

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-48-56>

УДК 678.01:536

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Пушкаръов Д.В., Слєпцов О.О., Сова Н.В., Савченко Б.М.

ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR CREATING THERMAL CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES

Pushkarov D.V., Slietsov A.O., Sova N.V., Savchenko B.M.

У роботі досліджено вплив складу полімерного композиту та параметрів його адитивного виробництва, на значення його теплопровідності. У якості полімерної матриці для досліджень було використано типовий для адитивного виробництва, екологічний та доступний полімерний матеріал - полілактид. До складу композиту вводили, різні за природою, теплопровідні наповнювачі — порошкоподібну мідь і графіт, у різних масових співвідношеннях, з метою підвищення теплопровідності та забезпечення можливості керування тепловими характеристиками матеріалу. Композитні матеріали було створені шляхом змішування складових у розплаві на двошнековому екструдері. Адитивне виробництво дослідних зразків здійснювалось за технологією виробництва наплавленням філаменту. Матеріал для адитивного виробництва у вигляді філаменту отримували з композитного матеріалу шляхом екструзії. Зразки друкували з орієнтацією шарів паралельно та перпендикулярно до напрямку теплового потоку, що дозволило оцінити вплив просторового розташування струменів матеріалу на анізотропію теплопровідності.

Композитні матеріали на основі полілактиду, отримані класичним методом лиття під тиском та методом адитивного виробництва, показали близькі значення теплопровідності. Використання мідних і графітових наповнювачів дозволило суттєво підвищити теплопровідність матеріалу—у понад два рази. Орієнтація шарів та розташування струменів матеріалу щодо напрямку теплового потоку має значний вплив на його теплопровідність. Встановлено, що графітовий наповнювач є більш ефективним у порівнянні з мідним, оскільки забезпечує більш значний приріст теплопровідності навіть за меншого масового вмісту. Крім того, вплив орієнтації шарів і наповнювача більш виражений для

графітових наповнювачів. Такий підхід може дозволити розробляти легкі, ефективні з точки зору тепловідведення полімерні елементи корпусів для електроніки, які мають як функціональне, так і конструкційне значення. Анізотропія теплопровідності, контрольована за допомогою параметрів друку, відкриває нові можливості для інженерного проектування складних виробів з оптимізованими теплофізичними характеристиками.

Ключові слова: полілактид, полімерні композитні матеріали, теплопровідні композити, адитивні технології, графіт, мідь.

Вступ. Зі стрімким розвитком мікроелектронних технологій сучасне електронне обладнання стає все більш і більш складним. Робота сучасних комп'ютерів виділяє велику кількість тепла за рахунок їх компактних розмірів, покращеної швидкодії та підвищеного споживання енергії. В даний час всі зусилля спрямовані на покращення процесу охолодження електронних компонентів з високим тепловим потоком[1].

Історично традиційним матеріалом для виготовлення корпусних деталей електронної техніки є метали, найбільш часто залізо та алюміній. Сучасна техніка в зростаючій мірі застосовує полімерні матеріали, що вирізняються високою технологічністю, доступністю складних форм та що особливо актуально – низькою густиною[2-4]. Маючи великий перелік переваг полімерні матеріали володіють рядом недоліків, зокрема горючість, дуже низька теплопровідність та низька

стійкість до ультрафіолетового випромінювання [5, 6]. Теплопровідність полімерних матеріалів може бути збільшена шляхом створення композитних матеріалів з застосуванням дисперсних наповнювачів котрі мають високе значення теплопровідності [7]. Даний підхід застосовують в промислових масштабах для виробництва деталей корпусу джерел світла на основі випромінюючих світло діодів. Найбільш масовою технологією переробки теплопровідних композитів є лиття під тиском та екструзія повздожних виробів.

В сучасних умовах в Україні та світі значного промислового значення набуває технологія адитивного виробництва виробів. Особливу роль вона відіграє в Україні під час війни певним чином компенсуючи колапс традиційних способів виробництва. Найбільш поширеною технологією адитивного виробництва є виробництво наплавленням філаменту (FFF), що використовує полімерну сировину у вигляді філаменту, котра розплавляється та подається у зону побудови за допомогою програмно керованої системи просторового переміщення [8, 9]. Адаптація теплопровідних композитів для застосування у адитивному виробництві має високе практичне значення в умовах України, так як виробництво деталей корпусів електронних пристроїв є досить поширеним застосуванням, зокрема для галузі безпілотних систем та електроніки. Застосування теплопровідних композитів для адитивного виробництва передбачає можливість створення витратних матеріалів у вигляді філаменту або мононитки, котра володіє комплексом механічних властивостей необхідних для самого виробництва (намотування) а також для успішного використання у для пристроїв, зокрема ламкість, різновтовщинність та ряд інших. Традиційними наповнювачами для теплопровідних композитів є нітрид бору та дисперсні порошкові метали такі як мідь та алюміній, вони вирізняються високою вартістю та що головне є важко доступними на Україні.

