

Міцність і пружність PLA + графіт композитів: експериментальний і теоретичний аналіз

В.В. Рубашевський¹ • С.М. Шукаєв¹

Received: 23 August 2023 / Revised: 11 September 2023 / Accepted: 19 September 2023

Проблематика. Поєднання адитивних технологій з армованими матеріалами відкриває широкі можливості для створення легких і міцних виробів з унікальними характеристиками. Впровадження цих технологій у виробництво потребує ефективних методик оцінювання граничного стану таких виробів.

Мета дослідження. Дослідження механічних властивостей зразків, виготовлених за методом наплавлення FDM з двох термопластичних ниток на основі полілактиду: PLA-Cg+ із 5% наповненням з шаруватого графіту та PLA-CCF із 10% наповненням з вуглецевих волокон.

Методика реалізації. Експериментально досліджено вплив параметрів процесу 3D друку, таких як орієнтація укладання та товщина шарів друку, на механічні характеристики зразків за розтягання та стискання.

Результати дослідження. Показано, що як орієнтація укладання, так і товщина друкованого шару суттєво впливають на механічні властивості зразків обох матеріалів. Виконано порівняльний аналіз експериментальних даних з розрахунками за критеріями міцності: Цая-Хіла, Цая-Ву, Хофмана, Мізеса та максимальних напружень.

Висновки. Результати випробувань засвідчили, що існує значний вплив досліджуваних параметрів процесу друку на механічні характеристики зразків із PLA + графіт як за розтягання, так і стискання. Здебільшого, зразки з меншою товщиною мають як вищу границю міцності (пропорційності), так і більше відносне видовження. Установлено, що найкращий збіг експериментальних та розрахункових даних для обох матеріалів досягається у випадку використання узагальненого критерію Мізеса.

Ключові слова: 3D друк; адитивне виробництво; моделювання методом наплавлення, PLA-Cg+; PLA-CCF; механічні властивості; критерії міцності.

Вступ

Адитивні технології (або 3D-друк) широко використовуються у різноманітних галузях виробництва, включаючи аерокосмічну [1, 2], автомобільну [3], харчову [4], медичну [5] та ін. Хоча спершу 3D-друк позиціонувався, як метод для швидкого прототипування, наразі ця технологія досягла рівня серійного виробництва. Це підвищує вимоги до властивостей друкованих виробів, зокрема до їх механічних характеристик.

Серед методів 3D-друку, які залежать від матеріалу та процесу друку, найбільш поширеним є метод

моделювання плавленням (FDM). Дана технологія використовує термопластичні нитки (PLA, ABS, PETG, TPU, нейлон, ін.), які нагріваються до температури плавлення і подаються в зону друку для нанесення шарів на платформу, що дозволяє пошарово виготовляти виріб безпосередньо за цифровою моделлю.

PLA-пластик (полі-молочна кислота) має ряд переваг перед іншими матеріалами, що використовуються у технології 3D-друку. Матеріал має природне походження, біорозкладний та біосумісний, що робить його незамінним у харчовій та медичній промисловості [4, 5]. Недоліком PLA є низькі механічні властивості порівняно з традиційними конструкційними матеріалами.

Якість деталей, надрукованих за методом FDM, залежить від технологічних і конструкційних параметрів процесу виготовлення [6]. Зокрема, численні дослідження щодо впливу параметрів 3D-друку на механічні

✉ В.В. Рубашевський
viktorrub21@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ні властивості друківаних виробів засвідчили наявність впливу таких параметрів, як швидкість друку [7], температура екструзії та платформи [8], типи заповнення та щільність [9], орієнтація укладання та товщина шарів друку [10–12]. Залежно від цільового призначення можна оптимізувати набір параметрів таким чином, щоб отримати 3D-друковану деталь із бажаними властивостями, наприклад, з кращим співвідношенням міцності до ваги [13].

В останні роки технології 3D друку розвиваються у напрямі заміни чистих термопластичних матеріалів таких як PLA і ABS на композитні матеріали, армовані натуральним волокном або порошком. Поєднання адитивних технологій з армованими матеріалами відкриває широкі можливості для створення легких і міцних виробів. Технологія 3D друку стала потужним інструментом, який надає можливість дослідникам розробляти нові композитні матеріали. Наприклад, до PLA додають такі природні наповнювачі, як волокна коноплі [14] та льону [15]. У роботі [16] детально досліджено трибологічні, механічні та хімічні властивості композитів PLA із масовим вмістом графіту: 1; 2,5; 5; 7,5 і 10 %. Виявлено, що збільшення вмісту графіту призводить до значного зниження зносу матеріалу та до істотного впливу на механічні властивості, зокрема міцність і ударна в'язкість знизилася, а матеріал став більш жорстким порівняно з PLA без домішок.

Проектування 3D друківаних виробів потребує знання їх механічних властивостей, які оцінюються експериментально, або теоретично. Визначення механічних характеристик композитів за допомогою чисельних та аналітичних методів є актуальним завданням і гарною альтернативою експериментальним дослідженням. Для оцінки міцності композитів необхідно знати критерії, що задають допустимі межі напружень та деформацій, в яких композит може працювати за заданих умов без руйнування. Огляд деяких широко застосовуваних феноменологічних критеріїв, що використовуються для оцінки міцності композитів, представлено у роботі [17]. У роботі [18] наведено відносну популярність застосування феноменологічних критеріїв, зокрема, максимальних деформацій – 30 %, максимальних напружень – 23 %, Цая-Хілла – 18 %, Цая-Бу – 13%, решта – 19%. На думку авторів роботи [19] критерій Цая-Бу більш точно описує руйнування композитних матеріалів ніж критерії максимальних деформацій, максимальних напружень і Цая-Хілла. Автори роботи [20] прийшли до висновку, що класична теорія ламінування та критерій міцності Цая-Хілла можуть бути використані для оцінювання модуля пружності та границі міцності друківаних матеріалів з PLA. Згідно з роботою [21] експериментальні розподіли жорсткості та міцності у випробуваннях на розтягання зразків з PLA, надруківаних з п'ятьма кутами орієнтації шарів друку, добре узгоджуються з моделлю ортотропного матеріалу та критерієм міцності Цая-Хілла з максимальною похибкою моделі 10%.

