

УДК 678. 679:1

СОВА Н. В., СЛЕПЦОВ О. О., ФЕДОРІВ Т. Р., МАРТИНЕНКО А. О.,
КУДЛАЙ М. Р., ІСКАНДАРОВ Р. Ш.

Київський національний університет технологій та дизайну
**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ АДИТИВНОГО ФОРМУВАННЯ НА
ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАФІТОНАПОВНЕНОГО
КОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ ПОЛІЛАКТИДУ**

Мета. Дослідити вплив параметрів адитивного формування на властивості антистатичної композиції на основі полілактиду (ПЛА).

Методика. Поверхневий та об'ємний електричний опір визначали за ASTM D257.

Результати. Досліджено вплив параметрів адитивного формування на електричні властивості графітонаповненого композиту на основі полілактиду. Виявлено, що величина питомого опору суттєво залежить від умов друку, а саме температури, швидкості, товщини шару. Підвищення температури друку сприяє зниженню питомого опору зразка. Зниження товщини шару полімеру також дозволяє знизити питомий опір при швидкості друку в межах 3000 мм/хв. Виявлено, що питомі електричні характеристики суттєво відмінні на площині зразка, що зазнає контакту з платформою для друку. Концентричний спосіб укладання шарів розплаву полімеру менш ефективний з точки зору питомого опору, ніж взаємоперпендикулярний. Виявлено, що питомий електричний опір зразків виготовлених з матеріалу для 3д друку, що попередньо піддавався висушуванню нижче за опір зразка виготовленого з несушеного матеріалу. Програмована зміна параметрів 3D друку дозволяє керувати регулювати питомий опір графітонаповненого композиту на основі полілактиду в діапазоні трьох порядків та одержувати вироби, що володіють властивостями від антистатиків до статично дисипативних матеріалів. Адитивне виробництво дозволяє одержувати вироби потрібної конфігурації з регульованими електричними властивостями.

Наукова новизна. Досліджено особливості зміни антистатичних властивостей полімерного композиту в залежності від умов адитивного формування дослідних зразків. В залежності від застосовуваних параметрів адитивного формування можна отримувати вироби з властивостями від антистатиків до статично дисипативних матеріалів.

Практична значимість. Відпрацьовано технологічні режими адитивного формування виробів з композиту на основі полілактиду та графіту. Оцінено енергозатрати на адитивне формування виробів різної маси.

Ключові слова: ПЛА, антистатична композиція, адитивне формування, енерговитрати, графіт.

Вступ. Друк у форматі 3D зовсім не новий винахід. Перші патенти на технологію стереолітографії було отримано ще у середині 1980-х років. Втім, як це відбулося й з багатьма іншими інноваціями, її справжній потенціал почав розкриватися лише з початком третього тисячоліття [1].

Найширшого використання технологія набуває у важкій промисловості. За допомогою 3D-друку виготовляють високоточні інструменти, складні деталі та механізми. За прогнозами Marketsand Markets, темпи зростання використання промислового адитивного друку обумовлюватимуть постійна еволюція технології, зменшення виробничих витрат та зниження вартості виробництва. Усі ці фактори, а також наявність державних дотацій у промисловий 3D-друк роблять цю галузь надзвичайно перспективною [2]. Виявилось, що найчастіше, у 28% випадків, цю технологію використовують для прискорення розробки того чи іншого продукту [3]. Також адитивний друк дозволяє бізнесу створювати індивідуальні продукти, а його запровадження підвищує гнучкість виробництва. І хоча зараз за допомогою

3Дпринтерів все ще виготовляють переважно прототипи, можливості цих пристроїв набагато ширші [4].

Сьогодні активно розвивається напрямок адаптації існуючих традиційних полімерних матеріалів та композитів до адитивного виробництва, оскільки це дозволяє зробити виробництво складних виробів гнучким та мобільним.

Різноманітність існуючих технологій адитивного формування дозволяє швидко та ефективно отримувати найрізноманітніші деталі та вироби з програмованими властивостями, що, в деяких випадках, навіть перевершують за своєю досконалістю аналогічні вироби, отримані традиційними способами переробки полімерних матеріалів [5]. Зі сторони енергозатрат адитивне виробництво в разі економічніше, що ідеально вписується в сучасні тенденції [6]. Тому дослідження спрямовані на оцінку впливу параметрів адитивного формування на властивості сформованих виробів є особливо актуальні.