Найбільш важливими теплофізичними характеристиками корпусних деталей, як і будь-яких матеріалів є теплопровідність, температуропровідність, теплоємність, коефіцієнт теплового лінійного (або об'ємного) розширення. Температуропровідність залежить від питомої теплоємності та густини матеріалу. Знання теплофізичних характеристик необхідне для розробки корпусів теплообмінної апаратури, електричних двигунів,

електроприладів, обмоток електричних машин, елементів радіо - і електронної апаратури. Теплопровідність шару матеріалу визначає чутливість термоіндикаторних покриттів, а коефіцієнт теплового лінійного розширення - значення термічної напруги в покриттях [10].

Теплопровідність більшості полімерних матеріалів у 100 - 400 разів менша за теплопровідність сталі і майже у 1000 разів менша за теплопровідність міді. Це обумовлює погану теплопередачу від забарвлених нагрітих виробів і ускладнює їхнє швидке нагрівання. Характерно, що тепло- та температуропровідність виробів на основі кристалічних полімерів вища, ніж виробів, виготовлених з аморфних полімерів. Питома теплоємність полімерних плівок за нормальних умов приблизно вдвічі вище питомої теплоємності скла і в 3-5 разів вище теплоємності металів [11].

Теплофізичні властивості полімерних матеріалів змінюються зі зміною температури, при цьому температурна залежність у разі кристалічних полімерів має більш складний характер, ніж аморфних [12].

Теплофізичні властивості полімерних матеріалів суттєво змінюються при наповненні їх [13]. У мінеральних пігментів та наповнювачів тепло- і температуропровідність на 1-2 порядки вища, ніж у полімерних матеріалів. Так, для оксиду цинку теплопровідність складає 19,5 Вт/(м·К), а для діоксиду титану - 9,86 Вт/(м·К). Особливо помітно покращують тепло- та температуропровідність плівок металеві порошки (цинковий пил, алюмінієва пудра, бронза, залізна слюда), а також оксиди металів з високими значеннями теплопровідності. Зниження теплоізолюючих властивостей полімерних матеріалів може бути досягнуто зменшенням товщини покриттів. Навпаки, для підвищення теплоізоляції (створення "теплых" покриттів) застосовують як наповнювачі мікроазбест, деревне борошно, скляні та пластмасові мікросфери (синтактові піни), кероген сланцю, лігнін та ін. [14].

Автори [15] оцінювали можливість створення високотеплопровідних композитів на основі полівінілбутиралу, в який вводили як наповнювач графен в кількості 30% мас. При цьому спостерігалось зростання теплопровідності композиту практично в 20 разів. Створені композити придатні для використання при створенні корпусів електронних пристроїв і забезпечення

відведення надлишкового тепла, а також для елементів гнучких електронних пристроїв [16].

В роботі [17] було досліджено зміну теплопровідності сумішей поліетилен /поліпропілен при додаванні 10% мас нітриду бору. Введення наповнювача дозволяє покращити теплопровідність більше ніж на 57%.

Індустріалізація та четверта промислова революція зумовили стрімке проникнення адитивних технологій у всі сфери промисловості. Швидкість, відносна простота виготовлення надскладних форм та об'єктів забезпечують адитивним технологіям широке застосування у сфері електроніки, електротехніки при створенні корпусів, та окремих елементів пристроїв [18]. Створення полімерних композитів придатних до адитивного виробництва з покращеними теплопровідними властивостями відкриває нові можливості в організації відведення надлишкового тепла в електропристроях.

В роботі [19] досліджували можливість створення високотеплопровідних композитів на основі поліаміду 12, наповненого графеном та вуглецевими нанотрубками. Введення 15% мас графену та 1% мас нанотрубок зумовлює зростання теплопровідності композиту на 160%. Крім того, створений композит придатний до переробки методом адитивного виробництва і характеризується покращеною здатністю до формування виробів методом наплавлення розплаву полімеру. Також комбінація параметрів адитивного виробництва забезпечує орієнтацію частинок наповнювача в полімерному шарі, що має значний вплив на значення його теплопровідності.

