

УДК 539.3

## Вплив конструкційних параметрів на пружні властивості композитів, виготовлених за технологією 3D друку

Рубашевський В.В., Шукаєв С.М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** В останній час у технології 3D друку спостерігається заміна витратних матеріалів таких, як полімери, метали, кераміка на композиційні, що дозволяє посилити механічні та інші важливі властивості виробів. Дане дослідження присвячене вивченню впливу таких параметрів як орієнтація та товщина шарів друкованих зразків, виготовлених з композитної мононитки на основі PLA + з наповненням шаруватого графіту 5%, на їх пружні властивості. Зразки, розроблені відповідно до стандарту ДСТУ EN ISO 527-2:2018, були надруковані за технологією FDM з трьома різними кутами орієнтації ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) та трьома товщинами шару (0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм) для кожного кута. Випробування на розтягання виконувалися згідно з планом повного факторного експерименту (два фактори на трьох рівнях, всього дев'ять випробувань). За результатами випробувань побудовано регресійну модель, яка описує зміну модуля пружності в залежності від обраних конструкційних параметрів.

**Ключові слова:** 3D друк; PLA-CG+ Графітовий; модуль пружності; регресійний аналіз; розтягання.

Стрімке поширення адитивних технологій (або 3D друку) у виробництві різноманітних застосунків, ставить перед інженерами нові завдання, зокрема, визначення механічних властивостей таких виробів. На сьогодні існують різні технології 3D друку, але найбільш поширеною є моделювання методом наплавлення (FDM), в якій використовуються спеціальні нитки з пластиків, металів або кераміки. Протягом останніх років технології 3D друку розвиваються у напрямі заміни чистих термопластичних матеріалів таких як PLA і ABS на композиційні матеріали, армовані натуральним волокном або порошком, що дозволяє посилити механічні та інші важливі властивості виробів.

Дане дослідження присвячене вивченню впливу таких конструкційних параметрів як орієнтація та товщина шару друкованих зразків, виготовлених з композитної мононитки діаметром 1,75 мм (рис.1) на основі PLA пластику з наповненням шаруватого графіту 5% (що орієнтується в потоці матеріалу під час друку), на їх пружні властивості. Даний пластик призначений для 3D друку поверхонь, які повинні володіти низьким коефіцієнтом тертя. Крім того, мононитка має антистатичні властивості (опір  $10^9$  Ом·см), її жорсткість та теплостійкість вище у порівнянні зі звичайним PLA. Ще однією з переваг є взаємодія з радіохвилями – поглинає, екранує, розігрівається в мікрохвильовій печі.



Рис. 1. Композитний пластик PLA-CG+ Графітовий

Для випробувань були виготовлені зразки типу 1 (рис. 2) згідно з стандартом ДСТУ EN ISO 527-2:2018 [1]. Зразки були надруковані за допомогою 3D принтера ANYCUBIC I3 Mega S з трьома різними кутами орієнтації  $\theta$  ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) та трьома товщинами шару друку  $h$  (0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм) для кожного кута.

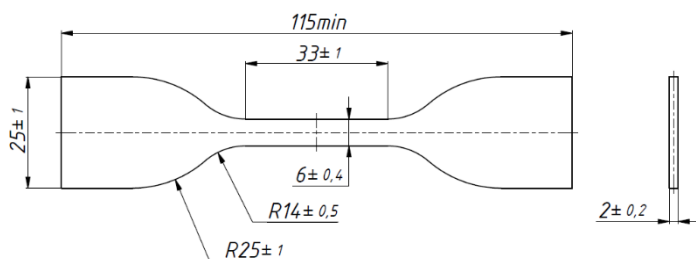


Рис. 2. Креслення зразка типу 1

Для даного пластику компанія виробник надає певні рекомендації щодо режимів друку [2]. Згідно з якими експериментальним шляхом було визначено оптимальні параметри для якісної міжшарової адгезії та прилипання до платформи (табл.1).

