

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-67>

УДК 678.742.4

ФЕДОРІВ ТАРАС

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0009-0002-4644-3993>

e-mail: tfedoriv04@gmail.com

СЛІПЦОВ ОЛЕКСАНДР

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-0608-1855>

e-mail: slyepcov.oo@knu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Стаття присвячена дослідженню впливу параметрів адитивного виробництва методом пошарового наплавлення розплаву на електричні властивості електропровідного полімерного композиту.

Питомий поверхневий електричний опір визначали чотирьохелектродним методом, густину – методом гідростатичного зважування за ДСТУ ISO 1183. Дослідні зразки виготовляли з допомогою пристрою для адитивного виробництва Bambu Lab A1 mini.

Виміряно значення питомого електричного опору для різних зразків композитів у формі виробів, мононитки та вихідного композиту. Встановлено, що питомий поверхневий електричний опір всіх розглянутих композитів зростає під час послідовної переробки. Досліджено вплив параметрів адитивного виробництва методом пошарового наплавлення розплаву на електричні властивості електропровідного полімерного композиту на основі термопластичного поліуретану, наповненого технічним вуглецем та вуглецевими нанотрубками. Виявлено, що зразки одержані адитивним виробництвом мають виражену анізотропію значення поверхневого електричного опору виміряного відносно напрямку розташування струменів матеріалу при формуванні шару. Встановлено, що поверхневий електричний опір першого та останнього шару виробу є суттєво відмінними, що ймовірно пов'язано з умовами охолодження при формуванні даних шарів виробу.

Встановлено значну анізотропію поверхневого електричного опору відносно напрямку спрямування потоків матеріалу у шарах. Відпрацьовано технологічні режими адитивного виробництва виробів методом пошарового наплавлення пластику з композиту на основі термопластичного поліуретану наповненого технічним вуглецем та вуглецевими нанотрубками.

Ключові слова: адитивне виробництво, електропровідний полімерний композит, термопластичний поліуретан, електропровідний наповнювач, технічний вуглець, вуглецеві нанотрубки.

TARAS FEDORIV

ALEXANDR SLIPTSOV

Kyiv National University of Technologies and Design

STUDY OF ADDITIVE MANUFACTURING OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES

The article is dedicated to the study of the influence of parameters of additive manufacturing by the method fused filament fabrication on the electrical properties of conductive polymer composite.

The specific surface electrical resistivity was determined by the four-electrode method, and the density was determined by hydrostatic weighing according to ISO 1183. Consumable material in form of filament was created by twin-screw extruder compounding and single screw extrusion process. Prototypes were manufactured using a Bambu-Lab A1 mini additive manufacturing device. Different type carbon base fillers was used in the study – pigment grade carbon black (Kremenchug technical carbon plant N330), conductive grade carbon black (Cabot Vulcan XC72) and industrial grade multi walled carbon nanotubes (Nanocyl NC7000), which was compounded in thermoplastic polyurethane polymer matrix (Laripur 9025).

The resistivity values were measured for different samples in the form of composite, monofilament, and the sample after additive manufacturing. It was found that the specific surface electrical resistivity of all considered composites increases during sequential processing. The influence of the parameters of additive manufacturing by the method of fused filament fabrication on the electrical properties of conductive polymer composite based on thermoplastic polyurethane filled with carbon black and carbon nanotubes was investigated. It has been found that the samples obtained by additive manufacturing have a pronounced anisotropy of the surface electrical resistance value measured relative to the direction of the material jets orientation during layer formation. It has been found that the surface electrical resistance of the first and last layers of the sample are significantly different, which is probably due to the cooling conditions during the formation of these layers of the sample.

A significant anisotropy of the surface electrical resistance relative to the direction of material flow in the layers was found. Significant differences in the resistivity values of the samples in the first and last layers were found. The technological modes of additive manufacturing of products by the method of layer-by-layer surfacing of plastic from a composite based on thermoplastic polyurethane filled with carbon black and carbon nanotubes have been worked out.

