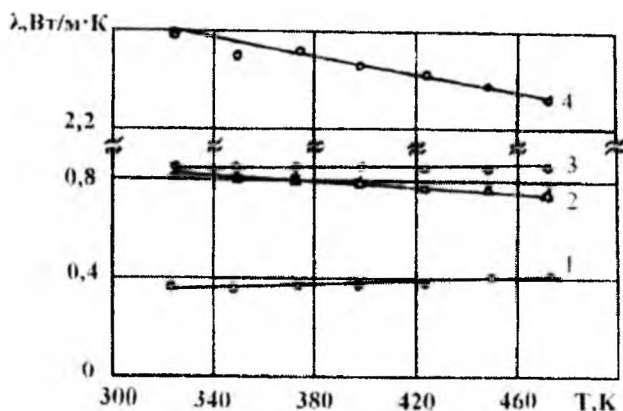


Рис. 3. Залежність теплопровідності від температури композитів на основі фторопласту-4 з наповнювачами: 1 – 25,4об.%. низькомодульного вуглецевого волокна на основі ГЦ, термооброблене при 1120 К ( $E_B = 37$  ГПа,  $\sigma_B = 0,54$  ГПа); 2 – 28об.%. порошку нікелю + 2,6об.%. порошку дисульфіді молібдену; 3 – 20 об.%. порошку графіту АРВ; 4 – 28об.%. порошку міді + 2,6 об.%. порошку дисульфіді молібдену.

наповнювачів на зміну цих властивостей матеріалу.

Математично це можна записати так:

$$\frac{\lambda_{KM}}{\lambda_P} = \frac{\mu_{KM}}{\mu_P} = \frac{E_{KM}}{E_P} = \frac{G_{KM}}{G_P}, \quad (6)$$

де  $\mu_P$ ,  $\mu_{KM}$  – в'язкість полімеру та композиційного матеріалу відповідно;  $E_{KM}$  – модуль пружності композиційного матеріалу;  $E_P$  – модуль пружності полімеру;  $G_{KM}$  – модуль зсуву композиційного матеріалу;  $G_P$  – модуль зсуву полімеру;

Рівняння Нільсена для визначення коефіцієнта теплопровідності композиційних матеріалів має вигляд:

$$\frac{\lambda_{KM}}{\lambda_P} = \frac{1 + A \cdot B \cdot \varphi_P}{1 - A \cdot \psi \cdot \varphi_H}, \quad (7)$$

$$\text{де } B = \frac{\lambda_H - 1}{\lambda_P};$$

$$\frac{\lambda_H}{\lambda_P} + A$$

$A$  – функція геометрії частинок наповнювача;

$$\psi = 1 + \left( \frac{1 - \varphi_P}{\varphi_P^2} \right) \cdot \varphi_H,$$

де  $\varphi_H$ ,  $\varphi_P$  – об'ємна частка наповнювача і полімеру відповідно.

Таким чином, найбільш наближеними до реальної структури твердих тіл – полімерних композитів є емпіричні моделі (3), (4), (5) і (7).

Відхилення експериментальних даних від розрахункових за моделями Максвелла–Ейкена, Оделевського, Нільсена, Дульнева становить відповідно 20,6 – 37,2%, 17,6 – 34,9%, 15 – 34,9%, 17,6 – 34,9%.

Дослідження впливу розмірів і вмісту наповнювача у вигляді сферичних частинок з вузькою фракцією по розмірах та відносно високою теплопровідністю на теплопровідність композиту фторопласту-4 показали, що з підвищенням вмісту частинок карбіду титану теплопровідність композиту збільшується і тим сильніше, чим менший розмір частинок (рис.1).

Цю закономірність можна пояснити тим, що при введенні в склад фторопласту-4 мілких частинок карбіду титану (фракція 1-2 мкм) збільшується частка перешикованого полімеру, а напруга стискання, яка виникає на поверхні частинок, призводить до зростання теплопровідності і тим більше, чим більший вміст наповнювача. Цей ефект знижується із збільшенням розмірів частинок карбіду титану.