Метою цього дослідження є вивчення впливу параметрів процесу 3D-друку за методом наплавлення, таких як орієнтація укладання та товщина шарів друку, на механічні характеристики зразків, виготовлених із композитних монониток на основі PLA + (із наповненням шаруватого графіту 5%) та PLA-CCF (із введенням в PLA пластик 10 % вуглецевих волокон), за умов розтягання і стискання; виконання порівняльного аналізу експериментальних даних з результатами розрахунків за критеріями міцності: Цая-Хіла, Цая-Бу, Хофмана, Мізеса та максимальних напружень.

1. Експериментальне дослідження

1.1. Матеріали

Досліджувалися два типи термопластиків: PLA-Cg+ (PLA-пластик з 5 % наповненням з шаруватого графіту) і PLA-CCF (PLA-пластик з 10 % наповненням з вуглецевих волокон). Основними перевагами цих пластиків є безпечність при використанні, стабільність розмірів надруківаних виробів і простота друку - відсутність деламінації між шарами та хороша адгезія до платформи. Властивості досліджуваних пластиків наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Властивості матеріалів

Параметри	PLA-Cg+	PLA-CCF
Діаметр філаменту, мм	1,75	1,75
Густина, г/см ³	1,29	1,15
Рекомендована температура платформи, °C	50–70	30–60
Температура екструдера °C	200–220	200–220
Швидкість друку, мм/сек	30–70	30–60

1.2. Зразки

Випробування на розтягання здійснювали на зразках типу 1 (рис. 1а), виготовлених згідно зі стандартом ДСТУ EN ISO 527-2:2018 [22]. Випробувань на стискання виконували на циліндричних зразках (рис. 1б), виготовлених за стандартом ASTM D695-15 [23].

Зразки були надруківані на 3D принтері ANYCUBIC I3 Mega S з двох видів композитної мононитки діаметром 1,75 мм (PLA-Cg+ Графітовий і PLA-CCF). Зразки на розтягання друкували з сьома різними кутами орієнтації укладання шарів друку $\theta(0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ)$ та трьома товщинами шару друку $h(0,1 \text{ мм}, 0,2 \text{ мм}, 0,3 \text{ мм})$ для кожного кута (рис. 2 а), а зразки на стискання – з трьома різними кутами орієнтації укладання шарів друку $\theta(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ та трьома товщинами шару друку $h(0,1, 0,2 \text{ і } 0,3 \text{ мм})$ для кожного кута (рис. 2б). Усі зразки були виготовлені зі 100% щільністю заповнення.

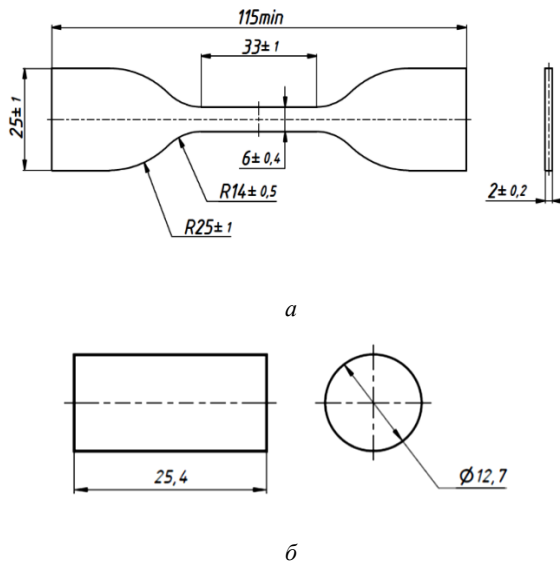


Рис. 1. Зразки (розміри в мм): а – на розтягання; б – на стискання

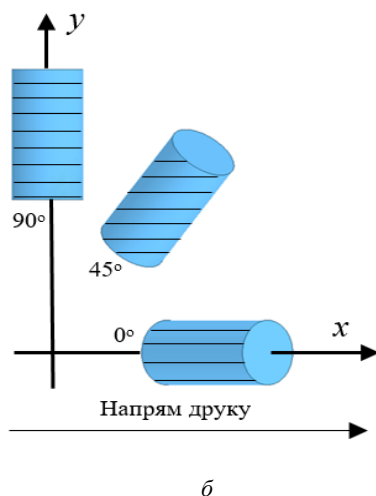
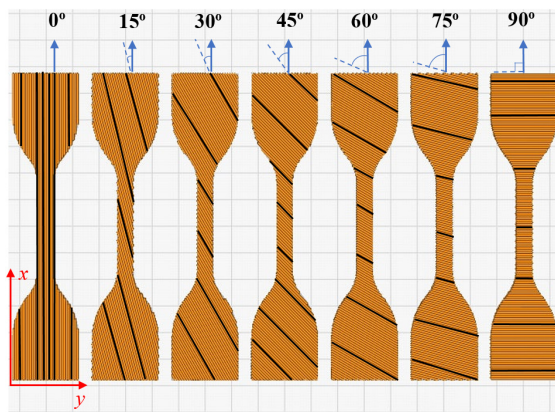


Рис. 2. Кутова орієнтація зразків: (а) на розтягання; (б) на стискання

1.3. Випробувальне обладнання

Випробування на розтягання виконували на універсальній випробувальній машині TIRATEST 2151 з точністю вимірювання переміщення траверси $\pm 0,01$ мм, діапазоном швидкості траверси від 0,5 до 1000 мм/хв і діапазоном навантаження від 0,01 Н до 5 кН.

