

Технологія і механічні властивості армованого неперервним волокном 3D-друкованого термопластичного композиту

В.В. Соловей¹ • А.Я. Карвацький¹

Received: 26 November 2022 / Revised: 3 February 2023 / Accepted: 15 February 2023

Проблематика. Адитивні технології на базі методів моделювання пошаровим наплавленням (МПН) привертають велику увагу як промисловості, так і дослідницьких груп, що пояснюється низькими інвестиційними витратами, простотою виробництва тощо. У разі правильного вибору параметрів обробки можна отримати вироби з механічними властивостями близькими до виробів, отриманих за традиційними технологіями.

Мета. Практична реалізація модернізованої технології для 3D-друку зразків полілактиду (ПЛА), армованих неперервним кевларовим волокном, за методом ПНМ та визначення їхніх механічних властивостей.

Методика реалізації базується на експериментально-теоретичних дослідженнях границі міцності на розрив та модуля пружності і включає випробування експериментальних зразків на електромеханічній машині SHIMADZU AGS-X і розв'язання оберненої задачі напружено-деформованого стану, відповідно.

Результати. Надруковано експериментальні зразки термопластичного композиту (ПЛА+волокно Кевлар \varnothing 0,3 мм) та проведено їх випробування на розтяг. За інтервалу довірчої імовірності 0,68 похибка визначення границі міцності на розрив становить 3,5%, а модуля пружності – 4,5%. Встановлено, що міцність на розрив армованого композиту порівняно з неармованим за об'ємної частки кевлару близько 12% збільшується в 2,38 рази, а модуль пружності – в 1,45 рази. Отримано теоретичну залежність для прогнозування модуля пружності термопластичних композитів в напрямку армування в діпазоні зміни ступеня армування до 15%.

Висновки. Обґрунтовано застосування адитивних технологій на базі ПНМ для 3D-друку термопластичних композитів з підвищеними механічними властивостями.

Ключові слова: адитивне виробництво, моделювання пошаровим наплавленням, екструдер, полілактид, кевлар, композит, механічні властивості.

Вступ

Адитивне виробництво на основі екструзії матеріалів (Material Extrusion Additive Manufacturing (ME-AM)), також відоме як моделювання пошаровим наплавленням (Fused Deposition Modeling (FDM)), метод виготовлення плавлених ниток (Fused Filament Fabrication (FFF)), моделювання плавлених шарів (Fused Layer Modeling (FLM)) або 3D-друк, є однією з найбільш широко використовуваних технологій виробництва полімерних виробів [1]. Адитивні технології на

базі зазначених методів привертають велику увагу як промисловості (аерокосмічної, автомобільної), медичної галузі та архітектури тощо, так і дослідницьких груп, оскільки їх можна ефективно використовувати для виробництва кінцевих споживачів. Їх популярність пояснюється поєднанням низьких інвестиційних витрат, доступності широкого асортименту матеріалів й простоти виготовлення [2]. Крім того, якщо правильно вибрати параметри обробки, то можна отримати вироби з механічними властивостями, до виробів, отриманих за традиційними технологіями [1, 2].

✉ А.Я. Карвацький
anton@rst.kpi.ua

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У праці [1] експериментально досліджено вплив кута орієнтації заповнення на залежність границі текучості від швидкості деформації для зразків матеріалу

полілактиду (polylactid acid (PLA)), виготовлених за технологією (ME-AM). Показано, що як і очікувалося, квазіізотропні зразки з конфігурацією ($0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$) мають значення границі текучості між зразками з поздовжнім (0°) і поперечним (90°) друком, відповідно.

Працю [2] присвячено систематичному і критичному огляду літератури, пов'язаної з проектуванням процесів 3D-друку і моделюванням за методом FDM та аналогічним адитивним виробництвом на основі екструзії ME-AM або процесами швидкого прототипування. Показано, що FDM та подібні процеси є одними з найпоширеніших процесів швидкого прототипування, які все більше застосовуються у виробництві готових деталей. Ключові елементи типових процесів, включаючи механізм подачі матеріалу, розріджувач і друкарське сопло; поверхня платформи 3D-принтера та середовище; та описані підходи до обробки деталей. Представлено підходи до оцінки крутного моменту двигуна та потужності, необхідних для досягнення бажаної швидкості подачі стренги. Розглянуто моделі потрібного теплового потоку, зсуву в розплаві, перепаду тиску в зріджувачі тамоделі, в яких враховується розбухання матриці та її охолодження. Також розглянуто підходи до моделювання розповсюдження наплавленої стренги матеріалу та їх з'єднання одна з одною.