З іншої сторони, широкої популярності набувають біопластики, які за отримують з рослинної сировини і які здатні безслідно деєструкувати в живій природі, після свого прямого застосування. Прикладом такого пластику є полілактид (PLA) – пластик, отриманий з продуктів переробки кукурудзи [7]. Даний матеріал набув значної популярності як замієнник традиційного полієтилентерефталату, оскільки володіє подібним комплексом властивостей і є полієфіром за хімічною природою [8]. Крім свого біопоходження PLA ще й ідеальний матеріал для адитивного формування методом пошарового нанесення, оскільки володіє комплексом властивостей, зокрема високий модуль жорсткості на згин, невисока температура плавлення та низька елонгаційна в'язкість, що дозволяють створювати різноманітні вироби для широкого застосування [9].

Полімерні матеріали зазичай є дієлектриками, тобто мають поєрхневий опір $1 \cdot 10^{12}$ – $1 \cdot 10^{14}$ Ом. Дані властивості роблять їх цінними ізоляційними матеріалами. Але дієлектричні матеріали здатні поляризуватися та генерувати або накопичувати статичні електричні заряди, що можуть вражати людей та чутливі електронні пристрої. Для попередження накопичення статичних електричних зарядів полімерам надають антистатичних властивостей, змінюючи їх поєрхневий опір до $1 \cdot 10^8$ - $1 \cdot 10^{10}$ Ом. Такі матеріали називають антистатиками. У разі необхідності використання полімерів у пристроях та конструкціях у високих електричних полях використовують статично дисипативні матеріали, котрі можуть ефективно розсіювати (заземлювати) статичні заряди. Такі антистатичні матеріали мають поєрхневий опір від $1 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^4$ Ом.

Найпоширенішим способом створення антистатичних матеріалів є введення в склад полімеру полярних речовин, електропровідних наповнювачів та гідрофільних сполук [10].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу параметрів адитивного формування на електричні властивості антистатичної композиції на основі ПЛА.

Результати дослідження. Вихідними матеріалами для досліджень були зразки мононитки для 3д друку двох видів: ПЛА натуральний та ПЛА графітонаповнений (20% мас графіту). На першому етапі виготовляли стандартні зразки для випробування методом лиття під тиском на лабораторній литтєвій машині. Температурні режими лиття – 190-230°C. Властивості отриманих зразків наведено таблиці 1.

Таблиця 1

Властивості дослідних зразків, отриманих методом лиття під тиском

№	Назва матеріалу	Властивості		
		Міцність при розриві, Мпа	Відносне видовження при розриві, %	Густина, г/см ³
1	ПЛА	44	10	1,24
2	ПЛА+20% графіту	36	4	1,36

На другому етапі оцінювали зміну електричних параметрів досліджуваного композиту в залежності від режимів адитивного формування шляхом формування стандартного зразка для випробування у вигляді диску з діаметром 80мм та товщиною 1мм за допомогою 3д принтеру кінематики Prusa I3. (рис.1).

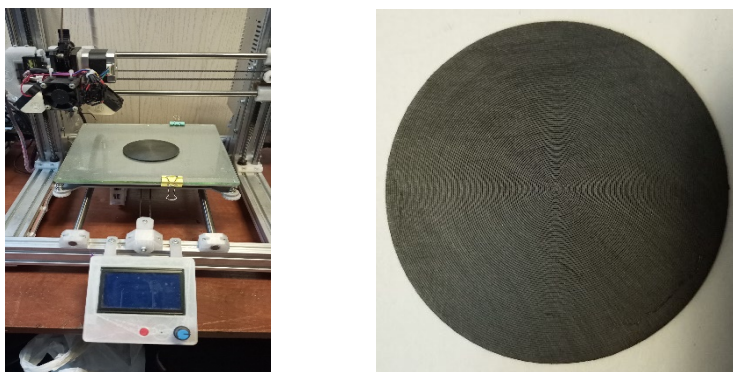


Рис.1. 3D принтер та дослідний зразок

Режими адитивного формування дослідних зразків наведено в таблиці 2. Було використано сопло 0.4 мм та температуру платформи 60°C, ширина екструзії 0,48мм.