Випробування на стискання здійснювали на універсальній машині TIRAtest-2300 з точністю вимірювання переміщення траверси $\pm 0,01$ мм, діапазоном швидкості траверси 0,00725...600 мм/хв і діапазоном навантаження від 0,001...100 кН. Граничні похибки при вимірюванні осьової сили були меншими за $\pm 1\%$.

1.4. Результати випробувань

Попередньо досліджувались характеристики мононитки композитних пластиків, результати випробувань наведені в таблиці 2. Для кожної мононитки досліджувалось по 5 зразків.

Таблиця 2. Міцність монониток

Мононитка	Максимальне напруження σ_{max} , МПа	Модуль Юнга E, МПа	Деформація руйнування ϵ , %
PLA-Cg+	51 \pm 1,5	2380 \pm 40	9,3 \pm 0,5
PLA-CCF	42 \pm 1,3	2940 \pm 50	2,6 \pm 0,2

За результатами випробувань отримано середні значення границь міцності на розрив, модуля Юнга, та подовження при руйнуванні. У таблиці 3 і 4, наведені границі міцності при розтягу і стиску, модуль Юнга і граничні деформації при розтягу і стиску для двох матеріалів з 3 товщинами, де: T_0° , T_{45° , T_{90° і C_0° , C_{45° , C_{90° – границі міцності за умов розтягу і границі пропорційності за умов стиску з кутами друк 0° , 45° і 90° відповідно; E_0° , E_{45° , E_{90° – модуль Юнга з кутами друк 0° , 45° і 90° відповідно.

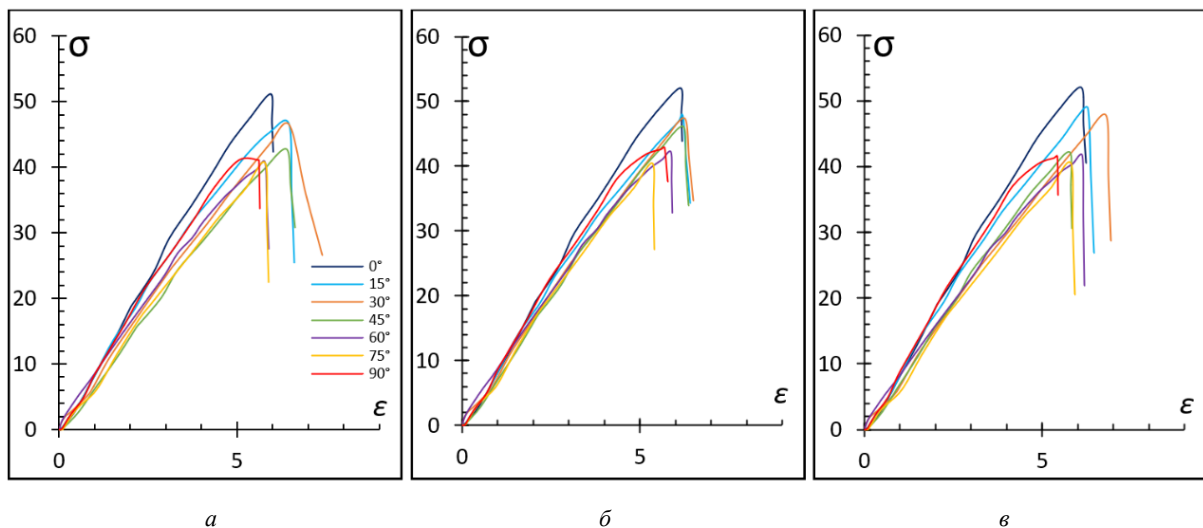
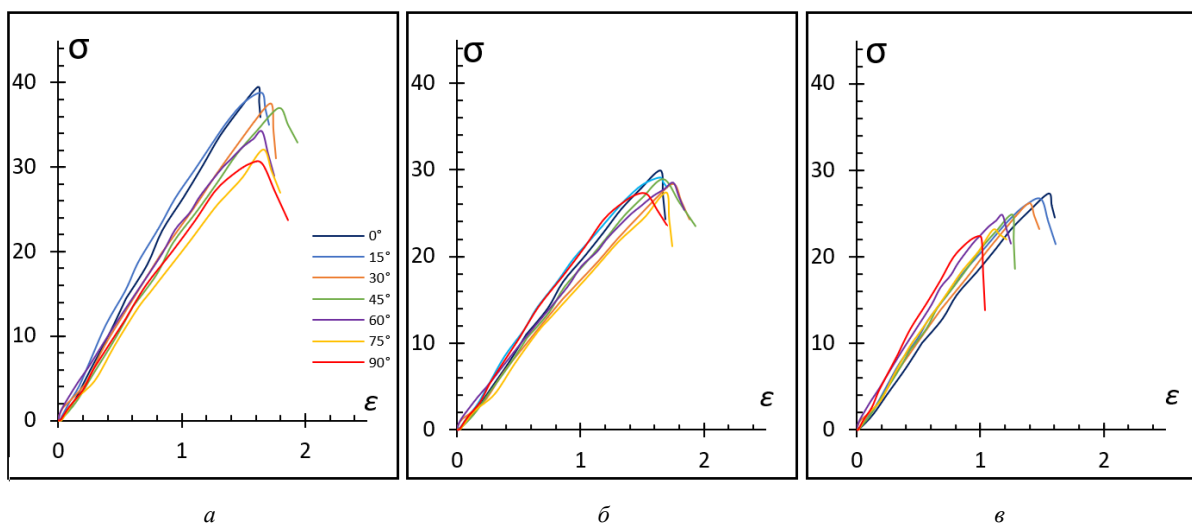
На рис. 3–4 представлені діаграми деформування на розтяг.