У праці [3] досліджено вплив типу армувального волокна (вуглець, скло та кевлар) та їхньої об'ємної частки на властивості міцності на зсув та розтягування зразків композитів (смола/волокно), надрукованих методом FDM. Експериментальні результати показали, що додавання безперервних волокон підвищує міцність на зсув і на розрив FDM-3D-друкованих композитів, але міцність не зростає зі збільшенням вмісту волокна, оскільки зі зростанням вмісту волокон якість друку знижується за рахунок збільшення пористості між волокнами. Ступінь посилення напруження зсуву зразків з різними типами волокон можна класифікувати таким чином: скловолокно > вуглецеве волокно > кевларове волокно.

Працю [4] присвячено експериментальному дослідженню впливу армування арамідним волокном зразків поліетилентерефталат гліколю (Polyethylene terephthalate glycol (PETG)), надрукованих за допомогою модифікованого настільного 3D-принтера, на їхні механічні властивості. Проаналізовано, як розмірні параметри друку, такі як висота шару та ширина стренги, впливають на об'ємну частку волокон та їх дисперсію в надрукованих композитах. При цьому внутрішня структура експериментальних односпрямованих зразків змінювалася від неармованого PETG до PETG+арамідне волокно (безперервна шарувата структура) з вмістом волокон від 20 до 45 об.%. Встановлено, що надруковані композити мають хороше вирівнювання волокон, а модуль пружності під час розтягування в напрямку волокна збільшується від 2,2 ГПа (неармований) до 33 ГПа (45 об.%), тоді як модуль пружності під час вигину збільшується з 1,6 ГПа (неармований) до 27 ГПа (45 об.%).

У праці [5] виконано дослідження мікроструктури та механічних властивостей 3D-друкованих композитів на основі поліамідної (Polyamide (PA)) матриці, армованої безперервним карбоновим волокном (Continuous Carbon Fibers (CCF)), з різною структурою CCF/PA, надрукованих методом FFF, а також розглянуто застосування прогнозних моделей. Показано, що найвища жорсткість і міцність спостерігається в односпрямованих композитах. Виявлено, що зниження механічних властивостей під час розтягування, отримане для поперечного шару та квазіізотропного ламінату, можна описати за допомогою кута укладання волокон. Встановлено, що прогнози, отримані за допомогою методу середньооб'ємної жорсткості та класичної теорії, добре узгоджувалися з результатами випробування на розтяг.

Працю [6] присвячено дослідницькій роботі з розробки альтернативної нитки FDM з використанням нейлону 6, порошоків Al і Al_2O_3 на базі існуючої системи FDM виробника без зміни апаратно-програмного забезпечення. Встановлено, що пропорції інгредієнтів ниток мають значний вплив на міцність на розрив, модуль пружності та подовження. Потрібна нитка була успішно розроблена, вона має більш покращені властивості порівняно з існуючою. Встановлено, що альтернативну композитну нитку (філамент або стренга) можна отримати за допомогою екструзії за технологією FDM з використанням 3D-принтера базової конструкції.

У праці [7] наведено аналіз сучасного стану створення композитних виробів на основі полімерної матриці та армувальних волокон із застосуванням адитивних технологій методом FDM і результатам дослідження їхніх фізико-механічних властивостей. Встановлено, що до основних недоліків технології адитивного виробництва на базі методу FDM належить анізотропія властивостей готових виробів, що спричинює значно меншу міцність деталей у поперечному напрямку до напрямку 3D-друку (напрямку накладання стренги), порівняно з поздовжнім тощо. Розроблено модернізації способу просторового друку та вузла екструдера для подолання відмічених недоліків 3D-друку методом FDM.

У пат. № UA131264U та № UA131263U з метою вдосконалення процесу 3D-друку виробів з композитних матеріалів методом FDM запропоновано технічні рішення, що стосуються способу тривимірного друку полімерних виробів та вузла екструдера, відповідно.

Пропоноване технічне рішення за патентом № UA131263U вирішує задачу вдосконалення способу 3D-друку полімерних виробів, у якому нова реалізація способу забезпечує зміцнення контакту між полімерними волокнами, з яких сформовано виріб, шляхом їх додаткового спікання, що покращує механічні властивості одержуваних виробів.

Технічне рішення за пат. № UA131264U вирішує задачу друку односпрямованих композитних виробів таким чином: в екструдері пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів, який містить механізм подачі прутка полімерного матеріалу, канал для

просування полімерного матеріалу з волокнистим матеріалом, нагрівальний блок і сопло, новим є те, що екструдер містить додатковий канал подачі волокнистого матеріалу, що з'єднаний на виході із сопла з каналом для просування полімерного матеріалу (рис. 1).