Keywords: additive manufacturing, conductive polymer composite, thermoplastic polyurethane, conductive filler, carbon black, carbon nanotubes.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У сучасній науці та промисловості зростає інтерес до розробки електропровідних полімерних композитів, що поєднують легкість і гнучкість полімерних матеріалів із провідними властивостями наповнювачів, таких як технічний вуглець та вуглецеві нанотрубки. Ці матеріали мають широке

застосування в електроніці, сенсорних пристроях, енергетичних системах та інших галузях [1]. Значного поширення набули адитивні технології, які дозволяють створювати складні функціональні структури з індивідуально налаштованими властивостями. Однак, створення електропровідних полімерних композитів методами адитивного виробництва стикається з низкою проблем пов'язаних з нерівномірним розподілом наповнювачів у полімерній матриці, що може призводити до нестабільних електропровідних характеристик [2], з впливом параметрів друку (температури, швидкості екструзії, умов постобробки) на кінцеву структуру та електропровідність виробів [3], з проблемами адгезії між шарами, що впливають на загальну надійність і експлуатаційні характеристики виробів [4].

Таким чином, ключовою науковою проблемою є дослідження впливу технологічних параметрів адитивного виробництва на властивості електропровідних полімерних композитів, що дозволить створювати вироби з прогнозованими електричними властивостями. Дослідження цієї проблеми є важливим для подальшого розвитку технологій адитивного виробництва і розширення застосування електропровідних композитів в інженерії та електроніці.

Аналіз досліджень та публікацій

Електропровідні полімерні композити це гетерофазні матеріали, де одна фаза це полімер, що виконує функцію матриці, а інші фази це електропровідні наповнювачі, такі, наприклад, як вуглецеві матеріали, метали [5]. Такі композити зазвичай мають високу електропровідність, малу густину, стійкість до корозії та хороші механічні характеристики [6-8]. Висока електропровідність таких композитів досягається за рахунок морфології та структури електропровідних ланцюжків наповнювача у структурі полімерної матриці [9-11]. Для того, щоб матеріал став електропровідним, концентрація електропровідної фази повинна бути вище за поріг перколяції, як детально описано в теорії перколяції. Кореляція, яка існує між електропровідністю частинок наповнювача в різних полімерних матрицях і концентраціях наповнювача, зазвичай залежить від об'ємної частки компонентів і морфології наповнювача [12-15]. Тому важливими параметрами, що впливають на електропровідність полімерного композиту є параметри наповнювача, а також інші не менш важливі параметри як природа полімерної матриці і спосіб виготовлення композиту [16-18].

Актуальність задачі створення матеріалів із керованими електропровідними властивостями постає перед сучасною промисловістю у зв'язку зі зростаючим попитом на гнучку електроніку, функціонально інтегровані конструкції та сенсорні системи [19]. Електропровідні полімерні композити знайшли широке застосування включаючи різні датчики, світловипромінювальні діоди, батареї, паливні елементи, теплообмінники, біосенсори тощо [20]. Значний поштовх до розвитку цієї сфери дали технології адитивного виробництва, що дають змогу швидко та з високою точністю виготовляти вироби різної геометричної складності [21]. Застосування 3D-друку для формування електропровідних композитів відкриває можливості для створення сенсорних елементів, гнучких електроплат, електромагнітних захистів та навіть інтегрованих енергетичних систем без необхідності використання складних багатоступеневих процесів [22]. Утім, забезпечення надійної електропровідності в надрукованих виробах є нетривіальним завданням: під час адитивного процесу необхідно врахувати реологію матеріалів, параметри друку, взаємодію між шарами, а також рівномірність розподілу та концентрацію провідних наповнювачів [23]. Низка досліджень присвячена пошуку оптимальних параметрів друку та складів полімерних матриць із різними видами електропровідних наповнювачів [24]. При цьому існує потреба в системному аналізі впливу саме адитивних процесів (температура екструзії, швидкість друку, методів постобробки) на формування кінцевої структури і, відповідно, на електропровідні властивості [25].

Формулювання цілей статті

Враховуючи сучасні можливості адитивних технологій та електропровідних полімерних композитів, метою роботи є дослідження впливу параметрів адитивного виробництва методом пошарового наплавлення розплаву на електричні властивості електропровідного полімерного композиту. Важливо визначити, як електропровідні властивості, зокрема величина питомого опору зразків, залежать від умов друку, таких як температура, швидкість, спосіб укладання, геометрія та товщина шарів пластику. Ці дослідження в майбутньому сприятимуть точнішому моделюванню та контролю властивостей надрукованих виробів і зниженню енергозатрат під час виробництва.

Виклад основного матеріалу

У роботі для створення електропровідних полімерних композитів, що застосовуються у адитивному виробництві використовували термопластичний поліуретан та ряд наповнювачів. У якості матриці використовували термопластичний поліуретан LARIPUR 9025 (компанія виробник COIM Group, Італія). Полімерну матрицю наповнювали різними за морфологією вуглецевими наповнювачами: технічний вуглець марки N330 (виробник Кременчуцький завод технічного вуглецю, Україна) та марки Vulcan XC 72 (виробник Cabot Corporation, США), багатшарові вуглецеві нанотрубки марки NC7000 (Nanocyl, Бельгія).