Таблиця 3. Результати випробувань зразків виготовлених з PLA-Cg+

Характеристика	0,1 мм	0,2 мм	0,3 мм
T_0°	51,20	52,09	52,01
T_{45°	42,71	46,18	42,14
T_{90°	41,04	42,84	41,47
C_0°	84,50	82,15	78,25
C_{45°	53,40	44,95	35,40
C_{90°	73,70	44,00	49,30
E_0°	963,03	1087,00	1055,22
E_{45°	960,28	982,08	1032,47
E_{90°	982,08	1096,58	1057,67

Таблиця 4. Результати випробувань зразків виготовлених з PLA-CCF

Характеристика	0,1 мм	0,2 мм	0,3 мм
T_{0°	39,49	37,05	30,44
T_{45°	29,88	28,95	27,11
T_{90°	27,31	24,92	22,25
C_{0°	47,80	45,50	48,10
C_{45°	14,60	24,20	28,80
C_{90°	29,60	26,30	30,80
E_{0°	2830,67	1878,28	1677,34
E_{45°	2028,18	1616,14	1616,14
E_{90°	1559,64	1473,00	1394,75

Рис. 3. Діаграми деформування у координатах напруження σ (МПа) і відносне видовження ϵ (%) PLA-Cg+za за товщини друку: (а) 0,1 мм; (б) 0,2 мм; (в) 0,3 ммРис. 4. Діаграми деформування у координатах напруження σ (МПа) і відносне видовження ϵ (%) PLA-CCF за товщини друку: (а) 0,1 мм; (б) 0,2 мм; (в) 0,3 мм

З аналізу представлених результатів можна зробити висновок, що за розтягання зразки з меншою товщиною шару друку мають як вищу границю міцності, так і більше відносне видовження. За стискання найбільше значення границі пропорційності досягається також за найменшої товщини шару друку. Результати випробувань на стискання і відповідні діаграми деформування детально описані в роботі [24]. Аналіз впливу різних типів армування мононитки PLA на механічні властивості матеріалів при розтяганні і стисканні, засвідчив, що зразки, виготовлені з композитної мононитки на основі PLA-Cg+, мають вищі значення характеристик міцності ніж зразки, що виготовлені з PLA-CCF.

2. Прогнозування міцності

Для здійснення аналітичних розрахунків було введено дві системи координат, що представлені на рис. 5. Система координат $l2$, яка представляє напрямки в матеріалі і система координат xu – напрямки навантаження. Для прогнозування міцності використовувались найбільш розповсюджені підходи оцінювання міцності анізотропних матеріалів [17, 25].

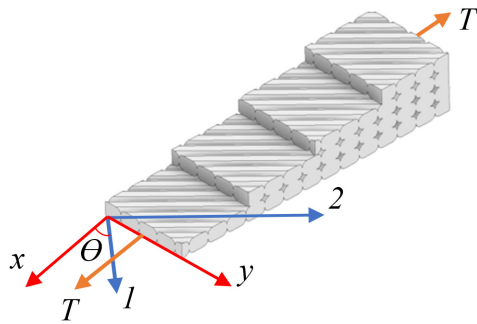


Рис. 5. Система координат $l2$ і xu

2.1. Оцінювання міцності згідно критерія Цая-Хіла [26]

Анізотропний критерій текучості у тривимірному просторі можна виразити у наступному вигляді [26]:

$$(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

де F, G, H, L, M, N є параметрами анізотропії.

Рівняння (1) можна спростити до вигляду (2) як для поперечних ізотропних матеріалів. Площина координат 23 являє собою поперечну ізотропну площину в системі координат матеріалу. Тоді матеріал у напрямку 2 та напрямку 3 мають однакові механічні властивості. Таким чином рівняння (1) набуде наступного вигляду:

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X_t^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (2)$$

Якщо у напрямку навантаження зразка є лише компонента σ_x , то ми можемо отримати компоненти напружень у системі матеріалу,

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_\theta \cos^2 \theta \\ \sigma_2 = \sigma_\theta \sin^2 \theta \\ \tau_{12} = -\sigma_\theta \sin \theta \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

Посадивши між собою рівняння (2) і (3) ми отримаємо вираження для σ_x в залежності від кутової орієнтації.

$$\sigma_x = T_\theta = \left[\frac{\cos^4 \theta}{X_t^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X_t^2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y_t^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

де X_t – границя міцності за умов розтягу в головному напрямку 1; Y_t – границя міцності за умов розтягу в головному напрямку 2; S – границя міцності на зсув в площині 12; T_θ – границя міцності в залежності від кутової орієнтації ($T_{0^\circ} = X, T_{90^\circ} = Y$)

З рівняння (4) можна отримати вираження для міцності у площині зсуву

$$S_{HT} = \left[\frac{1}{T_\theta^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta} - \frac{1}{X_t^2} \cdot \frac{\cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} - \frac{1}{Y_t^2} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \theta} + \frac{1}{X_t^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

При наявності експериментальних даних для границі міцності матеріалу у напрямку під 45° можна спростити рівняння (5) і отримати

$$S_{HT} = \left[\frac{4}{T_{45^\circ}^2} - \frac{1}{Y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

На основі рівняння (4) і (6) була отримана теоретична модель для прогнозування границі міцності

$$T_\theta = \left[\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S_{HT}^2} - \frac{1}{X^2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

2.2. Оцінювання міцності згідно критерію Цая-Ву [27]

Критерій міцності Цая-Ву в загальному випадку враховує різницю між границями міцності при розтягу і стиску, залежність міцності від напрямку дотичних напружень при зсуві і не має в собі зайвих параметрів, що дозволяє з легкістю визначити головні осі міцності [27]. Для поперечно ізотропних матеріалів критерій можна записати в наступному вигляді:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (8)$$

Компоненти тензорів напружень F_{ij} можуть бути визначені наступним чином:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}; & F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}; \\ F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c}; & F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c}; \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2}; & -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}} &\leq F_{12} \leq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

де X_c – границя міцності за умов стиску в головному напрямку l ; Y_c – границя міцності за умов стиску в головному напрямку 2 .