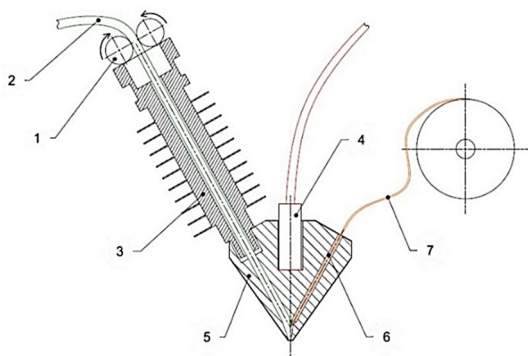


Рис. 1. Ескіз модернізованого екструдера для 3D-друку армованих полімерних виробів за патентом (пат. № UA131264U): 1 – механізмом подачі; 2 – пруток; 3 – канал; 4 – нагрівальний блок; 5 – сопло; 6 – додатковий канал; 7 – волокнистий матеріал

Таким чином, за рахунок запропонованої модернізації екструдера за пат. № UA131264U досягається можливість створення композитних полімерних виробів, наповнених безперервним волокнистим матеріалом, що сприяє підвищенню їх міцності та жорсткості.

На підставі проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій стану питання розвитку адитивних технологій МЕ-АМ впливає такий висновок. До невирішених питань проблеми виробництва та використання композитних виробів методами просторового друку FDM, FFF та FLM відносяться такі: розглянуті модернізації 3D-принтерів для швидкого прототипування термопластичних композитних виробів потребують або практичної реалізації, або подальшої апробації; оскільки композитні вироби, отримані за технологіями МЕ-АМ, мають унікальні механічні властивості залежно від обраних матриці та армувального волокна, матеріального складу та способу їх виробництва, то для практичного їх застосування потрібно дані з виконати фізичних властивостей цих матеріалів, що свою чергу обумовлює потребу в дослідженні/прогнозуванні вказаних властивостей за допомогою експериментальних та/або теоретичних методів.

Постановка задачі

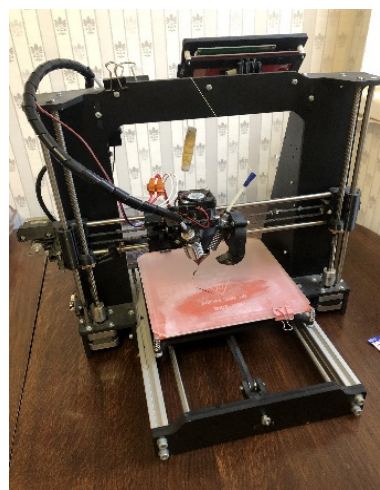
Метою дослідження є практична реалізація модернізованої технології для 3D-друку зразків PLA, армованих неперервним кевларовим волокном, за методом FDM та визначення їхніх механічних властивостей.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі задачі:

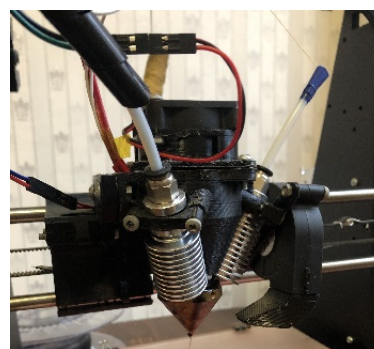
- модифікувати екструдер 3D-принтер для друку односпрямованих композитів за пат. № UA131264U, відпрацювати технологію та надрукувати експериментальні зразки;
- провести експериментальні дослідження механічних властивостей дослідних зразків односпрямованих композитів та виконати оцінку похибки їх вимірювання;
- виконати теоретичні дослідження механічних властивостей зразків односпрямованих композитів та порівняти їх з відповідними експериментальними даними;
- з використанням теоретичних досліджень отримати прогноз механічних властивостей односпрямованих композитів залежно від ступеня їх армування.

Експериментальні дослідження механічних властивостей термопластичних композитів

За пат. № UA131264U розроблено модернізований екструдер та проведено налаштування 3D-принтера базової конструкції для просторового друку армованих полімерних виробів за методом FDM (рис. 2).



a



б

Рис. 2. 3D-принтер (*a*) з модернізованим екструдером (*б*) для просторового друку односпрямованих термопластичних (полімерних) композитів за методом FDM



Рис. 3. Експериментальні зразки односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм), надруковані на модернізованому 2D-принтері методом FDM (розмір стренгу $1,2 \times 0,3$ мм)

З використанням розроблено та виготовленого екструдера (див. рис. 2) було надруковано експериментальні зразки односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм) методом FDM (рис. 3).