Постановка завдання. Теплопровідні полімерні композити є перспективними матеріалами, що можуть мати широке застосування, проте існує низка проблем, що перешкоджають цьому. Звичайне збільшення вмісту, хаотично розподіленого, теплопровідного наповнювача може покращити теплопровідність композитів, але не дозволяє точно контролювати цей параметр у визначеному напрямку. Одним із шляхів подолання виниклих проблем може стати використання адитивних технологій виробництва теплопровідних полімерних матеріалів. Теплопровідні композити для 3д друку є перспективним напрямом, який потребує подальших досліджень. Використання різних типів наповнювачів, регулювання параметрів адитивного виготовлення це ключові стратегії, що дозволяють більш точно

регулювати теплопровідність композитів у різних напрямках.

Метою роботи є дослідження впливу складу полімерного композиту та параметрів його адитивного виробництва на значення його теплопровідності.

Матеріали та методи. Для створення композитів з підвищеною теплопровідністю було обрано полімерну матрицю полілактид марки Total Corbion Luminy LX175, що масово використовується для адитивного виробництва. Композитні наповнювачі, такі як порошкоподібна мідь та графіт (марки C0) обрано завдяки їх широкій доступності в Україні.

На початковому етапі дослідження було створена серія композитних матеріалів основи полілактиду, міді та графіту. Склад композицій наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Склад досліджених композицій

Компонент	Вміст, % мас.				
	ПЛА1	ПЛА2	ПЛА3	ПЛА4	ПЛА5
Полілактид	100	50	40	80	70
Мідь	-	50	60	-	-
Графіт	-	-	-	20	30

Гранульований полілактид подрібнювали на ножовій дробарці оснащений ситом з діаметром отворів 2 мм до порошкоподібного стану. Порошковий полілактид змішували з наповнювачами на планетарному змішувачі та піддавали сушінню напротязі 6 годин при температурі 45°C в сушарній шафі. Суміші переробляли на двошнековому екструдері в температурному діапазоні 190-210°C та одержували гранульований композитний матеріал. Гранульований композитний матеріал сушили при температурі 45°C, після чого на лабораторній литевій машині гранульовані композити перетворювали у циліндричні заготовки діаметром 40 мм та товщиною 4 мм. Заготовки обробляли на токарному станку до дослідних зрізів діаметром 15 мм та товщиною 1 мм.

Гранульовані композити були застосовані для виготовлення мононитки шляхом екструзії на лабораторній лінії на основі одношнекового екструдера. В дослідженні представлені композиції котрі були успішно перероблені у мононитку та адитивним виробництвом.

Стандартні зразки для випробування у вигляді таблетки діаметром 15 мм і висотою 1мм виготовляли методом адитивного виробництва з

використанням 3д принтеру Bambu Lab A1 mini. Вихідні композити у вигляді мононитки попередньо підлягали сушінню при температурі 45°C. Модель циліндричної форми перетворювалася у завдання для адитивного виробництва за допомогою застосунку Bambulab Studio 1.0.5 з основними параметрами перетворення наведеними у табл. 2.

Таблиця 2

Параметри перетворення моделі при адитивному виробництві дослідних зразків

Параметр	Значення
Висота шару, мм	0,20
Ширина шару, мм	0,42
Заповнення, %	100
Лінійна швидкість друку заповнення, мм/с	100
Кількість периметрів оболонки, шт.	1
Швидкість друку оболонки, мм/с	50
Температура друку, °C	220
Температура платформи, °C	60
Об’ємна продуктивність друку, мм ³ /с	10
Охолодження виробу, %	40
Діаметр сопла, мм	0,40

Зразок після адитивного виробництва підлягав механічній обробці на токарному верстаті до зразка діаметром 15мм та товщиною 1 мм. Параметри заповнення було підібрані для кожного складу композиту індивідуально з метою забезпечення монолітності зразка, котру контролювали за значенням густоти. Стандартні параметри заповнення не є придатними для композитів розглянутого складу так як вони не забезпечують монолітної структури.

Густину зразків визначали методом гідростатичного зважування згідно ISO 1183-1:2019.

Теплопровідність дослідних зразків визначали методом динамічного калориметра в режимі монотонного розігрівання з використанням приладу - вимірювача теплопровідності ИТ-λ-400 (рис.1) [20]. Вимірювач калібрували за допомогою вимірювання теплопровідності еталонних зразків кварцу та міді.

Теплопровідність матеріалу, що досліджувався визначали за формулою:

$$\lambda = h/R_0, \tag{1}$$

де λ – теплопровідність, Вт/(м·К); h – товщина зразка, м; R_0 - тепловий опір зразка, який визначається за формулою:

$$R_0 = \frac{n_0 \cdot F(1+\sigma_0)}{n_T \cdot K_T} - R_K, \tag{2}$$

де n_0, n_T – вимірюваний в процесі дослідження перепад температур відповідно на зразку і тепломірі; $F = \pi d^2/4$ – площа перерізу зразка, м²; σ_0 – поправка, що враховує теплоємність зразка; K_T – теплова провідність пластини; R_K – поправка до термічного опору контакту (величини K_T і R_K для даної установки є сталими із градусування дослідів).