Перед процесом виготовлення електропровідних композитів термопластичний поліуретан та вуглецеві наповнювачі, просували у повітряній сушарці впродовж 8 годин за температури повітря всередині сушки 70°C. Процес виготовлення компаунду здійснювався на двошнековому екструдері D = 2*22 мм, L/D = 40 (рис. 1) згідно рецептурних складів наведених в таблиці 1.

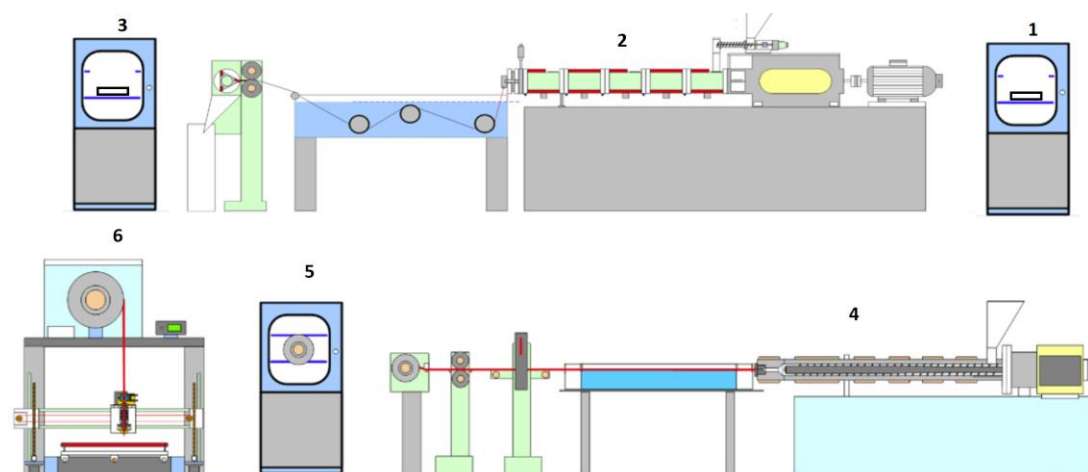


Рис. 1. Загальна схема реалізації адитивного виробництва електропровідних полімерних композитів: 1 – сушка вихідних складових; 2 – компаундування складових; 3 – сушіння компаунд; 4 – виробництво мононитки; 5 – сушіння готової мононитки; 6 – адитивне виробництво

Таблиця 1

Рецептури електропровідних композитів на основі термопластичного поліуретану

Назва компонента	Вміст, компонентів, % мас.					
	1	2	3	4	5	6
Поліуретан LARIPUR 9025	90	90	80	80	95	91,5
Технічний вуглець N330	15	-	-	20	-	-
Технічний вуглець Vulcan XC 72	-	15	20	-	-	-
Нанотрубки марки NC7000	-	-	-	-	5	7,5

Швидкість обертання шнеків складала 350 об/хв. Температурний профіль 210-230-220-210-210°C. Отримана з екструдера стренга охолоджувалася та подрібнювалася на грануляторі у гранулу. Далі отриману гранулу компаунду висушували протягом 8 год при температурі 70°C в повітряній шафі з циркуляцією повітря. Після просушування компаунд переробляли в мононитку на одношнековому екструдері з діаметром шнеку 25 мм, співвідношенням $L/D = 28$. Переробка здійснювалась в температурному профілі 180-220-215°C. Товщину мононитки визначали методом прямого вимірювання ручним мікрометром MITUTOYO серія 103. Діаметр композитної нитки коливався в межах $\pm 30\text{мкм}$, що цілком задовольняє умови для подальшої переробки адитивним виробництвом.

З отриманих монониток на основі використаних у роботі поліуретану та наповнювачів методом адитивного виробництва за технологією пошарового нанесення розплаву полімеру було виготовленні стандартні зразки для випробування електропровідних властивостей. Для отримання дослідних зразків методом адитивного виробництва використовували пристрій для адитивного виробництва Bambu Lab A1 mini. Виготовляли зразки електропровідних полімерних композитів розміром 20 на 100 мм та товщиною 1мм.