Випробування експериментальних зразків односпрямованого полімерного композиту на розрив здійснювалося на електромеханічній тестовій машині SHIMADZU AGS-X 10 kN [8]. Технічні характеристики SHIMADZU AGS-X 10 kN наведено в табл. 1.

Результати випробування 11 зразків односпрямованого полімерного композиту, надрукованих на модернізованому 3D-принтері методом FDM, наведено в табл. 2. Оцінку похибки вимірювання модуля пружності і границі міцності зразків односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR) виконано за методикою, наведеною у працях [9, 10], з використанням даних табл. 1, 2.

Діаграми розтягування (деформування) дослідних зразків наведено на рис. 4. Експериментальні дані границі міцності зразків односпрямованого полімерного композиту з границями достовірності наведено на рис. 5.

Таблиця 1. Технічні характеристики SHIMADZU AGS-X 10 kN [8]

Параметр		Значення
Діапазон швидкості розтягнення зразків під час тестів		0,001–1000 мм/хв.
Похибка відпрацювання швидкості розтягнення		в межах $\pm 0,1\%$ тестової швидкості
Точність позиції хрестовини		$\pm 0,1\%$ від зазначеного значення або $\pm 0,01$ мм, залежно від того, що більше
Точність вимірювання сили під час тестів	Високоточні тензодатчики	в межах $\pm 0,5\%$ від зазначеного випробувального зусилля (для 1/1 до 1/500 номінальної потужності тензодатчика)
	Датчики навантаження стандартної точності	в межах $\pm 1\%$ від зазначеного випробувального зусилля (для 1/1 до 1/500 номінальної потужності тензодатчика)
Ефективна ширина		425 мм

Таблиця 2. Результати випробування 11 зразків односпрямованого полімерного композиту на тестовій машині SHIMADZU AGS-X

Номер зразка	F_{\max} , Н	t_{\max} , с	S , мм ²	ΔL_{\max} , мм	σ_p , МПа	E , ГПа
1	3082,70	24,45	23,22	2,038	132,75	4,676
2	3070,57	28,53	19,46	2,378	157,78	5,793
3	3253,18	34,87	28,48	2,906	114,23	3,623
4	3310,95	29,56	25,73	2,090	128,68	4,392
5	3147,27	28,12	23,44	2,241	134,26	4,745
6	3105,76	25,92	19,89	2,428	156,14	5,449
7	3356,39	26,38	27,52	2,286	121,93	3,959
8	3008,43	22,01	20,67	2,273	145,54	5,301
9	3151,29	24,91	21,99	2,499	143,29	4,990
10	3246,68	25,37	24,78	2,151	131,02	4,411
11	3020,17	22,69	20,26	2,560	149,07	5,417
Середнє значення	3159,39	26,62	23,22	2,350	137,70	4,796

Примітка: F_{\max} – максимальне (пікове) навантаження; t_{\max} – період до пікового навантаження; S – початкова площа поперечного перерізу зразка; ΔL_{\max} – максимальне подовження зразка; $\sigma_p = F_{\max}/S$ – границя міцності на розрив; E – модуль пружності під час однобічного розтягу

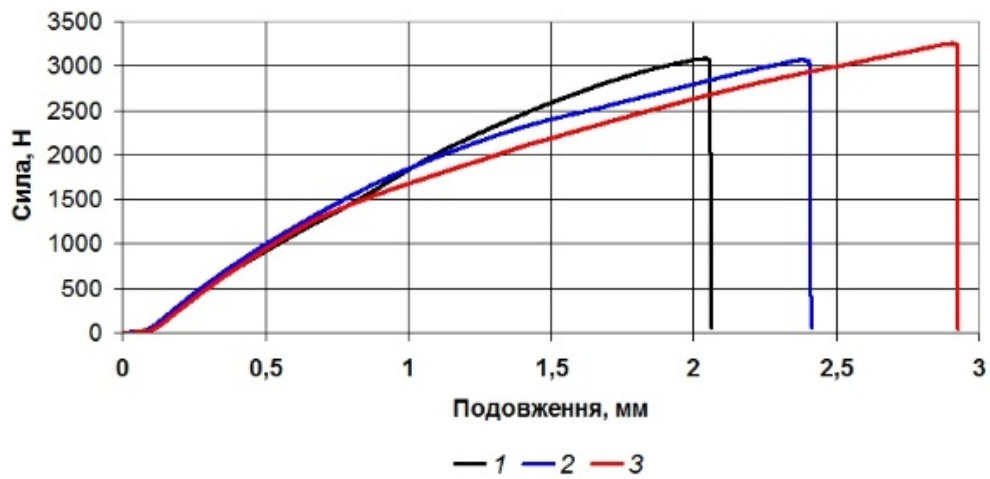


Рис. 4. Характерні діаграми деформування дослідних зразків односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм)