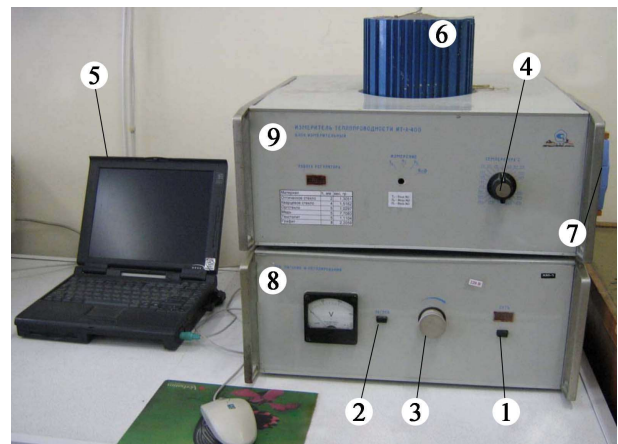


Рис. 1. Загальний вигляд установки для визначення теплопровідності твердих матеріалів.

- 1 – кнопка «включення в мережу»; 2 – кнопка «нагрів»; 3 – регулятор напруги; 4 – установлення температурного рівня виміру; 5 – ноутбук; 6 – комірка виміру; 7 - модуль збору даних; 8 – блок живлення; 9 – вимірювальний блок

Поправка σ_0 визначається за формулою:

$$\sigma_0(t) = \frac{C_0(t)}{2 \cdot [C_0(t) + C_c(t)]}, \tag{3}$$

де $C_0(t), C_c(t)$ – питома теплоємність відповідно зразка і мідного стержня, Дж/К,

$$C_0(t) = C'_a(t) m_0, \tag{4}$$

де $C'_a(t)$ - питома теплоємність зразка, що визначається за довідковими даними; m_0 – маса зразка.

Величина $C'_c(t)$ визначається за таблицею, що знаходиться на стенді установки.

Таким чином, для кожного значення температури стержня t_c під час проведення дослідів розраховується повна теплоємність зразка C_0 , поправку σ_0 , тепловий опір зразка R_0 і теплопровідність зразка λ . Одержане значення теплопровідності відповідає середній температурі зразка

$$t = t_c + 0,5A_t \cdot n_0 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де A_t °С/мкВ – чутливість термопари, що визначається за тарувальною таблицею; n_0 — відлік за термоЕРС (електрорушійною силою термопари) у мкВ.

Похибка вимірювання 4-5%.

Результати дослідження. Результати вимірювання теплопровідності та теплоємності литевих зразків в температурному діапазоні від 30 до 60 °С наведено у таблиці 3

Таблиця 3

Теплофізичні характеристики зразків одержаних литтям під тиском

Властивості	Значення					
	ПЛА 1	ПЛА 2	ПЛА 3	ПЛА 4	ПЛА 5	
Густина, кг/дм ³	1,23	2,21	2,54	1,31	1,34	
Теплоємність, Дж/(г·К), при температурі, °С	30	1,395	1,106	0,965	1,326	1,305
	40	1,404	1,094	0,954	1,392	1,374
	50	1,414	1,083	0,942	1,457	1,442
	60	1,433	1,066	0,933	1,508	1,484
Теплопровідність, Вт/(м·К), при температурі, °С	30	0,228	0,453	0,527	0,507	0,563
	40	0,232	0,470	0,553	0,506	0,561
	50	0,236	0,490	0,579	0,509	0,554
	60	0,240	0,510	0,605	0,509	0,553

Теплопровідність зразків, що містять дисперсну мідь та графіт є значно вищою за вихідний полімер. Порівнюючи вплив вмісту наповнювача слід зазначити вищу ефективність графітового наповнювача. Композиція №5, що містить 30 % мас. графітового наповнювача має вищу теплопровідність за композицію, що містить 60 % мас. мідного порошку. Одержаний результат ймовірно пов'язаний з різницею у об'ємному наповненні та більш ефективному утворенні перколяційних ланцюгів графітовим наповнювачем. Для композиції ПЛА5 з графітовим наповнювачем спостерігається зниження теплопровідності зі зростанням температури, що не спостерігається для інших композицій, для композиції ПЛА5 з меншим вмістом графіту зростання теплопровідності з ростом температури є незначним. Можливим поясненням такої поведінки є вплив термічного розширення графітового наповнювача або особливості його теплофізичних властивостей.