Адитивне виробництво зразків отриманих електропровідних композитів здійснювали з електропровідної композитної нитки, попередньо висушеної в повітряній термошафі при 60°C впродовж 8 год. Технологічні параметри адитивного виробництва наведені в таблиці 2. Під час адитивного виробництва використовували різні способи розподілу струменів матеріалу при формуванні шару (рис.2.)

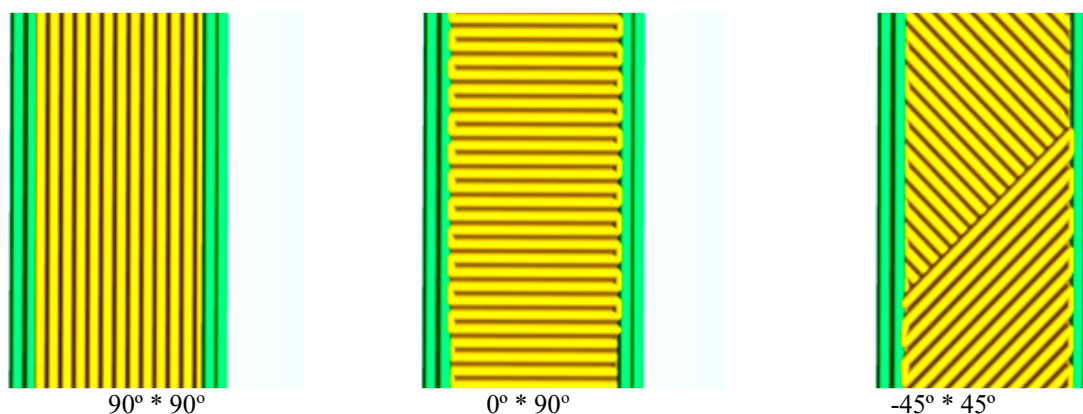


Рис. 2. Спосіб розподілу струменів матеріалу при формуванні шару

Таблиця 2

Технологічні параметри адитивного виробництва дослідних зразків електропровідних полімерних композитів на основі термопластичного поліуретану

Назва технологічного параметру		Значення
Температура екструзії, °C		240
Температура екструзії першого шару, °C		250
Коефіцієнт екструзії		1,05
Швидкість подачі матеріалу, мм/хв		2300
Ретракт, мм		1,00
Наявність охолодження виробу		+
Температура столу, °C		80
Діаметр сопла, мм		0,40
Ширина екструзії, мм		0,45
Висота шару, мм		0,20
Тип заповнення	-45°*45°	+
	90°*90°	+
	0°*90°	+
Попередня обробка мононитки	висушування при 60°C в термошафі	+
Кількість шарів оболонки зразка	верх	1
	низ	1
	периметр	1

Коефіцієнт екструзії величиною 1,03 для обраної моделі 3D принтеру забезпечує отримання максимальної монолітності дослідного зразка. Ширина екструзії, товщина шару та коефіцієнт екструзії підібрані дослідним шляхом для даного типу принтеру для забезпечення максимальної монолітності виробу. Параметром відгуку була вага виробу.

Для визначення питомого поверхневого електричного опору за 4-електродною схемою (рис. 3) використовували наступне обладнання: електрометр D.C. Milli-Ohm Meter RM-804 та чотири точковий зонд ST2558B-F01-P (виробник Suzhou Jingge Electro nic Co., LTD, Китай), що зображено на рисунку 4.