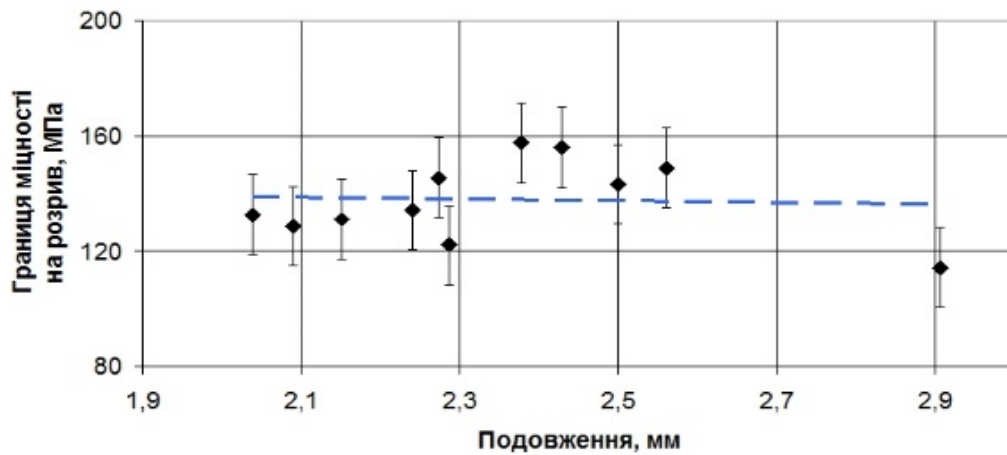


Рис. 5. Границя міцності σ_p дослідних зразків односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм)

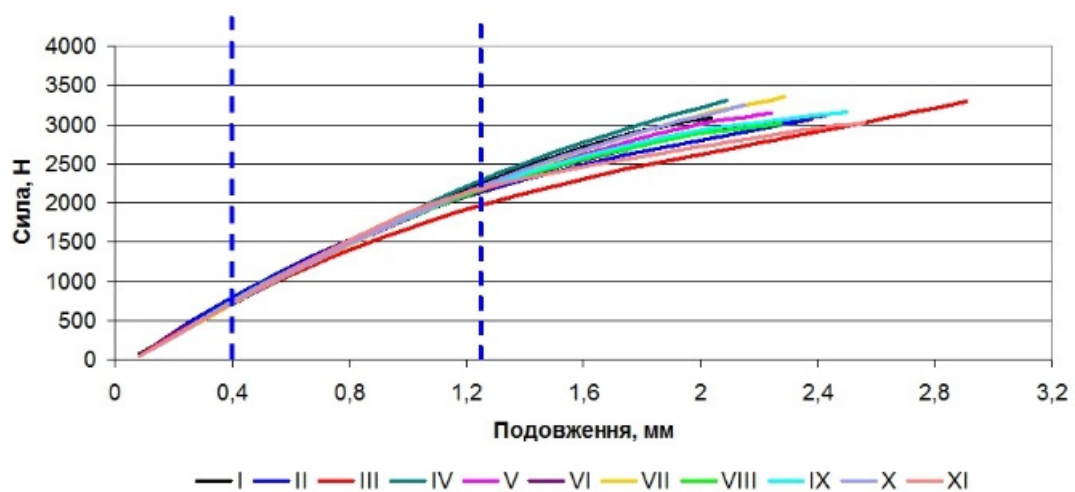


Рис. 6. Діаграми деформування дослідних зразків односпрямованого полімерного композиту з виділенням діапазоном умовної пропорційності (0,4–1,25) мм

Кориговане стандартне відхилення (вибіркова дисперсія) для σ_p (див. рис. 5) для вибірки (дослідних зразків) $n \leq 50$ визначалося за формулою [9,10] для інтервалу довірчої імовірності 0,68:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

де S – стандартне відхилення; x_i – i -й елемент вибірки; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – середнє арифметичне вибірки; n – розмір вибірки.

З використанням діаграм деформування дослідних зразків (рис. 6) нескладно визначити модуль пружності на ділянках умовної пропорційності за формулою:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2)$$

де $\sigma = \frac{F}{S}$ – напруження, Па; $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ – деформація; ΔL – подовження зразка, м; $L=0,06$ м – довжина бази зразка.