Теплопровідність композиційних матеріалів на основі фторопласту-4 при 298К

Наповнювач	Об'ємний вміст наповнювача, %	Розрахункова теплопровідність (Вт/м·К) за рівняннями				Експериментальна теплопровідність, (Вт/м·К)
		Максвелла-Ейкена	Оделевського	Нільсена	Дульнева	
Графіт С-1	20,0	0,42	0,41	0,83	0,46	0,82
Карбід титану /d = 1-2 мкм/	23,0	0,45	0,45	0,44	0,49	0,40
Вуглецеві волокна (ГЦ; LM; $E_B = 37$ ГПа, $\sigma_B = 0,54$ ГПа $T_K = 1120$ К)	26,7	0,49	0,49	0,45	0,49	0,39
Кокс + вуглецеві волокна (ГЦ; LM; $E_B = 37$ ГПа, $\sigma_B = 0,54$ ГПа $T_K = 1120$ К)	15,0 + 7,0	0,35	0,35	0,37	0,35	0,47
Кокс + вуглецеві волокна (ГЦ; LM; $E_B = 36$ ГПа, $\sigma_B = 0,49$ ГПа $T_K = 2670$ К)	15,0 + 7,0	0,37	0,38	0,37	0,38	0,69
Кокс + вуглецеві волокна (ПАН; НМ; $E_B = 270$ ГПа, $\sigma_B = 2,2$ ГПа $T_K = 2670$ К)	15,0 + 7,0	0,63	0,29	0,36	0,39	0,49
Порошок міді + дисульфід молібдену	28,0 + 2,6	0,52	0,52	0,64	0,56	2,6
Порошок нікелю + дисульфід молібдену	28,0 + 2,6	0,52	0,52	0,63	0,56	0,82

Відхилення експериментальних даних від емпіричних значень теплопровідності знаходиться в межах 43,8–81,3% для низьконаповнених і 10–22,5% для високонаповнених композитів (рис.1). Таким чином, розрахункові формули придатні для розрахунку теплопровідності полімерних композитів із сферичними частинками наповнювачів з вузькою фракцією при концентрації наповнювача більше як 25% за об'ємом.

Дані про вплив типу і властивостей вуглецевих волокон (7об.%) з широким розподілом довжин та 15об.% коксу на теплопровідність композиту фторопласт-4 наведені на рис. 2. Криві на рис. 2 відповідають вуглецевим волокнам: 1 – низькомодульне вуглецеве волокно на основі ГЦ, термооброблене при 2670 К ( $E_B = 36$  ГПа,  $\sigma_B = 0,49$  ГПа); 2 – низькомодульне низькоміцне вуглецеве волокно на основі ПАН, термооброблене при 2270 К ( $E_B = 25$  ГПа,  $\sigma_B = 0,2$  ГПа); 3 – низькомодульне вуглецеве волокно на основі ГЦ, термооброблене при 2270 К ( $E_B = 35$  ГПа,  $\sigma_B = 0,48$  ГПа); 4 – високомодульне

високоміцне вуглецеве волокно на основі ПАН, термооброблене при 2670 К ( $E_B = 270$  ГПа,  $\sigma_B = 2,2$  ГПа); 5 – низькомодульне вуглецеве волокно на основі ГЦ, термооброблене при 1120 К ( $E_B = 37$  ГПа,  $\sigma_B = 0,54$  ГПа); 6 – низькомодульне середньої міцності вуглецеве волокно на основі ГЦ, термооброблене при 1770 К ( $E_B = 80$  ГПа,  $\sigma_B = 1,2$  ГПа).

Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновки, що домінуючими факторами по вкладу в теплопровідність композиту є кінцева температура термообробки, середня довжина і розподіл за довжинами вуглецевих волокон. Так, порівняння теплопровідності композитів з низькомодульними вуглецевими волокнами на основі ГЦ (рис.2, криві 1, 3, 5) показало, що теплопровідність зростає із зростанням температури термообробки волокон.

Спроможність цього типу волокон до руйнування при технологічній обробці та розподіл по довжинах приблизно однаковий. Для вуглецевих волокон з температурою термообробки вище 2270К (температури

графітації) теплопровідність композиту різко зростає. Така роль графітової високоорієнтовної структури наповнювача підтверджується даними табл. 3 відносно теплопровідності композиту на основі фторопласту-4 та 20 об.% графіту.

Разом з тим, порівняння теплопровідності композитів з вуглецевими волокнами на основі ПАН з однаковими температурами термообробки (рис.2, криві 2, 4) явно показують домінуючу роль розміру частинок наповнювача і їх розподілу за довжинами. Низькомодульні низькоміцні графітовані волокна з повстини легко руйнуються в дробарці МРП-1 при 7000 об./хв. і мають вузький розподіл за довжинами і відповідну зміну теплопровідності від температури (рис. 2, крива 2).

Високомодульні високоміцні вуглецеві волокна руйнуються важче і при однаковому часі дроблення мали широкий розподіл за довжинами (рис. 2, крива 4). Незважаючи на високоорієнтовану графітоподібну структуру такі волокна надають композитам відносно низьку теплопровідність.