Подальші дослідження здійснювалися на зразках композитів, котрі були створені адитивним виробництвом. Важливою особливістю адитивного виробництва є можливість програмного керування напрямком

розподілу шарів та струменів полімеру відносно деталі, котра відтворюється. Зразки було побудовано з різним розподілом шарів відносно осей взірця для вимірювання – паралельно та перпендикулярно до напрямку теплового потоку (рис. 2).

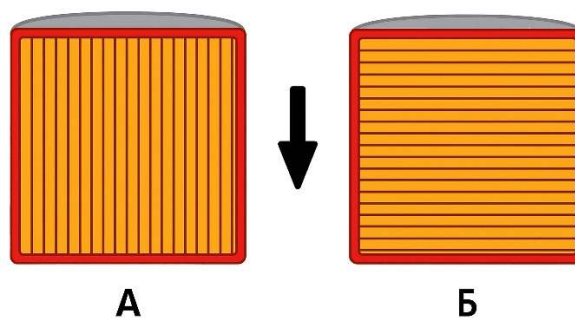


Рис. 2. Спосіб розміщення шарів відносно до напрямку теплового потоку під час адитивного виробництва зразків:

А – перпендикулярно; Б – паралельно.

Стрілкою показано напрямком теплового потоку при вимірюванні

Стандартним способом розміщення шарів для зразка у формі диску є паралельне розташування. Шляхом варіювання положення зразка відносно платформи побудови було одержано зразки з різними розташуванням шарів та струменів матеріалу відносно площини вимірювання теплофізичних характеристик.

Результати вимірювань властивостей зразків з розташуванням шарів перпендикулярно відносно платформи побудови та паралельно руху теплового потоку руху теплового потоку наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Властивості дослідних зразків з розташуванням шарів паралельно до руху теплового потоку (А)

Властивості	Значення					
	ПЛА1	ПЛА2	ПЛА3	ПЛА4	ПЛА5	
Густина, кг/дм ³	1,25	2,27	2,57	1,32	1,36	
Теплоємність, Дж/(г·К) при температурі, °С	30	1,381	1,095	0,955	1,313	1,292
	40	1,390	1,084	0,944	1,378	1,360
	50	1,400	1,072	0,933	1,443	1,428
	60	1,419	1,056	0,924	1,493	1,470
Теплопровідність, Вт/(м·К) при температурі, °С	30	0,227	0,432	0,502	0,532	0,593
	40	0,230	0,436	0,506	0,531	0,591
	50	0,234	0,441	0,512	0,529	0,590
	60	0,238	0,444	0,514	0,528	0,588

Зразки створені адитивним виробництвом з розміщенням шарів паралельно до руху теплового потоку володіють співставними

значенням теплопровідності у порівнянні з литтєвими зразками. Деяко нижче значення спостерігається для ненаповненого зразка та зразків наповнених міддю, що ймовірно пов'язано з впливом дефектів структури. Для зразків наповнених графітовим наповнювачем спостерігається вище значення теплопровідності у порівнянні з литтєвими зразками. Даний ефект ймовірно пов'язаний з орієнтацією часток наповнювача вздовж напрямку здійснення екструзії струменя полімеру, в результаті чого ймовірно відбувається більш ефективна перколяційна контактна теплопередача через частки наповнювача. Для композицій з графітовим наповнювачем спостерігається невелике зниження теплопровідності зі зростанням температури, як і для литтєвих зразків.

Аналіз зразків композиції ПЛА5 за допомогою скануючого електронного мікроскопа показує наявність певної орієнтації частинок наповнювача вздовж напрямку екструзії (рис.3).

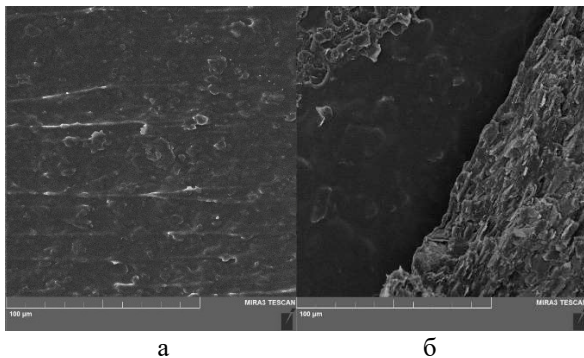


Рис. 3. СЕМ зображення поверхні (а) та зламу (б) композиту ПЛА5 після адитивного виробництва

Результати вимірювань для зразків з розташуванням шарів перпендикулярно до руху теплового потоку в табл. 5.