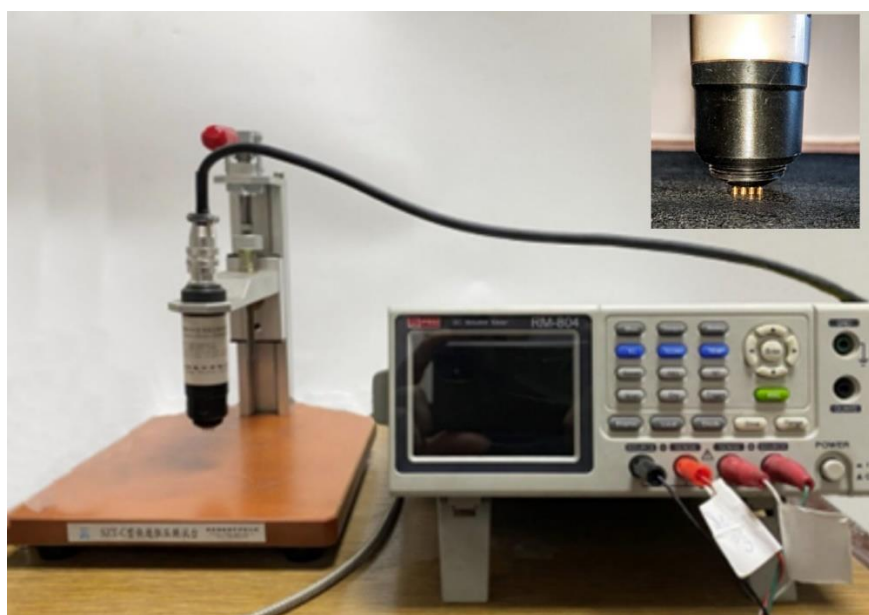


Рис. 3. Оснащення для вимірювання питомого електричного опору 4-електродним зондом

В процесі створення виробів шляхом адитивного виробництва вихідний матеріал проходить декілька стадій виготовлення від суміш вихідних компонентів, що перетворюється в гранульований композит з якого виготовляють мононитку, до виготовлення кінцевого виробу методом адитивного виробництва. На початковому етапі дослідження здійснювали вимірювання питомого поверхневого електричного опору зразків композитів у формі стренги після компаундування, мононитки після екструзії та друкованого виробу. Вимірювання здійснювали за допомогою чотирьох електродного датчика з відстанню між електродами 1 мм.

Встановлено, що в залежності від стадії переробки електропровідність полімерного композиту змінюється, дані наведено в (табл. 3).

Таблиця 3

Питомий поверхневий електричний опір електропровідних композитів на основі поліуретану в залежності від стадії переробки

Номер композиту	Питомий поверхневий електричний опір, $\kappa\Omega/\square$		
	Вихідний композит після компаундування	Мононитка з композиту	Виріб після адитивного виробництва
1	106	370	670
2	20	67	160
3	27	45	54
4	7,4	10,2	27
5	9	17	23
6	0,12	0,19	0,31

В результаті вимірювань питомого поверхневого опору встановлено, що в процесі послідовної переробки композитних матеріалів відбувається суттєве зростання показника. Зростання електричного опору є найбільш значимим для композиту з пігментним технічним вуглецем і найменшим - для композиту наповненого вуглецевими нанотрубками. Зростання опору ймовірно відбувається за рахунок окислення частинок наповнювача, що призводить до зменшення ефективної кількості електропровідних ланцюжків у полімерному композиті.

Адитивне виробництво розплавом полімеру пов'язане з вкладанням струменя в межі шарів матеріалу та шарами матеріалу. Ключовою особливістю адитивного виробництва є програмне визначення параметрів струменя та шарів. В залежності від комплексу властивостей матеріалу та умов його екструзії програмне заповнення може частково або повністю відповідати реальному заповненню у виробі. Під час адитивного виробництва зразків електропровідних композитів критично важливим є досягнення монолітності структури виробу. Монолітність виробу одержаного адитивним виробництвом оцінювали порівнюючи значення його густини у формі мононитки та у друкованому вигляді (табл. 4). Головні параметри адитивного виробництва, що впливають на щільність заповнення матеріалу це програмна ширина струменя екструзії та висота шару екструзії. Другорядними параметрами є швидкість та температура екструзії матеріалу та швидкість переміщення під час екструзії. В процесі виготовлення зразків ці параметри варіювали з ціллю одержання монолітної щільності заповнення при дотриманні геометричних розмірів виробу.

Таблиця 4

Густина зразків електропровідних композитів на основі поліуретану в залежності від стадії переробки

Номер композиту	Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$		
	Вихідний композит після компаундування	Мононитка з композиту	Виріб після адитивного виробництва
1	1234,0	1215	1204
2	1223	1217	1209
3	1207	1204	1205
4	1218	1207	1207
5	1221	1218	1218
6	1219	1217	1208

В процесі досліджень було встановлено, що параметри адитивного виробництва при котрих досягається монолітність виробу залежать не тільки від складу композиції, але також від температури екструзії матеріалу, а також від його вологості. Виявлено, що створені композити володіють здатністю поглинати вологу з атмосфери до рівноважного стану, що зумовлює необхідність їх попереднього сушіння.

Дослідження факторів адитивного виробництва здійснювалося шляхом вивчення впливу температури екструзії матеріалу на значення питомого поверхневого електричного опору (табл. 5). Дослідження здійснювали шляхом адитивного виробництва зразків у формі диску діаметром 80 мм та товщиною 1 та 2 мм. Диск формували шляхом монолітного заповнення з концентричним розподілом струменя полімеру.