Вимірювання поверхневого та об'ємного електричного опорів здійснювали за допомогою стандартної комірки згідно з ASTM 257 з використанням для вимірювання мегаомметра Fluke 1507. Діапазон вимірювання приладу складав від $1 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^{10}$ Ом. Даний діапазон вимірювання пов'язаний з особливістю приладу при вимірюванні струму, що протікає через зразок.

Таблиця 2

Режими адитивного формування дослідних зразків

№	Товщина шару, мкм	Тип заповнення	Температура, °C	Коефіцієнт екструзії	Швидкість друку, мм/хв	Попереднє висушування мононитки перед 3д друком
1	250	Cocentric	215	1,0	4000	Ні
2	200	Cocentric	215	1,0	4000	Ні
3	100	Cocentric	215	1,0	4000	Ні
4	250	Rectiliner 90	215	1,0	4000	Ні
5	200	Rectiliner 90	215	1,0	4000	Ні
6	100	Rectiliner 90	215	1,0	4000	Ні
7	200	Cocentric	215	1,0	4000	Так
8	100	Cocentric	215	1,0	4000	Так
9	200	Rectiliner 90	215	1,0	4000	Так

Продовження таблиці 2

10	100	Rectiliner 90	215	1,0	4000	Так
11	200	Rectiliner 90	190	1,0	4000	Так
12	200	Rectiliner 90	200	1,0	4000	Так
13	200	Rectiliner 90	210	1,0	4000	Так
14	200	Rectiliner 90	220	1,0	4000	Так
15	200	Rectiliner 90	230	1,0	4000	Так
16	200	Rectiliner 90	240	1,0	4000	Так
17	200	Rectiliner 90	220	1,0	1000	Так
18	200	Rectiliner 90	220	1,0	2000	Так
19	200	Rectiliner 90	220	1,0	3000	Так
20	200	Rectiliner 90	220	1,0	4000	Так
21	200	Rectiliner 90	220	1,0	5000	Так
22	200	Rectiliner 90	220	1,0	4000	Так
23	200	Rectiliner 90	220	1,1	4000	Так
24	200	Rectiliner 90	220	1,2	4000	Так

Прилад оснащений системою автоматичного коригування струму шляхом зміни вимірювальної напруги. Виміряні значення корегувалися за допомогою коефіцієнта, що враховував форму комірки та тип вимірювання. Вимірювання здійснювали за двоконтактним принципом, захисні електроди заземлювали (рис.2).

Використовували п'ять фіксованих значень вимірювальної напруги – від 50 до 1000 В, що дозволило з'ясувати вплив прикладеної різниці потенціалів та роль контактного опору під час вимірювання. Результати наведено в таблиці 3.