Таблиця 1. Режими друку зразків

Параметри	Рекомендовані	Використані
Температура екструдера	200-220 °С	210 °С
Температура платформи	50-70 °С	60 °С
Обдув моделі	Потрібний	Присутній
Швидкість друку	30-80 мм/сек	40-60 мм/сек
Тип принтера	закритий/відкритий	Відкритий

Випробування зразків проводилось на універсальній випробувальній машині TIRATEST 2151 (рис. 3) з точністю вимірювання переміщення 0,01 мм, діапазоном швидкості траверси від 0,5 до 1000 мм/хв і діапазоном навантаження від 0,01Н до 5 кН. У попередніх випробуваннях мононитки даного матеріалу було визначено значення модуля Юнга на рівні

$E = 2380 \text{ МПа}$ . Дослідження впливу конструкційних параметрів на пружні властивості проводились згідно ДСТУ EN ISO 527-2:2018, загалом було випробувано 30 зразків.

Випробування на розтягання виконувалися згідно з планом повного факторного експерименту  $3^2 / 19$  (два фактори на трьох рівнях, всього дев'ять випробувань). Змінними факторами було обрано:  $h$  - товщину шару та  $\theta$  - кут орієнтації друку. За функцію відгуку  $\hat{y}$  обрано модуль Юнга  $E$  у МПа. Кожний дослід повторювався 3 рази. Регресійна модель, що відповідає даному плану експерименту має наступний вигляд:

$$\hat{y} = (E) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4z_1 + b_5z_2 + b_6x_1z_2 + b_7x_2z_1 + b_8z_1z_2 \quad (1)$$

де  $x_1, x_2, z_1, z_2$  - кодовані значення факторів  $\theta$  і  $h$ , які визначаються за наступними формулами:

$$\begin{aligned} x_1 &= 10 \cdot (h - 0,2), \quad z_1 = 3 \cdot (x_1^2 - 2/3); \\ x_2 &= 1/45 \cdot (\theta - 45), \quad z_2 = 3 \cdot (x_2^2 - 2/3). \end{aligned} \quad (2)$$



Рис. 3. Універсальна випробувальна машина TIRATEST 2151

В таблиці 2 представлені натуральні і кодовані значення факторів та результати випробувань. Обраний план експерименту відповідає критеріям D-оптимальності та ортогональності.

Таблиця 2. Naturalні і кодовані значення факторів та результати випробувань

№	Naturalні значення факторів		Кодовані значення факторів				Результати випробувань модуля Юнга $E$ , МПа			
	$h$ , мм	$\theta$ , град	$x_1$	$x_2$	$z_1$	$z_2$	1-й	2-й	3-й	Середнє
1	0,1	0	-1	-1	1	1	959,30	982,00	982,08	974,46
2	0,2	0	0	-1	-2	1	1057,67	1057,50	1045,8	1053,66
3	0,3	0	1	-1	1	1	1000,00	1023,68	1015,36	1013,01
4	0,1	45	-1	0	1	-2	956,40	982,08	982,08	973,52
5	0,2	45	0	0	-2	-2	986,19	982,08	982,08	983,45
6	0,3	45	1	0	1	-2	1015,36	1015,36	997,00	1009,24
7	0,1	90	-1	1	1	1	972,97	982,08	982,08	979,04
8	0,2	90	0	1	-2	1	1055,67	1060,00	1066,25	1060,64
9	0,3	90	1	1	1	1	1019,44	1014,36	1015,36	1016,39

Для перевірки відтворюваності результатів випробувань перевіряли гіпотезу про однорідність дисперсії у різних дослідах. Так як випробування виконували за однакової кількості паралельних дослідів ( $m = 3$ ), то перевірку здійснювали за критерієм Кочрена [3]. Перевірка засвідчила, що немає підстав для відхилення нульової гіпотези про однорідність дисперсій. За методом найменших квадратів були одержані оцінки коефіцієнтів регресійної моделі (1). Перевірка статистичної значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента [3] дозволила відкинути статистично незначущі коефіцієнти і отримати остаточне рівняння у такому вигляді:

$$\hat{y} = (E) = 1007,05 + 18,6x_1 - 12,77z_1 + 9,15z_2 - 7,71z_1z_2 \quad (3)$$

Статистичний аналіз рівняння показав, що отриманий коефіцієнт множинної кореляції ( $R = 0,998$ ) є статистично значущим, а модель — адекватною.