Встановлено, що температура екструзії суттєво впливає на значення поверхневого електричного опору зразків. Виявлено, що значення поверхневого опору зразків є різними з боку платформи побудови та зовнішньої поверхні виробу. При вимірюванні електричних характеристик було виявлено, що поверхневий опір нижньої частини зразка, яка контактує зі столом принтера, є вищим за опір верхньої частини, яка контактує з екструдером. Це явище пояснюється умовами охолодження розплаву та утворенням мікропор між струменями полімеру. Швидкість охолодження струменя полімеру при контакті зі столом завжди перевершує швидкість охолодження при контакті з наступним шаром.

Таблиця 5

Питомий поверхневий електричний опір зразків електропровідних полімерних композитів на основі термопластичного поліуретану в залежності від температури екструзії

Номер композиту	Питомий поверхневий електричний опір при температурі екструзії, (нижня сторона зразка/верхня сторона зразка) $\kappa\Omega/\square$		
	230°C	240°C	250°C
1	890/1245	670/1105	710/989
2	190/346	160/352	155/342
3	67/234	54/245	55/242
4	32/126	27/160	27/157
5	29/45	23/52	25/47
6	0,33/12	0,31/16	0,30/11

Унікальною особливістю адитивного виробництва є можливість програмного керування напрямком розповсюдження струменів розплаву полімеру при формуванні шарів. Вплив даного фактору адитивного виробництва було досліджено шляхом створення зразків з різним напрямком розповсюдження струменів згідно з рисунком 3. При цьому вимірювання чотирьох електродною коміркою здійснювалося вздовж та перпендикулярно до напрямку розподілу шарів матеріалу. Результати наведено в Таблиці 6.

Таблиця 6

Питомий об'ємний електричний опір виготовлених зразків електропровідних полімерних композитів на основі термопластичного поліуретану в залежності від типу заповнення та напрямку вимірювання

Номер композиту	Питомий об'ємний електричний опір, (вздовж вісі зразка /поперек вісі зразка) $\kappa\Omega\cdot\text{см}$		
	Тип розподілу струменя		
	90°*90°	90°*0°	-45° * 45°
1	620/650	625/645	643/647
2	120/125	118/124	124/132
3	32/36	31/34	35/37
4	23/25	24/24	27/28
5	15/17	16/15	17/19
6	0,18/0,21	0,17/0,19	0,30/0,32

Одержані результати свідчать, що напрямок розповсюдження шарів впливає на електричні властивості композитного матеріалу створеного адитивним виробництвом за технологією FDM. Значення електричного опору виміряні вздовж напрямку орієнтації струменів матеріалу є нижчими, ніж у поперечному напрямку. Виміряна анізотропія опору можливо пов'язана з орієнтацією агрегатів або агломератів часток наповнювача у товщі композитного матеріалу в процесі виготовлення.

**Висновки з даного дослідження
і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Встановлено, що питомий електричний опір зразків композитів ТПУ з вуглецевими наповнювачами суттєво зростає під час послідовної переробки від композиту до адитивно виготовленого виробу. Так для зразків, що містять 15_20% мас. технічного вуглецю N330 значення питомого електричного опору зростає в 6-8 раз відповідно, а для зразків з наповненням технічним вуглецем Vulcan XC 72 – в 2-4 рази. Зразки, що містять вуглецеві нанотрубки демонструють зростання питомого електричного опору в 2,5-3 рази. Дана тенденція ймовірно пов'язана з руйнуванням перколяційних зв'язків між частками наповнювача та ймовірним окисленням під час переробки у розплаві.

Встановлено, що температура екструзії розплаву під час адитивного виробництва в певній мірі впливає на значення питомого електричного опору. В більшій мірі для композитів з сажею та в меншій мірі - для композитів з вуглецевими нанотрубками.

Параметри адитивного виробництва суттєво впливають на електричні властивості. Спостерігається виражена анізотропія питомого поверхневого опору при вимірюванні за чотирьох електродною схемою вздовж та поперек напрямку спрямування шарів, що ймовірно пов'язано з орієнтуванням часток або агрегатів наповнювача вздовж напрямку екструзії струменів у шарах. Взаємне розташування струменів між сусідніми шарами має відчутний вплив на величину питомого електричного опору зразків, що ймовірно свідчить про значний вплив електричної провідності між шарами на загальну величину провідності.

Отримані результати досліджень показують, що параметри адитивного виробництва здатні суттєво змінювати електричні властивості полімерних композитів. Таким чином, для забезпечення отримання матеріалів з регульованими властивостями потрібно провести подальші дослідження впливу інших факторів процесу формування матеріалів за технологіями адитивного виробництва.