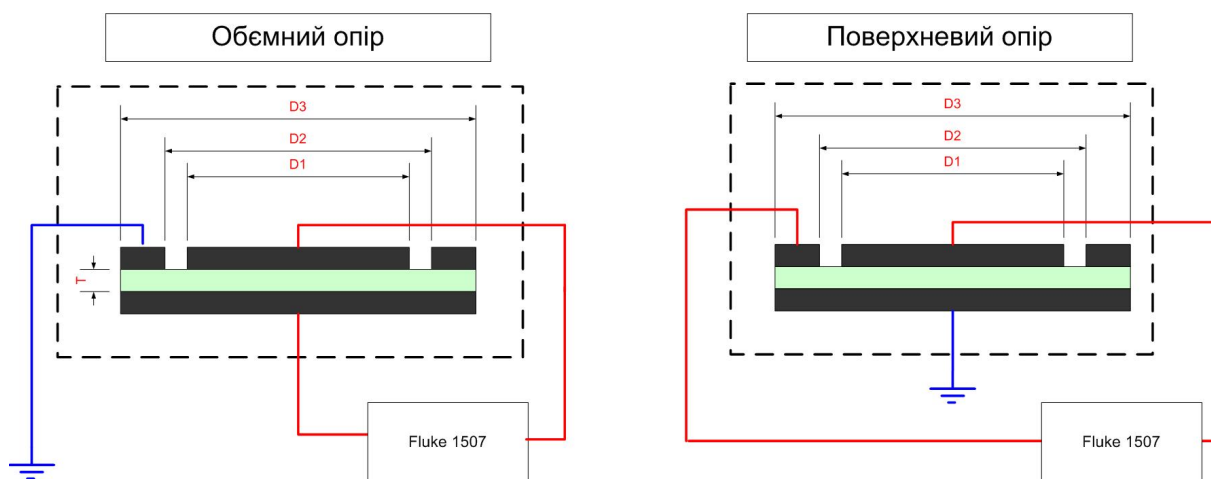


Рис.2. Схема комірки для вимірювання електричних властивостей

Під час вимірювання електричних характеристик було виявлено, що поверхневий електричний опір протилежних площин зразка суттєво відрізняється. Поверхневий опір сторони, що контактує з столом (нижня частина) принтера вище за опір верхнього шару зразка, що контактує з екструдером (верхня частина). Даний ефект, ймовірно, пов'язаний з умовами охолодження розплаву у зоні контакту з столом принтера та утворенням мікропор між струменями полімеру. Зразок, виготовлений литтям під тиском, не мав такої анізотропії властивостей. Швидкість охолодження струменя полімеру у контакті з столом завжди вища за швидкість охолодження струменя при контакті з наступним шаром полімеру. Дані

відмінності у охолодженні поверхонь призводять у відмінності у контактному опорі до електродів вимірювальної комірки.

Таблиця 3

Результати вимірювання

Зразок	Поверхневий електричний опір, 1*10 ⁹ Ом*см при напрузі					Об'ємний електричний опір, 1*10 ⁹ Ом*см				
	50 В	100 В	250 В	500В	1000В	50 В	100 В	250 В	500В	1000В
0	0,03	0,01	0,01	-	-	0,08	0,04	0,02	0,01	-
1a*	1,01	0,74	0,42	0,25	0,13	3,68	2,90	1,88	1,33	0,88
16*	0,62	0,41	0,22	0,13	0,05	4,47	3,47	2,30	1,47	0,30
2a	0	0	2,26	1,24	0,27	0	0	3,90	1,61	1,85
26	0	0	0,32	0,29	0,24	1,02	0,90	0,64	0,61	0,34
3a	0	2,08	0,72	0,35	0,07	0,80	0,57	0,35	0,23	0,08
36	0,71	0,59	0,22	0,10	0,01	0,40	0,26	0,14	0,07	0,04
4a	0,52	0,26	0,07	0,03	0,02	1,92	1,07	0,40	0,21	0,05
46	0,25	0,14	0,05	0,02	0,02	0,19	0,14	0,07	0,04	0,03
5a	0	2,15	1,42	0,80	0,02	1,35	0,96	0,58	0,40	0,26
56	0,70	0,57	0,36	0,23	0,02	0	0,91	0,67	0,41	0,08
6a	0,14	0,09	0,03	0,01	0,01	0,78	0,54	0,26	0,09	0,03
66	0,31	0,13	0,05	0,01	0,01	1,80	1,07	0,40	0,11	0,03
7a	0,21	0,16	0,08	0,04	0,01	0,36	0,26	0,12	0,05	0,03
76	0,15	0,12	0,07	0,03	0,01	0,74	0,57	0,25	0,06	0,03
8a	1,12	0,92	0,54	0,45	0,27	1,75	1,34	0,73	0,52	0,32
86	0,10	0,07	0,02	0,01	0,01	0,29	0,14	0,09	0,04	0,02
9a	0,25	0,19	0,11	0,06	0,01	0,89	0,56	0,15	0,08	0,02
96	0,23	0,18	0,12	0,07	0,01	0,23	0,10	0,05	0,09	0,02
10a	0,17	0,12	0,08	0,05	0,01	0,28	0,11	0,09	0,06	0,02
106	0,07	0,05	0,04	0,02	0,01	0,10	0,08	0,07	0,04	0,02
11a	0,62	0,37	0,16	0,03	0,01	0,72	0,48	0,12	0,42	0,03
116	2,3	1,84	0,62	3,90	0,01	3,40	2,70	1,10	0,31	0,02
12a	0,11	0,07	0,04	0,03	0,01	0,20	0,1	0,09	<0,01	<0,01
126	0,08	0,07	0,04	0,02	0,01	0,71	0,62	0,04	0,01	<0,01
13a	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,51	0,43	<0,01	<0,01	<0,01
136	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,22	0,21	0,11	0,02	<0,01
14a	0,10	0,06	0,05	0,01	0,01	0,56	0,94	0,38	<0,01	<0,01
146	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,43	0,31	<0,01	<0,01	<0,01
15a	0,12	0,08	0,04	0,01	0,01	0,52	0,22	0,12	<0,01	<0,01
156	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,28	0,05	<0,01	<0,01	<0,01
16a	0,09	0,06	0,03	0,02	0,01	0,34	0,18	0,13	<0,01	<0,01
166	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,55	0,45	<0,01	<0,01	<0,01
17a	3,89	1,37	0,51	0,31	0,22	1,94	1,43	0,62	0,23	<0,01
176	0,77	0,55	0,30	0,17	0,01	0,56	0,56	<0,01	<0,01	<0,01
18a	0,18	0,15	0,11	0,07	0,01	0,26	0,28	<0,01	<0,01	<0,01
186	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,71	0,66	<0,01	<0,01	<0,01