Поеднавши між собою рівняння (3) і (8, 9) ми отримуємо вираження для σ_x в залежності від кутової орієнтації.

$$\begin{aligned} \sigma_x = T_\theta &= \frac{-(F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta) +}{2(F_{11} \cos^4 \theta + F_{22} \sin^4 \theta +} \\ &+ (F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta)^2 -} \\ &+ F_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + F_{12} \cos^2 \theta \sin^2 \theta) \\ -4(F_{11} \cos^4 \theta + F_{22} \sin^4 \theta + F_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta +} \\ &+ F_{12} \cos^2 \theta \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

З рівняння (8 і 10) можна отримати вираження для міцності у площині зсуву

$$S_{TW} = \left[\sigma_\theta \left(\frac{\sin^2 \theta}{F_1} + \frac{\cos^2 \theta}{F_2} \right) + \frac{\sin^2 \theta}{F_{11} \cos^2 \theta} + \frac{\cos^2 \theta}{F_{22} \sin^2 \theta} + \frac{1}{2F_{12}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

При наявності експериментальних даних для границі міцності матеріалу у напрямку під 45° можна спростити рівняння (11) і отримати

$$S_{TW} = \left[T_{45^\circ} \left(\frac{\sin^2 \theta}{F_1} + \frac{\cos^2 \theta}{F_2} \right) + \frac{1}{F_{11}} + \frac{1}{F_{22}} + \frac{1}{2F_{12}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

На основі рівняння (10) і (12) була отримана теоретична модель для прогнозування границі міцності

$$\begin{aligned} T_\theta &= \frac{-(F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta) +}{2(F_{11} \cos^4 \theta + F_{22} \sin^4 \theta +} \\ &+ (F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta)^2 - 4(F_{11} \cos^4 \theta + F_{22} \sin^4 \theta +} \\ &+ F_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + F_{12} \cos^2 \theta \sin^2 \theta) \\ &+ F_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + F_{12} \cos^2 \theta \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{TW}^2}$$

2.3. Оцінювання міцності згідно критерію Хофмана [28]

Даний критерій є розширеним варіантом критерію Цая-Хілла і враховує властивості при розтягу і стиску та базується на сумі лінійних і квадратних інваріантів напружень. Для нашого випадку його можна представити наступним чином:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (14)$$

$$F_{12} = \frac{1}{X_t X_c} \quad (15)$$

Таким чином міцність у площині зсуву можна визначити за рівнянням (12), а теоретична модель для прогнозування границі міцності за рівнянням (13) враховуючи визначення коефіцієнту F_{12} .

2.4. Оцінювання міцності згідно узагальненого критерія Мізеса [29, 30]

Узагальнений критерій міцності Мізеса відрізняється від критерія Цая-Ву коефіцієнтом F_{12} :

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \quad (16)$$

Таким чином вираження для міцності у площині зсуву набуде вигляду:

$$S_M = \left[T_{45^\circ} \left(\frac{\sin^2 \theta}{F_1} + \frac{\cos^2 \theta}{F_2} \right) + \frac{1}{F_{11}} + \frac{1}{F_{22}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

На основі рівняння (10) і (16) була отримана теоретична модель для прогнозування границі міцності

$$\begin{aligned} T_\theta &= \frac{-(F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta) +}{2(F_{11} \cos^4 \theta + F_{22} \sin^4 \theta +} \\ &+ (F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta)^2 - 4(F_{11} \cos^4 \theta + F_{22} \sin^4 \theta +} \\ &+ F_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta - \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{2}) \\ &+ F_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta - \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{2})^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (18)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_M^2}$$

2.5. Оцінювання міцності згідно критерію максимальних напружень [30]

Згідно даного критерію, руйнування настає у тому випадку, якщо не задовольняється будь-яка з наступних умов:

$$-X_c \leq \sigma_1 \leq X_t, \quad -Y_c \leq \sigma_2 \leq Y_t, \quad -Z_c \leq \sigma_3 \leq Z_t, \quad (19)$$

$$|\tau_{12}| \leq S, \quad |\tau_{13}| \leq R, \quad |\tau_{23}| \leq Q.$$

Критерій максимальних напружень можна виразити в тензорно-поліноміальному виді наступним чином:

$$(\sigma_1 - X_t)(\sigma_1 + X_c)(\sigma_2 - Y_t)(\sigma_2 + Y_c)(\sigma_3 - Z_t)(\sigma_3 + Z_c) \times (\tau_{12} - S)(\tau_{12} + S)(\tau_{13} - R)(\tau_{13} + R)(\tau_{23} - Q)(\tau_{23} + Q) \leq 0 \quad (20)$$

Рівняння (19) можна представити в поліноміальному вигляді набуває рівняння (8) за умови, що:

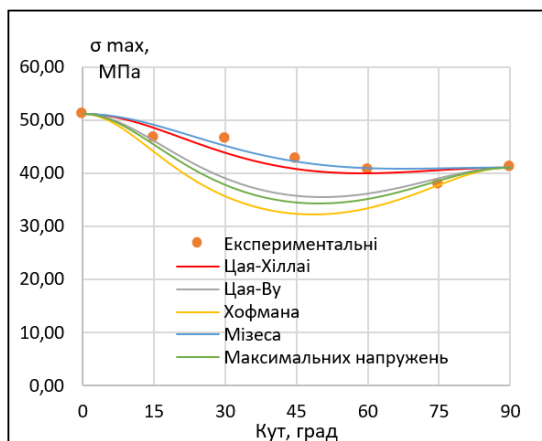
$$F_{12} = -\frac{F_1 F_2}{2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_t Y_t} + \frac{1}{X_c Y_c} - \frac{1}{X_c Y_t} - \frac{1}{X_t Y_c} \right) \quad (21)$$

Таким чином міцність у площині зсуву можна визначити за рівнянням (12), а теоретична модель для прогнозування границі міцності за рівнянням (13) враховуючи визначення коефіцієнту F_{12} згідно рівняння (21).