У порівнянні зі зразками одержаними литтям під тиском для зразків одержаних адитивним виробництвом з розташуванням шарів перпендикулярно до напрямку теплового потоку спостерігається нижче значення теплопровідності для всіх зразків. При цьому для зразків з графітовим наповнювачем спостерігається зростання теплопровідності з ростом температури.

Ймовірним поясненням зниження теплопровідності всіх розглянутих зразків є негативний вплив інтерфейсів між струменями матеріалу у шарах та вагомий вплив орієнтації часток на значення показника.

Таблиця 5

Теплофізичні характеристики дослідних зразків з розташуванням шарів перпендикулярно до руху теплового потоку (Б)

Властивості	Значення				
	ПЛА 1	ПЛА 2	ПЛА 3	ПЛА 4	ПЛА 5
Густина, кг/дм ³	1,21	2,20	2,52	1,28	1,32
Теплоємність, Дж/(г·К) при температурі, °С	30	1,409	1,117	0,975	1,339
	40	1,418	1,105	0,963	1,405
	50	1,428	1,094	0,952	1,472
	60	1,447	1,077	0,942	1,523
Теплопровідність, Вт/(м·К) при температурі, °С	30	0,205	0,405	0,500	0,501
	40	0,210	0,406	0,525	0,496
	50	0,214	0,435	0,550	0,489
	60	0,221	0,436	0,574	0,485

Висновки. Зразки композитних матеріалів на основі полілактиду одержані класичним способом лиття під тиском та адитивним виробництвом володіють співставними властивостями теплопровідності. Наповнення мідним та графітовим наповнювачем призводить до значного збільшення теплопровідності, до понад 2 рази. Розташування струменів та шарів розподілу матеріалу вздовж та поперек руху теплового потоку у зразку призводить до помітного впливу на теплопровідність. Графітовий наповнювач у полілактиді є більш ефективним за мідний та збільшує теплопровідність більш ефективно при меншому масовому вмісті. Вплив орієнтації шарів спостерігається для графітового наповнювача значно помітніше. Композитні матеріали з теплопровідними наповнювачами можуть бути ефективно використані в адитивному виробництві деталей, котрі вимагають підвищеної теплопровідності та можуть успішно замінити вироби виготовлені литтям під тиском. Орієнтація шарів та струменем матеріалу у поєднанні з шаруватим наповнювачем здатна збільшувати теплопровідність матеріалу, що може бути корисно використано під час проектування виробів. Виміряні значення теплопровідності та теплоємності можуть бути використані під час розробки та проектування виробів що потребують підвищеної або точно відомої теплопровідності.