Продовження таблиці 3

19a	0,07	0,05	0,02	0,01	0,01	0,94	0,55	<0,01	<0,01	<0,01
19б	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,38	0,23	<0,01	<0,01	<0,01
20a	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,63	0,4	<0,01	<0,01	<0,01
20б	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,42	0,3	<0,01	<0,01	<0,01
21a	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01	0,15	0,12	0,09	<0,01	<0,01
21б	0,40	0,33	0,18	0,02	0,01	0,21	0,16	0,1	<0,01	<0,01
22a	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,91	0,73	<0,01	<0,01	<0,01
22б	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,38	0,22	0,8	<0,01	<0,01
23a	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,41	0,41	<0,01	<0,01	<0,01
23б	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,10	0,93	0,81	<0,01	<0,01
24a	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,70	0,30	0,11	<0,01	<0,01

а* - сторона зразка зі сторони столу 3д принтеру; б* - сторона зразка зі сторони сопла 3д принтеру

Зі збільшенням значення напруги спостерігається зменшення виміряного значення опору, що, ймовірно, пов'язане з контактним опором на поверхні зразка.

При вимірюванні об'ємного електричного опору виявлені відмінні значення опору при перевертанні зразка у вимірювальній комірці, що пов'язано з різним поверхневим опором сторін та різною контактною площею електродів. Дану особливість слід враховувати при застосуванні антистатичних композицій у адитивному виробництві. Можливим способом подолання цього ефекту є збільшення температури столу, збільшення температури першого шару деталі, що створюється.

Вплив товщини шару екструзії показано на зразках 1- 3 в табл 3. Зменшення товщини шару призводить до зменшення опору, як поверхневого так і об'ємного, що, ймовірно, пов'язано з вищою щільністю укладання струменів розплаву полімеру та кращою перколяцією між окремими струменями у структурі зразка.

Важливим фактором, що впливає на властивості виробів під час адитивного виробництва є вологість вихідного матеріалу у вигляді філаменту. Дослідним шляхом встановлено, що використання філаменту, який не піддавався висушуванню (кондиціонований при кімнатній температурі та вологості 70%) призводить до утворення структур з більш високим значенням опору в порівнянні з матеріалом, що попередньо висушувався (табл.. 3 зразки 3,4 та 7,8 4,5 та 9,10). Даний результат, ймовірно, пов'язаний з утворенням мікропорожнин (бульбашок) у товщі та на поверхні струменів полімеру. Порожнини в структурі полімеру ускладнюють міжшарову перколяцію, а на поверхні збільшують контактний опір під час вимірювання.

Ще один специфічний фактор, що характерний для адитивного формування, це – спосіб укладання шарів полімеру. Вплив способу укладання шарів показано на прикладі зразків 1, 2, 3 та 4, 5, 6. Приклад укладання шарів наведено на рис.3.