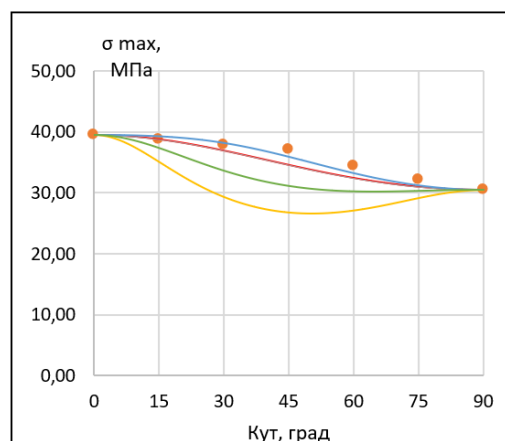
На рис. 7–9 представлено результати розрахунків на основі описаних вище критеріїв міцності у порівнянні з експериментальними даними.

Здатність критеріїв прогнозувати міцність оцінювалася шляхом аналізу середнього значення та стандартного відхилення помилки передбачення $\Delta\sigma$. Помилка передбачення визначалась, як різниця між експериментальними значеннями і розрахованими за критеріями міцності:

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\text{exp}}) - (\sigma_{\text{cr}}),$$

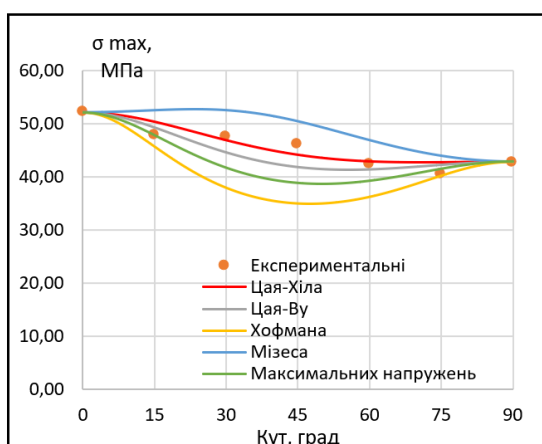


а

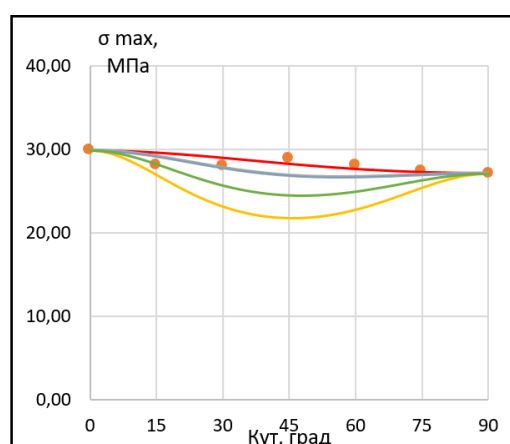


б

Рис. 7. Порівняння результатів отриманих аналітичними підходами з експериментальними значеннями для товщини друку 0,1 мм: (а) PLA-Cg+; (б) PLA-CCF



а



б

Рис. 8. Порівняння результатів отриманих аналітичними підходами з експериментальними значеннями для товщини друку 0,2 мм: (а) PLA-Cg+; (б) PLA-CCF

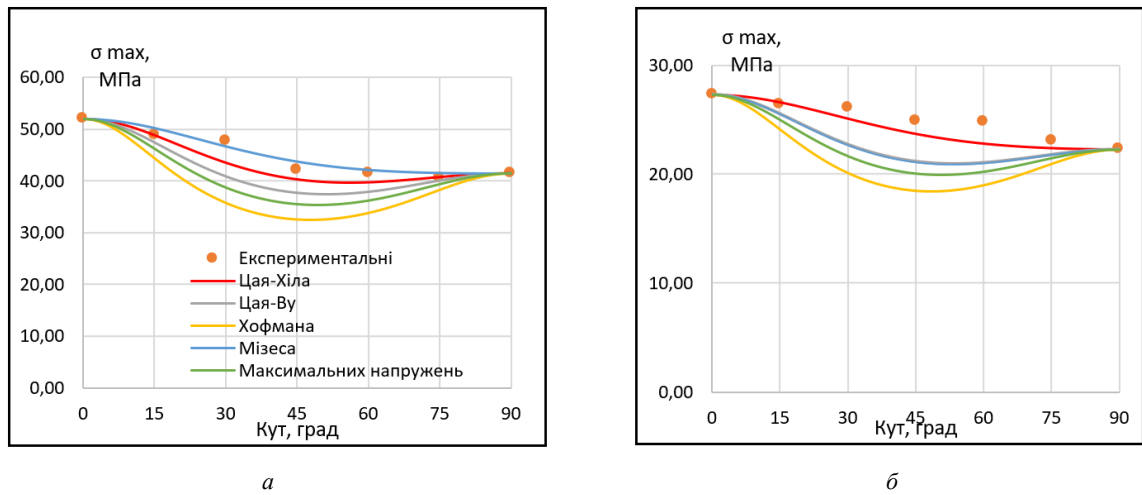


Рис. 9. Порівняння результатів отриманих аналітичними підходами з експериментальними значеннями для товщини друку 0,3 мм: (а) PLA-Cg+; (б) PLA-CCF