Література

1. Yao, F., You, G., Zeng, S., Lu, D., & Ming, Y. Reaction-tunable diffusion bonding to multilayered Cu mesh/ZK61 Mg foil composites with thermal conductivity and lightweight synergy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023. 139, 10-22.
2. Zhao, H., Zhang, W., Yin, X., Wu, Y., Du, C., Zhao, W., ... & Liu, C. Conductive polyurethane elastomer electrolyte (PUEE) materials for anodic bonding. *RSC advances*, 2020. 10(22), 13267-13276.
3. Olivera, A. F., Chica, E., & Colorado, H. A. Design and manufacturing with 3D printing and life cycle analysis of a recyclable polymer-based H-Darrieus wind turbine. *Engineered Science*, 2024. 31, 1156.
4. Li, T., Wei, H., Zhang, Y., Wan, T., Cui, D., Zhao, S., ... & Cheng, B. Sodium alginate reinforced polyacrylamide/xanthan gum double network ionic hydrogels for stress sensing and self-powered wearable device applications. *Carbohydrate Polymers*, 2023. 309, 120678.
5. Liu, X., Zhang, J., Zheng, C., Xue, J., Huang, T., Yin, Y., ... & Guiver, M. D. Oriented proton-conductive nano-sponge-facilitated polymer electrolyte membranes. *Energy & Environmental Science*, 2020. 13(1), 297-309.
6. Ruan, K., Guo, Y., & Gu, J. Liquid crystalline polyimide films with high intrinsic thermal conductivities and robust toughness. *Macromolecules*, 2021. 54(10), 4934-4944.
7. Kwon, Y. J., Kim, Y., Jeon, Y. P., Hong, J. Y., Park, H. S., & Lee, J. U. Thermally conducting yet electrically insulating epoxy nanocomposites containing aluminum electrochemically exfoliated graphene hybrid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022. 152, 106675.
8. Ji, J., Chiang, S. W., Liu, M., Liang, X., Li, J., Gan, L., ... & Du, H. Enhanced thermal conductivity of alumina and carbon fibre filled composites by 3-D printing. *Thermochimica acta*, 2020. 690, 178649.
9. Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K., & Deshmukh, S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 50, 2269-2275.
10. Mamunya, Y. P., Davydenko, V. V., Pissis, P., & Lebedev, E. V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *European polymer journal*, 2002. 38(9), 1887-1897.
11. Zhong, C., Yang, Q., & Wang, W. Correlation and prediction of the thermal conductivity of amorphous polymers. *Fluid Phase Equilibria*, 2001. 181(1-2), 195-202.
12. Колупаєв, Б. Б. Математичне моделювання теплопровідності лінійних гнучколанцюгових полімерів. *Наукові нотатки*, 2019. (68), 50-54.
13. Дінжос, Р. В., Лисенков, Е. А., & Фіалко, Н. М. Особливості теплопровідності композитів на основі термопластичних полімерів та частинок алюмінію, 2015. 3(7), 03022-1-03022-5.
14. Burger, N., Laachachi, A., Ferriol, M., Lutz, M., Toniazzi, V., & Ruch, D. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, 2016. 61, 1-28.
15. Huang, X., Lin, Y., & Fang, G. Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells. *Solar Energy*, 2018. 161, 187-193.
16. Wang, D., Ren, S., Chen, J., Li, Y., Wang, Z., Xu, J., ... & Fu, J. Healable, highly thermal conductive, flexible polymer composite with excellent mechanical properties and multiple functionalities. *Chemical Engineering Journal*, 2022. 430, 133163.
17. Jing, X., Li, Y., Zhu, J., Chang, L., Maganti, S., Naik, N., ... & Guo, Z. Improving thermal conductivity of polyethylene/polypropylene by styrene-ethylene-propylene-styrene wrapping hexagonal boron nitride at the phase interface. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022. 5(2), 1090-1099.
18. Behera, A., & Behera, A. Additive Manufacturing Materials. *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science*, 2022. 667-700.
19. Zhang, Z., Gkartzou, E., Jestin, S., Semitekolos, D., Pappas, P. N., Li, X., ... & Dong, H. 3D printing processability of a thermally conductive compound based on carbon nanofiller-modified thermoplastic polyamide 12. *Polymers*, 2022. 14(3), 470.
20. Тепломасообмін: навч. посіб. Ч. 1. / уклад.: Н. М. Гавалешко; Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. – Чернівці: Рута, 2015. – 88 с.

References

1. Yao, F., You, G., Zeng, S., Lu, D., & Ming, Y. Reaction-tunable diffusion bonding to multilayered Cu mesh/ZK61 Mg foil composites with thermal conductivity and lightweight synergy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023. 139, 10-22.
2. Zhao, H., Zhang, W., Yin, X., Wu, Y., Du, C., Zhao, W., ... & Liu, C. Conductive polyurethane elastomer electrolyte (PUEE) materials for anodic bonding. *RSC advances*, 2020. 10(22), 13267-13276.
3. Olivera, A. F., Chica, E., & Colorado, H. A. Design and manufacturing with 3D printing and life cycle analysis of a recyclable polymer-based H-Darrieus wind turbine. *Engineered Science*, 2024. 31, 1156.
4. Li, T., Wei, H., Zhang, Y., Wan, T., Cui, D., Zhao, S., ... & Cheng, B. Sodium alginate reinforced polyacrylamide/xanthan gum double network ionic hydrogels for stress sensing and self-powered wearable device applications. *Carbohydrate Polymers*, 2023. 309, 120678.
5. Liu, X., Zhang, J., Zheng, C., Xue, J., Huang, T., Yin, Y., ... & Guiver, M. D. Oriented proton-conductive nano-sponge-facilitated polymer electrolyte membranes. *Energy & Environmental Science*, 2020. 13(1), 297-309.
6. Ruan, K., Guo, Y., & Gu, J. Liquid crystalline polyimide films with high intrinsic thermal