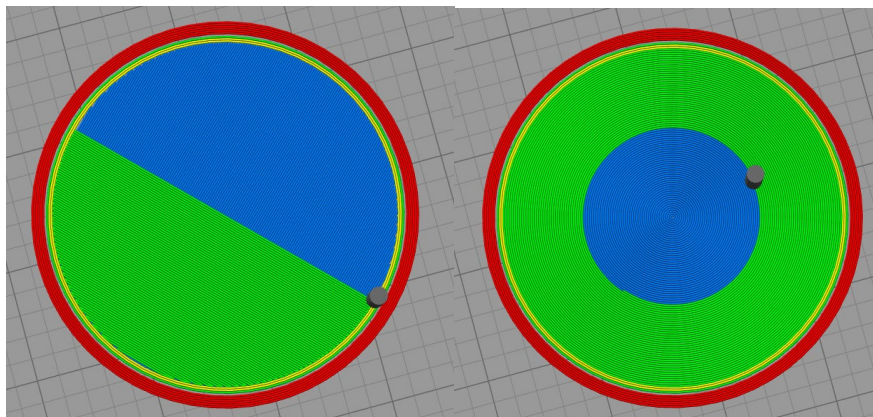


Рис.3. Схема укладання шарів полімеру при адитивному формуванні зразка

Концентричне укладання шарів менш ефективне з точки зору опору, ніж взаємоперпендикулярне. Даний ефект, ймовірно пов'язаний з утворенням трьохмірної перколяційної сітки між різними струменями полімеру для взаємоперпендикулярного розміщення.

Вплив температури екструдера показано на прикладі зразків 11-16. Зростання температури призводить до зменшення опору для всіх зразків та до зменшення різниці контактних опорів на різних сторонах зразка. Даний ефект, можливо, пов'язаний з зменшенням внутрішніх дефектів структури зразка, ефектом розширення струменя полімеру та ймовірно щільнішим укладанням шарів та кращим прилягання деталі до столу. Даний фактор необхідно враховувати під час застосування антистатичних композицій у адитивному виробництві.

Наступним фактором, що досліджувався, була швидкістю екструзії від 1000 до 5000 мм/хв. При збільшенні швидкості екструзії з 1000 до 3000 мм/хв показники опору знижуються, а з 4000 до 5000 поступово незначно зростають. Дане спостереження, ймовірно, пов'язане з орієнтацією часток наповнювача в структурі полімерного композиту, що призводить до зростання провідності вздовж струменя полімеру. Зростання опору при високих швидкостях друку, ймовірно, пов'язане з утворенням дефектів структури на поверхні, що погіршують контактний опір та перколяційну сітку в структурі виробу.

Вплив коефіцієнту екструзії показано на зразках 22-25. Зростання коефіцієнту екструзії не призводить до значного впливу на значення опору. При високому значенні спостерігається низьке значення опору, що можливо пов'язане з щільнішим пакуванням струменів полімеру в зразку.

На основі проведеного аналізу було встановлено, що оптимальними умовами друку антистатичних виробів з графітонаповненого ПЛА є: температура - 230 °С, швидкість - 3000 – 4000 мм/хв., товщина шару 100 мкм, спосіб заповнення - взаємно перпендикулярне, попереднє висушування філаменту 5-6 годин при 50 °С.

На основі здійснених вимірювань можна констатувати, що умови друку суттєво впливають на значення поверхневого та об'ємного опору, змінюючи даний показник в межах трьох порядків.

Також під час проведення досліджень були оцінені енергетичні витрати на процес адитивного виробництва за рахунок підключення в ланцюг живлення лічильника електричної енергії. Енергетичні витрати на виготовлення дослідного зразка склали 38,5 Вт/г для першого виробу вагою 6,5 г включаючи нагрів столу та 21,5 Вт/г для наступних виробів з розігрітим столом. Під час друку великогабаритного виробу вагою 200г енерговитрати склали 11- 12 Вт/г.

Висновки. Використання параметрів друку дозволяє регулювати питомий опір графітонаповненого композиту на основі полілактиду в діапазоні трьох порядків та одержувати вироби, що володіють властивостями від антистатиків та статично дисипативних. В залежності від умов охолодження поверхневий опір на протилежних частинах зразків сильно відрізняється, що необхідно враховувати під час проектування виробів та їх застосування. Адитивне виробництво дозволяє одержувати вироби з регульованими електричними властивостями.