Література

1. Zhang, Y., et al. (2020). Conductive polymer composites: Advances and challenges. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(9), 4852. <https://doi.org/10.1002/app.4852>
2. Wei, H., et al. (2019). A review on conductive polymer composites for additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107321>
3. Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
4. He, Y., et al. (2019). 3D printed continuous fiber reinforced composite materials and applications. *Composites Part B: Engineering*, 167, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.034>
5. Thongruang, W., Spontak, R. J., & Balik, C. M. (2002). Bridged double percolation in conductive polymer composites: An electrical conductivity, morphology and mechanical property study. *Polymer*, 43(13), 3717–3725. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00179-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00179-8)
6. Feller, J. F., Chauvelon, P., Linossier, I., & Glouannec, P. (2003). Characterization of electrical and thermal properties of extruded tapes of thermoplastic conductive polymer composites (CPC). *Polymer Testing*, 22, 831–837. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(03\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(03)00049-0)
7. Pang, H., Xu, L., Yan, D.-X., & Li, Z.-M. (2014). Conductive polymer composites with segregated structures. *Progress in Polymer Science*, 39, 1908–1933. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.02.005>
8. Liu, X., Li, C., Pan, Y., Schubert, D. W., & Liu, C. (2019). Shear-induced rheological and electrical properties of molten poly(methyl methacrylate)/carbon black nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.097>
9. Li, Y., et al. (2018). Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing. *Journal of Materials Chemistry C*, 6, 2258–2269. <https://doi.org/10.1039/C7TC05208H>
10. Sha, L., Chen, Z., Chen, Z., Zhang, A., & Yang, Z. (2016). Polylactic acid based nanocomposites: Promising safe and biodegradable materials in biomedical field. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/4192862>
11. Chen, H., Liu, H.-B., Li, J.-X., Li, Y., & He, Y.-D. (2009). Characteristics and preparation of polymer/graphite composite bipolar plate for PEM fuel cells. *Journal of Composite Materials*, 43, 755–767. <https://doi.org/10.1177/0021998308099297>
12. Dweiri, R., & Sahari, J. (2008). RETRACTED: Microstructural image analysis and structure–electrical conductivity relationship of single- and multiple-filler conductive composites. *Composites Science and Technology*, 68(7–9), 1679–1687. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.005>
13. Taherian, R., Hadianfard, M. J., & Golikand, A. N. (2013). A new equation for predicting electrical conductivity of carbon-filled polymer composites used for bipolar plates of fuel cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 128, 1497–1509. <https://doi.org/10.1002/app.38302>
14. Balberg, I. (2002). A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon black–polymer composites. *Carbon*, 40, 139–143. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00188-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00188-7)
15. Barton, R., Keith, J., & King, J. (2007). Development and modeling of electrically conductive carbon-filled liquid crystal polymer composites for fuel cell bipolar plate applications. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 10(4), 225–229.
16. Chippendale, R., & Golosnoy, I. O. (2011). Percolation effects in electrical conductivity of carbon fibre composites. In *The 8th International Conference on Computation in Electromagnetics* (pp. 186–187). The Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0089>
17. Hernandez, Y. R., et al. (2008). Comparison of carbon nanotubes and nanodisks as percolative fillers in electrically conductive composites. *Scripta Materialia*, 58, 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.09.013>
18. Keith, J. M., King, J. A., & Barton, R. L. (2006). Electrical conductivity modeling of carbon-filled liquid-crystalline polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(4), 3293–3300. <https://doi.org/10.1002/app.24787>
19. Ma, T., et al. (2024). Advances in 3D printing for polymer composites: A review. *InfoMat*, 6(6), e12568. <https://doi.org/10.1002/inf2.12568>
20. Cano-Vicent, A., et al. (2021). Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*, 47, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>
21. Torrisi, F., et al. (2012). Inkjet-printed graphene electronics. *ACS Nano*, 6(4), 2992–3006. <https://doi.org/10.1021/nm2044609>
22. Kim, M. Y., et al. (2020). The effect of filler orientation in conductive polymer composites. *Materials Letters*, 263, 127238. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127238>