Результати визначення модуля пружності дослідних зразків односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм) за формулою (3) наведено в табл. 2. За результатами оцінки похибки експериментальних даних встановлено, що за інтервалу довірчої імовірності 0,68 похибка визначення границі міцності на розрив становить $\varnothing 3,5\%$, а модуля пружності під час одновісного розтягнення – $\varnothing 4,5\%$.

Теоретичні дослідження механічних властивостей термопластичних композитів

Для порівняння експериментальних даних з теоретичними розроблено відповідну числову модель [11], якій відтворено усереднені геометричні параметри дослідних зразків (рис. 7).

Механічні властивості матриці й армувального волокна односпрямованого полімерного композиту наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Механічні властивості матриці й армувального волокна

Матеріал	ρ , кг/м ³	E , ГПа	ν	σ_p , МПа
PLA	1230	3,3	0,4	57,8
KEVLAR волокно	–	15,23	0,49	631

Для уточнення механічних властивостей волокна KEVLAR, що наведено в табл. 3, використано усереднені експериментальні дані з границі міцності (див. табл. 2), за якими виконано коригування модуля пружності та границі міцності армувального матеріалу. Для перевірки скоригованих значень E і σ_p (див. табл. 3) також були проведені експериментальні дослідження механічних властивостей волокна KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм, за результатами яких отримано, що $E = 15,76$ ГПа, а $\sigma_p = 653$ МПа. Розбіжність між уточненими та експериментально одержаними значеннями цих властивостей становить: для модуля пружності – 3,36 %, а для границі міцності – 3,37%.

За результатами числового аналізу напружено-деформованого стану (НДС) односпрямованого композитного зразка (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм) отримано теоретичне значення модуля пружності в напрямку армування $E_3^T = 4,769$ ГПа. Розбіжність з усередненим експериментальним значенням модуля пружності $E_3^T = 4,796$ ГПа становить $\delta E_3 = 0,56\%$.

Порівняння результатів експериментального і теоретичного визначення модуля пружності односпрямованого композитного зразка (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм) в напрямку армування також наведено на рис. 8.

На рис. 8 також наведено границі достовірності експериментальних значень, отриманих за формулою (2).

З метою прогнозування механічних властивостей односпрямованих композитів (PLA+волокно KEVLAR) за різного значення об'ємної частки армувального волокна α_f також проведено числове моделювання НДС за різного значення діаметра нитки (0; 0,1; 0,2) мм (табл. 4, рис. 9).

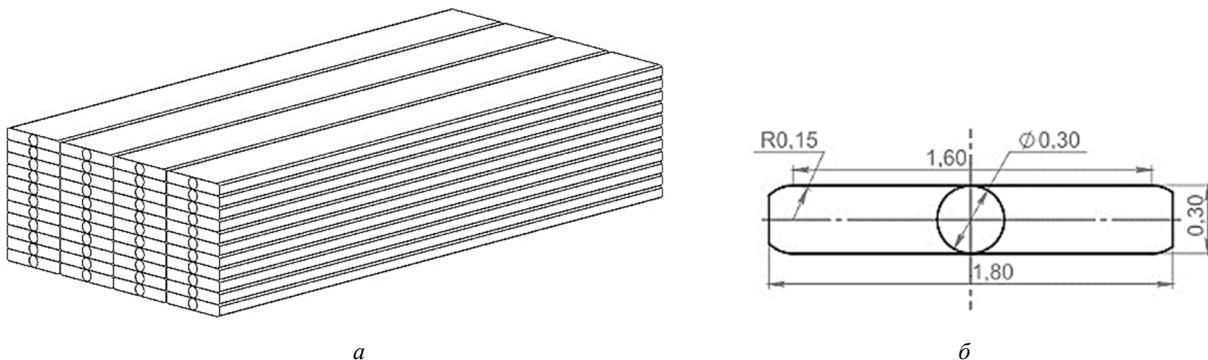


Рис. 7. Геометрична модель для дослідження модуля пружності зразка односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR $\varnothing 0,3$ мм): *a* – твердотільна модель; *б* – ескіз