Література

1. Сайт журналу «Тривимірний світ» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.business.ua/uk/trivimirnij-svit>
2. Шеховцов А. А. Аддитивные технологии как способ реализации концепции бережливого производства / А. А. Шеховцов, Н. П. Карпова // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 13. – С. 141–145. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://e-koncept.ru/2015/85029.htm>.
3. Site redshift autodesk. Retrieved from <https://redshift.autodesk.com/3d-printing-methods>
4. Baumann F.W. Additive manufacturing, cloud-based 3D printing and associated services – overview / F.W. Baumann, D. Roller // J Manuf Mater Process. – 2017.- Vol1 - p. 15.
5. Thomas D.S. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing NIST / D.S. Thomas, S.W. Gilbert // Spec Publ. 2014. – Vol1176. - p. 12.
6. Site 3d printing from scratch. Retrieved from <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview>
7. Сайт журнала «Сырье и упаковка для парфюмерии, косметики и бытовой химии» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cosmetic-industry.com/biorazlagaemye-polimery.html>
8. Hagen R. Polylactic Acid. / R.Hagen // Polymer Science: A Comprehensive Reference/ - 2012/ - Vol10. - P. 231-236.
9. S. Aravind Raj, E. Muthukumaran, K.

References

1. Sait zhurnal «Trivimirnij svit» [Site of journal «Three-dimensional world»] www.business.ua/uk/trivimirnij-svit Retrieved from <http://www.business.ua/uk/trivimirnij-svit> [in Ukraine]
2. Shehovcov A.A., Karpova N.P. (2015) Additivnye tehnologii kak sposob realizacii koncepcii berezhlivogo proizvodstva // Nauchno-metodicheskij jelektronnyj zhurnal koncept. Vol 13, 141-145. [Additive technologies as a way to implement the concept of lean production // Scientific and methodological electronic journal "Concept" e-koncept.ru/2015/85029 Retrieved from: <http://e-koncept.ru/2015/85029.htm>. [in Russian]
3. Site redshift autodesk. Retrieved from <https://redshift.autodesk.com/3d-printing-methods>
4. Baumann F.W., Roller D. (2017) Additive manufacturing, cloud-based 3D printing and associated services – overview. //J Manuf Mater Process. Vol1, 15. [in English]
5. Thomas D.S., Gilbert S.W. (2014) Costs and cost effectiveness of additive manufacturing NIST // Spec Publ. Vol 1176, 12. [in English]
6. Site 3d printing from scratch. Retrieved from <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview>.
7. Sait zhurnal « Сырье и упаковка для парфюмерии, косметики и бытовой химии » [Site of journal « Raw materials and packaging for perfumery, cosmetics and household chemicals»] www.cosmetic-industry.com/biorazlagaemye-polimery Retrieved from <https://cosmetic-industry.com/biorazlagaemye-polimery.html> [in Russian]
8. R.Hagen (2012). Polylactic Acid. // Polymer Science: A Comprehensive Reference. Vol 10, 231-236. [in English]
9. S. Aravind Raj, E. Muthukumaran, K. Jayakrishna

Jayakrishna. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. Materials Today: Proceedings. Volume 5, Issue 5, Part 2, 2018, Pages 11219-11226

10. Kuryptya Y. Design of electrically conducting polymer hybrid composites based on polyvinyl chloride and polyethylene / Y. Kuryptya, B. Savchenko, A. Slieptsov, V. Plavan, N. Sova, // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. - Vol 3(6-81). - P. 26–32.

(2018). A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. Materials Today: Proceedings. Vol5, Part 2, 11219-11226 [in English]

10. Kuryptya, Y., Savchenko, B., Slieptsov, A., Plavan, V., Sova, N.(2016) Design of electrically conducting polymer hybrid composites based on polyvinyl chloride and polyethylene. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol3(6-81), 26–32 [in English]

SOVA NADIYA

e-mail: djanc@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3550-6135>

*Department of Applied Ecology, technology of polymers and chemical fibers
National University of Technologies and Design*

SLIEPTSOV ALEKSANDR

*Department of Applied Ecology, technology of polymers and chemical fibers
National University of Technologies and Design*

FEDORIV TARAS

*Department of Applied Ecology, technology of polymers and chemical fibers
National University of Technologies and Design*

ISKANDAROV RUSLAN

E-mail: Iskandarov.R.Sh@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2164-0061>

*Department of Applied Ecology, technology of polymers and chemical fibers
National University of Technologies and Design*

MARTINENKO ANTON

*Department of Applied Ecology, technology of polymers and chemical fibers
National University of Technologies and Design*

KUDLAY MAKSIM

*Department of Applied Ecology, technology of polymers and chemical fibers
National University of Technologies and Design*

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДТИВНОГО ФОРМОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ГРАФИТОНАПОЛНЕННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ
ПОЛИЛАКТИДА
СОВА Н.В., СЛЕПЦОВ О.О., ФЕДОРОВ Т.Р., МАРТИНЕНКО А.О., КУДЛАЙ М.Р.,
ИСКАНДАРОВ Р.Ш.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Цель. Исследовать влияние параметров аддитивного формирования на свойства антистатической композиции на основе полилактида (ПЛА).