Підтвердженням такого висновку є результати дослідження теплопровідності композиту з низькомодульними середньої міцності вуглецевими волокнами на основі ГЦ, термооброблених при 1770К (рис. 2, крива 6). Структура таких волокон є низькографітована з довгими міцними стрічками, яка руйнується в дробарці найтяжче із всіх досліджених вуглецевих волокон. Після технологічних операцій такі волокна мали найбільшу середню довжину та найширший розподіл за довжинами і, відповідно, композит мав найменшу теплопровідність.

Введення наповнювачів сферичної форми в композити з вуглецевими волокнами широкого розподілу за довжинами приводить до збільшення теплопровідності композитів (табл.3). Значне збільшення теплопровідності композитів спостерігається при введенні металевих порошків (рис.3). Це пояснюється тим, що при вмісті наповнювача 20 об. % і більше зростає роль поверхневих явищ на границі розділу фаз, так як більша частина речовини переходить у стан граничних поверхневих шарів. Взаємодія частинок металу з макромолекулами полімеру заважає глобулоутворенню, а також змінює рухомість міжвузлових сегментів у граничному шарі. Цей процес пов'язаний з утворенням агрегатів макромолекул полімеру, що у свою чергу є наслідком утворення донорно-акцепторних зв'язків між металевими частинками та макромолекулами полімеру на границі розділу фаз. При цьому полегшуються енергообмінні процеси і відповідно збільшується теплопровідність композиту.

Відзначимо, що для матеріалів з низькою теплопровідною матрицею та високим теплопровідним наповнювачем при концентраціях порошку металу 25–28об.% коефіцієнт теплопровідності композиту із збільшенням температури знижується. Це явище пов'язано із домінуючою роллю частинок металу у високонаповнених полімерних системах, для яких поведінка композиту в теплопровідності повністю повторює залежність теплопровідності металу від температури.

Аналіз результатів розрахунків теплопровідності композитів з різними наповнювачами за формулами Максвелла-Ейкена, Оделевського, Нільсена і Дульнева призводить до висновків, що найменше відхилення розрахункової теплопровідності від експериментальної спостерігається для формули Нільсена (табл. 3). Але чим більша теплопровідність композиту наповнювачів, тим більше відхилення емпіричних даних від експериментальних. Сталі рівняння Нільсена враховують відношення коефіцієнтів теплопровідності наповнювачів і полімеру, форму частинок наповнювача, коефіцієнт Пуассона полімерної матриці. Разом з тим, залежність теплопровідності композиту від температури термообробки вуглецевих волокон і параметрів розподілу частинок і волокон за розмірами рівняння Нільсена не враховує.

## Висновки

Таким чином, за результатами дослідження встановлений взаємозв'язок між розміром частинок наповнювача, їх формою та розподілом за розмірами, концентрацією, ступенем графітації, теплопровідністю частинок наповнювача та теплопровідністю композиту на основі політетрафторетилену і ароматичного поліаміду. Теплопровідність полімерних композитів в першу чергу визначається середнім розміром сферичних та волокнуватих частинок наповнювачів та їх розподілом за розмірами. Чим менший середній розмір та вужчий розподіл за розмірами частинок наповнювача, тим більша теплопровідність композиту і тим більша залежність її від вмісту наповнювача. При рівних інших параметрах теплопровідність композиту визначається теплопровідністю наповнювачів, а для вуглецевих волокон – ще й ступенем графітації. Для композитів з наповнювачами низької теплопровідності волокниста форма наповнювача дає найбільшу теплопровідність композиту.

Аналіз експериментальних та розрахункових даних показав, що для визначення коефіцієнта теплопровідності досліджених композитів при об'ємній концентрації наповнювача менше 28%, перевагу слід віддати моделі Нільсена.

## Література

1. Сіренко Г., Будник А., Шийчук О. Модель абразивостійкого композиційного матеріалу на основі полімерної матриці, наповненої сферичними та еліпсоїдними частинками // Вісник Прикарп. університету ім. Василя Стефаника. Сер. Хімія. - 2002. – вип. III. - С.55-83.
2. Сіренко Г.О., Шийчук О.В. Математичний опис процесу дроблення вуглецевих волокон для наповнення полімерів // Композиційні полімерні матеріали. - 2003. – т.25, № I. - С.49-53.
3. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. - 264с.
4. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия, 1978.
5. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Техн. физики. - 1951. – т.21, № 6. - С.667-685.

**Базюк Л.В.** – асистент кафедри теоретичної і прикладної хімії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Свідерський В.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри зносостійкості та надійності машин Хмельницького національного університету.