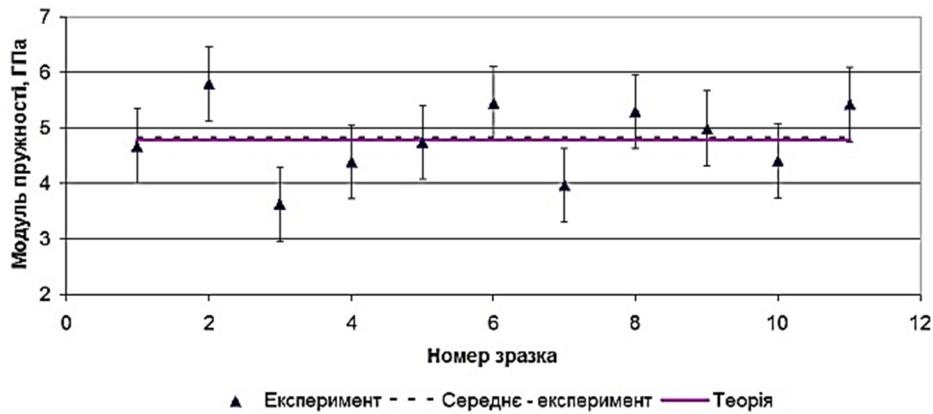


Рис. 8. Порівняння результатів експериментального і теоретичного визначення модуля пружності односпрямованого композитного зразка (PLA+волокно KEVLAR Ø0,3 мм) в напрямку армування

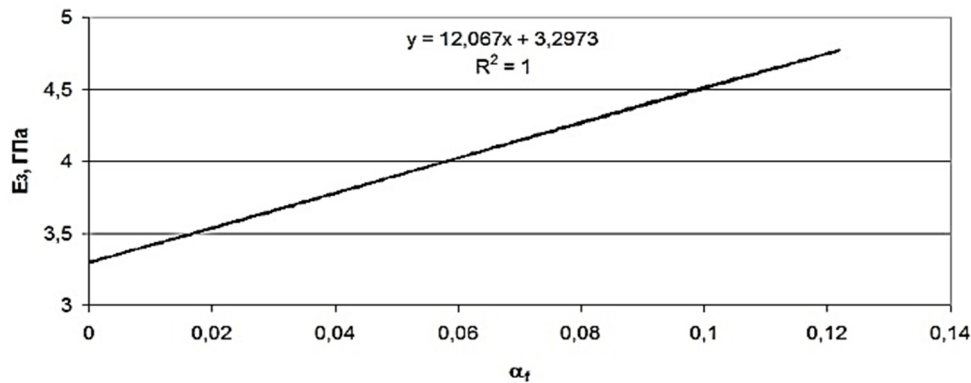


Рис. 9. Графік залежності $E_3(\alpha_f)$

Таблиця 4. Результати теоретичного визначення E_3 односпрямованих композитів (PLA+волокно KEVLAR) за різного значення α_f

Матеріал	α_m	α_f	E_3 , ГПа
PLA	0,992	0	3,3
PLA+волокно KEVLAR	0,977	0,015	3,474
	0,933	0,058	3,999
	0,869	0,122	4,769

Базуючись на результатах порівняння теоретичних даних з експериментом (див. рис. 8) можна зробити такий висновок, що залежність $E_3(\alpha_f) = 3,297 + 12,067\alpha_f$ придатна для прогнозування E_3 односпрямованих композитів (PLA+волокно KEVLAR) в діапазоні зміни струменя армування до 15%.

Границя міцності на розрив армованого полімеру PLA волокном KEVLAR порівняно з неармованим за об'ємної частки армувального волокна близько 12% зростає у 2,38 рази, а модуль пружності – в 1,45 рази, відповідно.

Висновки

1. Для забезпечення можливості 3D-друку термопластичних композитних виробів за методом FDM проведено модернізацію вузла екструдера (пат. № UA131264U) 3D-принтера базової конструкції та виконано його налаштування.

2. За допомогою розробленого та виготовленого екструдера надруковано експериментальні зразки односпрямованого полімерного композиту (PLA+волокно KEVLAR Ø0,3 мм) за методом FDM та виконано їх випробування на розрив на електромеханічній тестовій машині SHIMADZU AGS-X. За результатами випробувань отримано експериментальні дані з границі міцності та модуля пружності в напрямку армування композиту.

3. Встановлено, що границя міцності на розрив армованого полімеру PLA волокном KEVLAR порівняно з неармованим за об'ємної частки армувального волокна близько 12% зростає в 2,38 рази, а модуль пружності – в 1,45 рази, відповідно. За результатами оцінки похибки експериментальних даних показано, що за інтервалу довірчої імовірності 0,68 похибка визначення границі міцності на розрив становить 3,5%, а модуля пружності

під час одновісного розтягнення – 4,5%, а за довірчої імовірності 0,95–7% і 9%, відповідно.

4. З використанням числового аналізу НДС одностороннього композитного зразка (PLA+волокно KEVLAR Ø0,3 мм) отримано теоретичне значення модуля пружності в напрямку армування, за результатами якого встановлено, що розбіжність з усередненим експериментальним значенням модуля пружності не перевищує 0,6%.

5. Отримано теоретичну залежність для прогнозування модуля пружності односторонніх термопластичних композитів (PLA+волокно KEVLAR) в напрямку армування в діапазоні зміни ступеня армування до 15%.