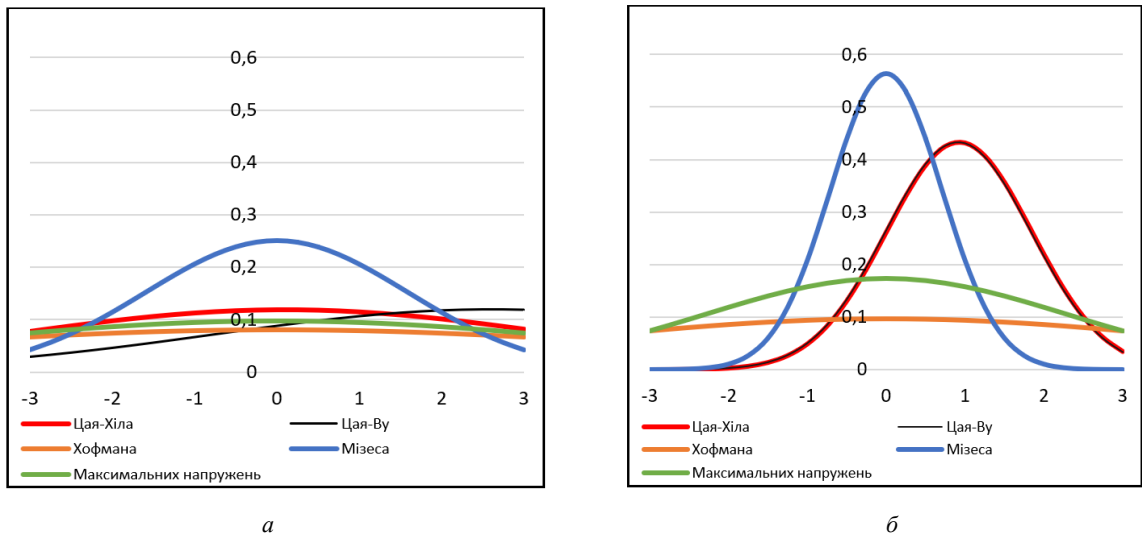


Рис. 10. Функції щільності ймовірності помилки передбачення $\Delta\sigma$ розглянутих критеріїв міцності для: (а) PLA-cg+; (б) PLA-CCF

де σ_{cr} – границя міцності, передбачена критерієм, а σ_{exp} – границя міцності, отримана в експерименті. На рис. 10 представлено функцію щільності ймовірності помилки передбачення $\Delta\sigma$ розглянутих критеріїв.

Графіки функції щільності ймовірності помилки передбачення $\Delta\sigma$, які ближчі до нульової середньої похибки і з меншим відхиленням, вказують на кращу точність моделі. Від’ємні значення вказують на неконсервативні прогнози, а додатні значення – на консервативні.

Як слідує з рис. 10, найкращі результати передбачення для досліджуваних матеріалів, демонструє узагальнений критерій Мізеса. Для обох матеріалів усі розглянуті критерії дають консервативні результати.

Висновки

У дослідженні вивчався вплив таких параметрів процесу 3D-друку як орієнтація укладання шару друку та товщина друкованого шару на механічні властивості при розтяганні та стисканні зразків, виготовлених із композитних монониток на основі PLA-Cg+ та PLA-CCF, надрукованих методом наплавлення. Отримані результати показують:

- 1) результати випробувань свідчать, що існує значний вплив досліджуваних параметрів процесу друку на механічні характеристики зразків із PLA + графіт як за розтягання, так і стискання. Здебільшого, зразки з меншою товщиною мають як вищу границю міцності (пропорційності), так і більше відносне видовження;
- 2) аналіз впливу різних типів армування моно-

нитки PLA на механічні властивості матеріалів при розтяганні і стисканні, засвідчив, що зразки, виготовлені з композитної мононитки на основі PLA-Cg+, мають вищі значення характеристик міцності ніж зразки, що виготовлені з PLA-CCF;

3) Виконано порівняльний аналіз експериментальних даних з результатами розрахунків за критеріями

міцності: Цая-Хіла, Цая-Бу, Хофмана, Мізеса та максимальних напружень. Установлено, що найкращий збіг експериментальних та розрахункових даних для обох матеріалів досягається у випадку використання узагальненого критерію Мізеса. Для критерію Хофмана і максимальних напружень отримали найгіршу кореляцію між експериментом і розрахунком.