- conductivities and robust toughness. *Macromolecules*, 2021. 54(10), 4934-4944.
7. Kwon, Y. J., Kim, Y., Jeon, Y. P., Hong, J. Y., Park, H. S., & Lee, J. U. Thermally conducting yet electrically insulating epoxy nanocomposites containing aluminum electrochemically exfoliated graphene hybrid. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022. 152, 106675.
 8. Ji, J., Chiang, S. W., Liu, M., Liang, X., Li, J., Gan, L., ... & Du, H. Enhanced thermal conductivity of alumina and carbon fibre filled composites by 3-D printing. *Thermochimica acta*, 2020. 690, 178649.
 9. Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K., & Deshmukh, S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 50, 2269-2275.
 10. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *Eur Polym J*. 2002. Vol. 38. P. 1887-1897
 11. Zhong C., Yang Q., Wang W. Correlation and prediction of the thermal conductivity of amorphous polymers. *Fluid Phase Equilibria*. 2001. Vol. 181. P.195-202
 12. Kolupaiev B.B. Matematychni modeliuvannia teploprovodnosti liniinykh hnuchkolantsiuhovykh polimeriv. *Mizhvuzivnyi zbirnyk "naukovi notatky" Lutsk*, 2019. (68), 50-54.
 13. Dinzhos, R. V., Lysenkov, E. A., & Fialko, N. M. Osob-lyvosti teploprovodnosti kompozytiv na osnovi termo-plastychnykh polimeriv ta chastynok aljuminiju, 2015. 3(7), 03022-1-03022-5.
 14. Burger, N., Laachachi, A., Ferriol, M., Lutz, M., Toniazzi, V., & Ruch, D. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, 2016. 61, 1-28.
 15. Huang, X., Lin, Y., & Fang, G. Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells. *Solar Energy*, 2018. 161, 187-193.
 16. Wang, D., Ren, S., Chen, J., Li, Y., Wang, Z., Xu, J., ... & Fu, J. Healable, highly thermal conductive, flexible polymer composite with excellent mechanical properties and multiple functionalities. *Chemical Engineering Journal*, 2022. 430, 133163.
 17. Jing, X., Li, Y., Zhu, J., Chang, L., Maganti, S., Naik, N., ... & Guo, Z. Improving thermal conductivity of polyethylene/polypropylene by styrene-ethylene-propylene-styrene wrapping hexagonal boron nitride at the phase interface. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022. 5(2), 1090-1099.
 18. Behera, A., & Behera, A. Additive Manufacturing Materials. *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science*, 2022. 667-700.
 19. Zhang, Z., Gkartzou, E., Jestin, S., Semitekolos, D., Pappas, P. N., Li, X., ... & Dong, H. 3D printing processability of a thermally conductive compound based on carbon nanofiller-modified thermoplastic polyamide 12. *Polymers*, 2022. 14(3), 470.
 20. Teplomasoobmin: navch. posib. Ch. 1. /uklad.: N. M. Ghavaleshko; Cherniv. nac. un-t im. Ju. Fedjkovycha. – Chernivci: Ruta, 2015. – 88 s.
- Pushkarov D.V., Sliptsov A. O., Sova N. V., Savchenko B. M. Additive technologies for creating thermal conductive polymer composites**
- The work investigated the influence of the composition of a polymer composite and its additive manufacturing parameters on the value of its thermal conductivity. As a polymer matrix for the research, a typical additive manufacturing, environmentally friendly and affordable polymer material - polylactide was used. Thermally conductive fillers of different nature - powdered copper and graphite, in different mass ratios, were introduced into the composite to increase thermal conductivity and provide the ability to control the thermal characteristics of the material. Composite materials were created by mixing the components in the melt on a twin-screw extruder. Additive manufacturing of experimental samples was carried out using the filament deposition molding technology. The material for additive manufacturing in the form of a filament was obtained from the composite material by extrusion. The samples were printed with the orientation of the layers parallel and perpendicular to the direction of the heat flow, which made it possible to assess the influence of the spatial arrangement of the material jets on the anisotropy of thermal conductivity.*
- Composite materials based on polylactide, obtained by the classical injection molding method and the additive manufacturing method, showed similar thermal conductivity values. The use of copper and graphite fillers allowed them to significantly increase the thermal conductivity of the material—by more than two times. The orientation of the layers and the location of the material jets relative to the direction of the heat flow have a significant impact on its thermal conductivity. It was found that the graphite filler is more effective compared to the copper one, since it provides a more significant increase in thermal conductivity even at a lower mass content. In addition, the effect of the orientation of the layers and the filler is more pronounced for graphite fillers. This approach may allow the development of lightweight, heat-dissipating polymer elements of housing for electronics, which have both functional and structural significance. The anisotropy of thermal conductivity, controlled by printing parameters, opens new opportunities for engineering design of complex products with optimized thermophysical characteristics.*
- Keywords:** *Keywords: polylactide, polymer composite materials, thermal conductive composites, additive technologies, graphite, copper.*

Пушкаръов Денис Вікторович – аспірант, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, global23412@gmail.com

Слепцов Олександр Олегович – к.т.н., асистент, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, slyepcov.oo@knutd.edu.ua

Сова Надія Володимирівна – д.т.н., професор, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, djanc@ukr.net

Савченко Богдан Михайлович – д.т.н., професор, Київський національний університет технологій та дизайну, факультет хімічних та біофармацевтичних технологій, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, 1079@ukr.net

Стаття подана 07.03.2025.