Подяка. Автори висловлюють подяку PhD, асистенту кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського Володимиру Олександровичу Олексішену за допомогу в проведенні випробувань на розтяг зразків термопластичних композитних матеріалів.

References

- [1] W. M. H. Verbeeten and M. Lorenzo-Bañuelos, “Material Extrusion Additive Manufacturing of Poly (Lactic Acid): Influence of infill orientation angle”, *Additive Manufacturing*, vol. 59, pp. 10307911-16, 2022. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103079
- [2] B. Turner, R. Strong and S. Gold, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling”, *Rapid Prototyp J.*, vol. 20, no. 3, pp. 192–204, 2014. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012
- [3] Y. Zhuang, B. Zou, S. Ding and P. Wang, “Shear and Tensile Behaviors of Fiber-Reinforced Resin Matrix”, *Composites Printed by the FDM Technology. Coatings*, vol. 12, pp. 1000-1-13, 2022. DOI: 10.3390/coatings12071000
- [4] S. Rijckaert *et al.*, “Continuous Fiber-Reinforced Aramid/PETG 3D-Printed Composites with High Fiber Loading through Fused Filament Fabrication”, *Polymers*, vol. 14, pp. 298-1-16, 2022. DOI: 10.3390/polym14020298
- [5] F. Lupone *et al.*, “Experimental Characterization and Modeling of 3D Printed Continuous Carbon Fibers Composites with Different Fiber Orientation Produced by FFF Process”, *Polymers*, vol. 14, pp. 426-1-26, 2022. DOI: 10.3390/polym14030426
- [6] J. Singh, R. Singh and S. Sharma, “Effect of processing parameters on mechanical properties of FDM filament prepared on single screw extruder”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, part 5, pp. 886–892, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.166
- [7] V.V. Solovei and V.O. Oleksyshen, “Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei kompozytnykh materialivotrymanykh z vykorystanniam adyativnykh tekhnolohii”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*, Series “Chemical engineering, ecology and resource saving”, no 1(20), pp. 9–21. 2021. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2021.228078
- [8] SHIMADZU. AGS-X Series Universal Electromechanical Test Frames. Available: <https://www.ssi.shimadzu.com/products/universal-tensile-testing/ags-x-specifications.html> [Accessed Jan. 25, 2021]
- [9] A.N. Zaidel', *Elementarnye otsenki oshibok izmerenii*. Leningrad: Nauka, 1968.
- [10] A.Yu. Pedchenko *et al.*, *Teoretychno-eksperymentalnidoslidzhennia pechei grafituvannia Kastnera*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. Available: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20800>
- [11] V.V. Solovei *et al.*, “Vyznachennia mekhanichnykh vlastyvostei 3D-drukovanykh polimernykh vyrobiv metodamy strukturnoi mekhaniky”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*, Series “Chemical engineering, ecology and resource saving”, no 2(20), pp. 16–32, 2021. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2021.235853

Technology and mechanical properties of reinforced continuous fiber 3D-printed thermoplastic composite

V.V. Solovei¹, A.Ya Karvatskii¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Background. Additive technologies based on Fused Deposition Modeling (FDM) modeling methods attract a lot of attention from both industry and research groups, which is explained by low investment costs, ease of production, etc. If the processing parameters are correctly selected, products with mechanical properties close to products obtained by traditional technologies can be obtained.

Objective. Practical implementation of the modernized technology for 3D printing of Polylactid Acid (PLA) samples reinforced with continuous Kevlar fiber using the FDM method and determination of their mechanical properties.

Methods is based on experimental and theoretical studies of the limit of tensile strength and modulus of elasticity of the composite and includes testing of samples on the SHIMADZU AGS-X testing machine and solving the inverse problem. **Results.** Experimental samples of thermoplastic composite (PLA+Kevlar fiber Ø0.3 mm) were tested for tension. It was found that the tensile strength of the reinforced composite compared to the unreinforced one with a Kevlar volume fraction of about 12% increases by 2.38 times, and the modulus of elasticity increases by 1.45 times. With a confidence interval of 0.68, the error of determining the ultimate tensile strength is 3.5%, and the modulus of elasticity is 4.5%. A theoretical dependence was obtained for predicting the modulus of elasticity of thermoplastic composites in the range of changes in the degree of reinforcement up to 15%.

Conclusions. The application of additive technologies based on FDM for 3D printing of thermoplastic composites with increased mechanical properties is substantiated.

Keywords: additive manufacturing, fused deposition modeling, extruder, polylactid acid, kevlar, composite, mechanical properties.