References

- [1] D.W. Martinez *et al.*, “A comprehensive review on the application of 3D printing in the aerospace industry”, *Key engineering materials*, 913, pp. 27–34, 2022. DOI: 10.4028/p-94a9zb
- [2] K. Özsoy, B. Duman, and D.İ. Gültekin, “Metal part production with additive manufacturing for aerospace and defense industry”, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 11(3), pp. 201–210, 2019.
- [3] D.K. Yadav, R. Srivastava and S. Dev, “Design & fabrication of ABS part by FDM for automobile application”, *Materials Today: Proceedings*, 26, pp. 2089–2093, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.451
- [4] L. Jiménez *et al.*, “Polylactic acid (PLA) as a bioplastic and its possible applications in the food industry”, *J Food Sci Nutr*, 5(2), pp. 2–6, 2019. DOI: 10.24966/FSN-1076/100048
- [5] C.Y. Liaw and M. Guvendiren, “Current and emerging applications of 3D printing in medicine”, *Biofabrication*, 9(2), 024102, 2017. DOI: 10.1088/1758-5090/aa7279
- [6] T.M. Medibew, “A comprehensive review on the optimization of the fused deposition modeling process parameter for better tensile strength of PLA-printed parts”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. DOI: 10.1155/2022/5490831
- [7] Ł. Miazio, “Impact of print speed on strength of samples printed in FDM technology”, *Agricultural Engineering*, 23, 2019. DOI: 10.1515/agriceng-2019-0014
- [8] Choi Young-Hyu *et al.*, “Influence of Bed Temperature on Heat Shrinkage Shape Error in FDM Additive Manufacturing of the ABS-Engineering Plastic”, *World Journal of Engineering and Technology*, 04(03), pp. 186–92, 2016. DOI: 10.4236/wjet.2016.43D022
- [9] A. Pandzic, D. Hodzic and A. Milovanovic, “Effect of Infill Type and Density on Tensile Properties of Plamaterial for FDM Process”, *Annals of DAAAM & Proceedings*, 30, 2019. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.074
- [10] Gebisa, Aboma Wagari, and Hirpa G. Lemu, “Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile Property of Ultem 9085”, *Procedia Manufacturing* 30. pp. 331–38, 2019. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.047
- [11] Zhuo Xu, Rakel Fostervold and Nima Razavi, “Seyed Mohammad Javad. Thickness effect on the mechanical behavior of PLA specimens fabricated via Fused Deposition Modeling”, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 33, pp. 571–577, 2021. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.10.063
- [12] Z. Yu *et al.*, “Study on effects of FDM 3D printing parameters on mechanical properties of polylactic acid”, in *Proc. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 688, No. 3, p. 033026, November, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/688/3/033026
- [13] J.F. Rodriguez, J.P. Thomas and J.E. Renaud, “Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength”, *J. Mech. Des.*, 125(3), pp. 545–551, 2003. DOI: 10.1115/1.1582499
- [14] M.G. Aruan Efendy and K.L. Pickering, “Comparison of strength and Young modulus of aligned discontinuous fibre PLA composites obtained experimentally and from theoretical prediction models”, *Composite structures*, 208, pp. 566–573, 2019. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.057
- [15] Y.E. Belarbi *et al.*, “Effect of printing parameters on mechanical behaviour of PLA-flax printed structures by fused deposition modelling”, *Materials*, 14(19), 5883, 2021. DOI: 10.3390/ma14195883
- [16] R.E. Przekop *et al.*, “Graphite modified polylactide (PLA) for 3D printed (FDM/FFF) sliding elements”, *Polymers*, 12 (6), 1250. 2020. DOI: 10.3390/polym12061250
- [17] P.P. Lepihin and V.A. Romashenko, “Methods and findings of stress-strain state and strength analyses of multilayer thick-walled anisotropic cylinders under dynamic loading (Review). Part 3. Phenomenological strength criteria”, *Streng. Mater.*, 45(3), pp. 271–283, 2013.
- [18] L.P. Kollar and G.S. Springer, *Mechanics of composite structures*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 480 p. DOI: 10.1017/CBO9780511547140
- [19] Failure Criteria in Fibre-Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford - Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Elsevier, 2004, 1255 p.
- [20] E. Zile, D. Zeleniakiene and A. Aniskevich, “Characterization of Polylactic Acid Parts Produced Using the Fused Deposition Modelling”, *Mech Compos Mater*, 58, pp. 169–180, 2022. DOI: 10.1007/s11029-022-10021-6
- [21] O. Lampron *et al.*, “Characterization of the non-isotropic tensile and fracture behavior of unidirectional polylactic acid parts manufactured by material extrusion”, *Additive Manufacturing*, 61, 103369, 2023. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103369

- [22] *Plastmasy. Vyznachennia vlastyvostei pid chas roztrahuvannia*. Chastyna 2. Umovy vyprobuvannia dlia plastmas, vyhotovlenykh metodom formuvannia ta ekstruzii, DSTU EN ISO 527-2:2018 (EN ISO 527-2:2012, IDT; ISO 527-2:2012, IDT).
- [23] ASTM D695–15, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA, USA, 2015; Vol. 08.01, pp. 1–8.
- [24] V.V. Rubashevskiy, S.M. Shukayev and A.M. Babak, “Effect of 3D Printing Process Parameters on the Mechanical Characteristics of Graphite-Modified Polylactide in Compression Tests”, *Strength Mater*, 2023. DOI: 10.1007/s11223-023-00496-6
- [25] M. Kryshchuk, S. Shukayev and V. Rubashevskiy, “Modeling of Mechanical Properties of Composite Materials Under Different Types of Loads”, *Nonlinear Mechanics of Complex Structures*, Advanced Structured Materials, vol 157. Springer, Cham. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-75890-5_3
- [26] V.D. Azzi and S.W. Tsai, “Anisotropic strength of composites”, *Exp. Mech.* 5(5), pp. 283–288, 1965.
- [27] M.L. Benzeggagh, K. Khellil and T. Chotard, “Experimental determination of Tsai failure tensorial terms for unidirectional composite materials”, *Compos. Sci. Technol.* 55(2), pp. 145–156, 1995. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00098-4
- [28] S.W. Tsai and E.M. Wu, “A general theory of strength for anisotropic materials”, *J. Compos. Mater.* 5(1), pp. 58–80, 1971.
- [29] O. Hoffman, “The brittle strength of orthotropic materials”, *J. Compos. Mater.*, 1, pp. 200–206, 1967.
- [30] R.V. Mises, “Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen”, *Mathematisch-Physikalische Klasse*, pp. 582–592, 1913.
- [31] W.H. Yang, “A Generalized von Mises criterion for yield and fracture”, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.* 47(2), pp. 297–300, 1980. DOI: 10.1115/1.3153658

The strength and elastic property of PLA + graphite composites: experimental and theoretical analyses

V. Rubashevskiy, S. Shukayev

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Background. The combination of additive technologies with reinforced materials opens up new vistas for creating lightweight and durable products having unique characteristics. Implementing these technologies into the production requires effective evaluation methods of the ultimate limit state of such products.

Objective. The article deals with the mechanical properties of samples, manufactured by the method of surfacing FDM with two polylactide-based thermoplastic threads: PLA-Cg+ with 5% layered graphite filling and PLA-CCF with 10% carbon fiber filling.

Methods. The impact of 3D printing process parameters, such as print orientation and layer thickness, on specimens' mechanical characteristics under conditions of tension and compression, has been experimentally researched.

Results. It is shown that both print orientation and layer thickness substantially influence specimens' mechanical properties of both materials. A comparative analysis of experimental data with calculations by failure criteria has been carried out: Tsai-Hill, Tsai-Wu, Hoffman, Mises, and maximum stresses.

Conclusions. The results of the tests proved that there is a significant influence of the studied parameters of the printing process on the mechanical characteristics of PLA + graphite specimens under both tension and compression. For the most part, samples with a smaller thickness have both a higher ultimate strength (limit of proportionality) and a greater relative elongation. It is defined that the best concurrence between experimental and calculated data for both materials can be achieved through using the generalized von Mises criterion.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; fused deposition modeling; PLA-Cg+; PLA-CCF; mechanical properties; failure criteria.