Аналіз результатів експерименту і отриманої моделі засвідчив, що обидва розглянутих фактори впливають на модуль пружності  $E$  зразків, при цьому вплив факторів і їх взаємодії здійснюється за нелінійними залежностями. Дане рівняння може бути використано у розрахунках НДС виробів з даного пластику. Порівняння модулів Юнга мононитки та виготовлених з неї зразків засвідчило, що зниження модуля Юнга у зразках в середньому на 56%, що пояснюється значним впливом температури (нагрів з подальшим охолодженням) під час 3D друку.

### Висновки

1. Отримано нові експериментальні результати щодо впливу конструкційних параметрів (кут орієнтації та товщина шару друку) на пружні властивості виробів, які виготовляються за технологією 3D друку з композитної мононитки на основі PLA+ з наповненням шаруватого графіту 5%.

2. Одержано регресійну модель, яка описує вплив розглянутих конструкційних параметрів на модуль Юнга за кімнатної температури.

3. Результати випробувань показали, що обрані конструкційні параметри, такі як кут орієнтації та товщина друку впливають на модуль Юнга деталей виготовлених з композитного пластику.

4. Порівняння модуля Юнга мононитки та виготовлених з неї зразків виявило, суттєве зниження модуля пружності у зразку.

## Список літератури

1. ДСТУ EN ISO 527-2:2018 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 2. Умови випробування для пластмас, виготовлених методом формування та екструзії (EN ISO 527-2:2012, IDT; ISO 527-2:2012, IDT).
2. <https://monofilament.com.ua/ua/products/inzhinernye-plastiki/kompozitsionnye-materialy-dlja-3d-printera/pla-sg-grafitovyj-o1-75mm-10m>.
3. Блинова Е.И. Планирование и организация эксперимента. - Минск: БГТУ, 2010. - 130 с.

## The effects of design parameters on the elastic properties of PLA-Graphite composites fabricated by 3D printing

Rubashevskiy Viktor, Shukayev Sergiy

**Abstract.** Recently, in 3D printing, consumables such as polymers, metals, and ceramics are being replaced with composites, which makes it possible to enhance the mechanical and other important properties of products.

The purpose of this study is to investigate the effects that the orientation and thickness of the layers of printed samples made of composite monofilament based on PLA+ with a 5% content of layered graphite, and other such parameters, have on the elastic properties of the printed samples. The samples, developed in accordance with the DSTU EN ISO 527-2: 2018 standard, were printed using the FDM technology with three different orientation angles (0°, 45°, 90°) and three layer thicknesses (0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm) for each angle. Tensile tests were performed using the complete factorial experiment design (consisting of two factors at three levels, with nine tests in total). Based on the results of these tests, a regression model was developed to describe the relationship between the (effective) modulus of elasticity and the selected design parameters.

**Keywords:** 3D printing; PLA-CG+ (Graphite); elastic modulus; regression analysis; tension.

## Влияние конструктивных параметров на упругие свойства композитов, изготовленных по технологии 3D печати

Рубашевский В.В., Шукяев С.М.

**Аннотация.** В последнее время в технологии 3D печати наблюдается замена расходных материалов таких, как полимеры, металлы, керамика на композиционные, что позволяет усилить механические и другие важные свойства изделий.

Данное исследование посвящено изучению влияния таких параметров как ориентация и толщина слоев печатных образцов, изготовленных из композитной мононити на основе PLA+ с наполнением слоистого графита 5%, на их упругие свойства. Образцы, разработанные в соответствии со стандартом ДСТУ EN ISO 527-2: 2018, были напечатаны по технологии FDM с тремя различными углами ориентации (0°, 45°, 90°) и тремя толщинами слоя (0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм) для каждого угла. Испытания на растяжение выполнялись согласно плану полного факторного эксперимента (два фактора на трех уровнях, всего девять испытаний). По результатам испытаний построено регрессионную модель, которая описывает изменение (эффективного) модуля упругости в зависимости от выбранных конструктивных параметров.

**Ключевые слова:** 3D печать; PLA-CG+ Графитовый; модуль упругости; регрессионный анализ; растяжение.