Методика. Поверхностное и объемное электрическое сопротивление определяли по ASTM D257.

Результаты. Исследовано влияние параметров аддитивного формирования на электрические свойства графитонаполненного композита на основе полилактида. Выявлено, что удельное сопротивление существенно зависит от условий печати, а именно температуры, скорости, толщины слоя. Повышение температуры печати способствует снижению удельного сопротивления образца. Снижение толщины слоя полимера также позволяет снизить удельное сопротивление при скорости печати в пределах 3000 мм/мин. Выявлено, что удельные электрические характеристики существенно отличные на плоскости образца, подвергнутого контакта с платформой для печати. Концентрический способ укладки слоев расплава полимера менее эффективный с точки зрения удельного сопротивления, чем взаимно. Выявлено, что удельное электрическое сопротивление образцов изготовленных из материала для 3д печати, который предварительно подвергался сушке ниже, чем сопротивление образца изготовленного из несущего материала. Программируемое изменение параметров 3D печати позволяет целенаправленно регулировать удельное сопротивление графитонаполненного композита на основе полилактида в диапазоне трех порядков и получать

изделия, обладающие свойствами от антистатиков к статически диссипативным материалам. Аддитивное производство позволяет получать изделия нужной конфигурации с регулируемыми электрическими свойствами.

Научная новизна. Исследованы особенности изменения антистатических свойств полимерного композита в зависимости от условий аддитивного формирования опытных образцов. В зависимости от применяемых параметров аддитивного формирования можно получать изделия со свойствами от антистатиков к статически диссипативных материалов.

Практическая значимость. Отработаны технологические режимы аддитивного формирования изделий из композита на основе полилактида и графита. Оценены энергозатраты на аддитивное формования изделий различной массы.

Ключевые слова: ПЛА, антистатическая композиция, аддитивное формования, энергозатраты, графит.

**INFLUENCE OF ADDITIVE FORMING PARAMETERS ON ELECTRICAL PROPERTIES OF GRAPHITE-FILLED COMPOSITE BASED ON POLYLACTIDE
SOVA N.V., SLIEPTSOV A.A., FEDORIV T.R., MARTINENKO A.O., KUDLAY M.R.,
ISKANDAROV R. Sh.**

Kyiv National University of Technologies and Design

Purpose. Investigate the effect of additive formation parameters on the properties of an antistatic composition based on polylactide (PLA).

Methodology. Surface and bulk electrical resistance were determined by ASTM D257

Findings. The influence of additive formation parameters on the electrical properties of graphite-filled composite based on polylactide has been studied. It was found that the value of resistivity significantly depends on the printing conditions, namely the temperature, speed, thickness of the layer. Increasing the printing temperature helps to reduce the resistivity of the sample. Reducing the thickness of the polymer layer also reduces the resistivity at a print speed within 3000 mm / min. It was found that the specific electrical characteristics are significantly different in the plane of the sample in contact with the printing platform. Concentric method of laying layers of polymer melt is less effective in terms of resistivity than mutually perpendicular. It was found that the electrical resistivity of samples made of material for 3D printing, which was previously subjected to drying below the resistance of the sample made of undried material. The programmed change of 3D printing parameters allows to control the specific resistance of graphite-filled composite based on polylactide in the range of three orders and to obtain products with properties from antistatic to statically dissipative materials. Additive production allows to obtain products of the desired configuration with adjustable electrical properties.

Originality. The peculiarities of the change of antistatic properties of the polymer composite depending on the conditions of additive formation of experimental samples are investigated. Depending on the applied parameters of additive molding, it is possible to obtain products with properties from antistatic to statically dissipative materials.

Practical value. Technological modes of additive molding of composite products based on polylactide and graphite have been developed. Energy consumption for additive formation of products of different mass is estimated.

Key words: PLA, antistatic composition, additive formation, energy consumption, graphite.