23. Jakus, A. E., et al. (2015). 3D printing of high-content graphene scaffolds for electronic and biomedical applications. *ACS Nano*, 9(4), 4636–4648. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b01155>
24. Yan, C., et al. (2020). Additive manufacturing of multi-material polymer scaffolds for tissue engineering. *Materials Today*, 10, 101010. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.03.009>
25. Kumar, S., et al. (2021). Progress in conductive polymer composites for 3D printing applications. *Journal of Materials Science*, 56, 1967–1992. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05414-3>

References

1. Zhang, Y., et al. (2020). Conductive polymer composites: Advances and challenges. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(9), 4852. <https://doi.org/10.1002/app.4852>
2. Wei, H., et al. (2019). A review on conductive polymer composites for additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107321>
3. Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 215–243. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
4. He, Y., et al. (2019). 3D printed continuous fiber reinforced composite materials and applications. *Composites Part B: Engineering*, 167, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.034>
5. Thongruang, W., Spontak, R. J., & Balik, C. M. (2002). Bridged double percolation in conductive polymer composites: An electrical conductivity, morphology and mechanical property study. *Polymer*, 43(13), 3717–3725. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00179-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00179-8)
6. Feller, J. F., Chauvelon, P., Linossier, I., & Glouannec, P. (2003). Characterization of electrical and thermal properties of extruded tapes of thermoplastic conductive polymer composites (CPC). *Polymer Testing*, 22, 831–837. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(03\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(03)00049-0)
7. Pang, H., Xu, L., Yan, D.-X., & Li, Z.-M. (2014). Conductive polymer composites with segregated structures. *Progress in Polymer Science*, 39, 1908–1933. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.02.005>
8. Liu, X., Li, C., Pan, Y., Schubert, D. W., & Liu, C. (2019). Shear-induced rheological and electrical properties of molten poly(methyl methacrylate)/carbon black nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.097>
9. Li, Y., et al. (2018). Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing. *Journal of Materials Chemistry C*, 6, 2258–2269. <https://doi.org/10.1039/C7TC05208H>
10. Sha, L., Chen, Z., Chen, Z., Zhang, A., & Yang, Z. (2016). Polylactic acid based nanocomposites: Promising safe and biodegradable materials in biomedical field. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/4192862>
11. Chen, H., Liu, H.-B., Li, J.-X., Li, Y., & He, Y.-D. (2009). Characteristics and preparation of polymer/graphite composite bipolar plate for PEM fuel cells. *Journal of Composite Materials*, 43, 755–767. <https://doi.org/10.1177/0021998308099297>
12. Dweiri, R., & Sahari, J. (2008). RETRACTED: Microstructural image analysis and structure–electrical conductivity relationship of single- and multiple-filler conductive composites. *Composites Science and Technology*, 68(7–9), 1679–1687. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.01.005>
13. Taherian, R., Hadianfard, M. J., & Golikand, A. N. (2013). A new equation for predicting electrical conductivity of carbon-filled polymer composites used for bipolar plates of fuel cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 128, 1497–1509. <https://doi.org/10.1002/app.38302>
14. Balberg, I. (2002). A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon black–polymer composites. *Carbon*, 40, 139–143. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00188-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00188-7)
15. Barton, R., Keith, J., & King, J. (2007). Development and modeling of electrically conductive carbon-filled liquid crystal polymer composites for fuel cell bipolar plate applications. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 10(4), 225–229.
16. Chippendale, R., & Golosnoy, I. O. (2011). Percolation effects in electrical conductivity of carbon fibre composites. In *The 8th International Conference on Computation in Electromagnetics* (pp. 186–187). The Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0089>
17. Hernandez, Y. R., et al. (2008). Comparison of carbon nanotubes and nanodisks as percolative fillers in electrically conductive composites. *Scripta Materialia*, 58, 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.09.013>
18. Keith, J. M., King, J. A., & Barton, R. L. (2006). Electrical conductivity modeling of carbon-filled liquid-crystalline polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(4), 3293–3300. <https://doi.org/10.1002/app.24787>
19. Ma, T., et al. (2024). Advances in 3D printing for polymer composites: A review. *InfoMat*, 6(6), e12568. <https://doi.org/10.1002/inf2.12568>
20. Cano-Vicent, A., et al. (2021). Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. *Additive Manufacturing*, 47, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>
21. Torrisi, F., et al. (2012). Inkjet-printed graphene electronics. *ACS Nano*, 6(4), 2992–3006. <https://doi.org/10.1021/nn2044609>
22. Kim, M. Y., et al. (2020). The effect of filler orientation in conductive polymer composites. *Materials Letters*, 263, 127238. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127238>
23. Jakus, A. E., et al. (2015). 3D printing of hi