

## ФОРМУВАННЯ ТОНКИХ СТІНОК У ВИРОБАХ ІНЖЕНЕРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ FDM ПРИНТИНГОМ

Д. Ю. Джулій<sup>1</sup>, В. М. Орел<sup>2</sup>, А. Ю. Гаврушкевич<sup>1</sup>, А. О. Костенко<sup>1</sup>  
О. Ф. Саленко<sup>1</sup>, К. В. Аврамов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського;

<sup>2</sup> Харківський національний університет внутрішніх справ, Кременчуцький льотний коледж;

<sup>3</sup> Інститут проблем машинобудування імені А. М. Підгорного НАН України

**Анотація.** Досліджено можливість створення зразків інженерного призначення стільникових циліндричних систем. Для їх виконання застосовували принтери різних сфер застосування. Показано, що в цілому за умови раціонального розміщення підтримок можна отримати задовільні результати. При цьому точність основних розмірів забезпечується не гірше ніж по 11...12 квалітету, а товщина стінок стільників обумовлюється режимами викладання філаменту і в цілому дорівнює не менш ніж 1,5 діаметрів використовуваного сопла.

Показано, що стільникові елементи повинні видруковуватися із залученням додаткових засобів підтримки; оскільки при планарному викладанні філаменту присутня значна кількість дефектів, бажано враховувати цей чинник при визначенні основних механічних властивостей матеріалу виробу при його статичному та динамічному силовому аналізі.

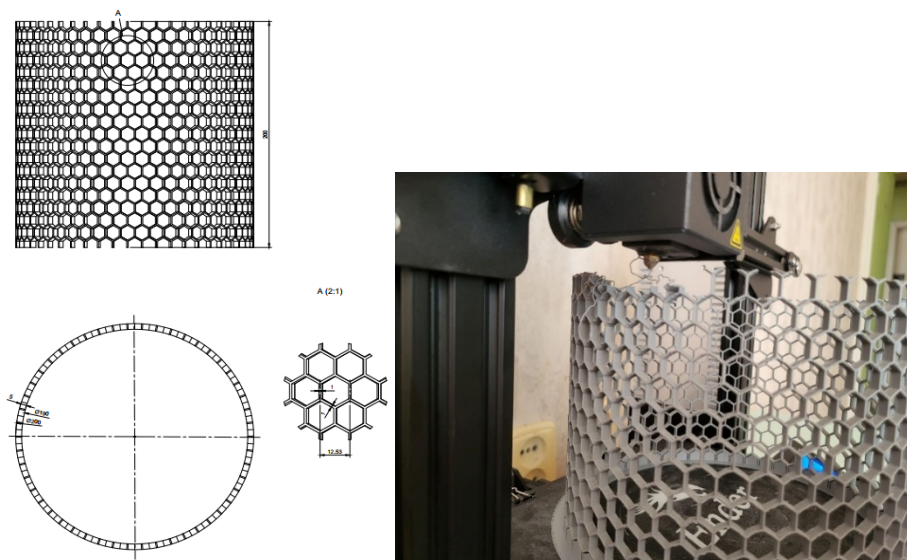
Подальші дослідження мають бути направлені на зміну умов сполучення армувальника і створення сітки перехресного плетіння, здатної поширюватися поза межі безпосередньої оболонки екструдованого філаменту.

**Ключові слова:** 3-д друк, точність, стільникові системи, дефекти

Проблеми створення циліндричних оболонок, особливо стільникових систем, розглядалися у ряді робіт, зокрема, [1], [2]. Нами також було запропоновано використовувати для цієї задачі принтер із столом у вигляді обертового циліндричного лейнера, [3], що дозволяло за умови достатньо простих удосконалень принтера отримувати досить якісні заготовки.

Однак у переважній більшості випадків, дана задача може вирішуватися для принтерів класичних схем, зокрема, тих, які було обрано для роботи, [4].

З цією метою було досліджено можливість створення зразків інженерного призначення стільникових циліндричних систем, параметрична модель якої подана на рис.1, за умови що розміри варіантів виготовлення наведені в табл. 1.



**Рис. 1.** Параметрична модель стільникової оболонки (а) із варіюваними розмірами (діаметра  $D_n$ , мм, висоти стільника  $h$ , мм, кроку стільникових комірок  $T$ , мм та товщини стінок  $\delta$ , мм та висоти зразка в цілому  $H$ , мм) та дефекти стінки (б)

Така модель застосовувалась як внутрішня вставка циліндричного стільникового баку. Модель формували на принтерах Creality Ender 3, Bambolab K1S, Creality K1C, JGAurora. Розмірний аналіз виробів довів, що попри різницю у використовуваних принтерах, в цілому усі вироби відповідали IT11...IT9, що в цілому допустимо.

Таблиця 1.

**Розміри стільникових систем циліндричної форми**

№	Тип стільника	Параметри елементів стільників				
		$D_n$ , мм	$h$ , мм	$T$ , мм	$\delta$ , мм	$H$ , мм
1	Стільник із зовнішньою стінкою тестовий, PLA	160	10	12,5	1,0	40
		158,5	10,6	11,9	1,15	41,1
2	Стільник із внутрішньою стінкою тестовий, PLA	160	10	12,5	1,0	150
		158,8	10,2	11,4	1,2	152,2
3	Стільник без стінки тестовий, PLA	160	10	12,5	1,0	150
		159,1	10,5	11,1	1,25	151,8
4	Стільник зразковий із зовнішньою стінкою, PLA	200	6	12,5	0,5	200
		200,8	6,3	11,9	0,65 ... 0,7	201,8
5	Стільник зразковий без зовнішньої стінки, PLA	200	5	12,5	0,5	200
		200,5	5,5	12,3	0,65 ... 0,7	200,5
6	Стільник зразковий без зовнішньої стінки, PLA-C	200	5	12,5	0,5	200
		201,1	5,4	12,1	0,58	200,9

В чисельнику задане значення, в знаменнику усереднене виміряне

Для друку використовували два типи пластиків – звичайний полілактид PLA та полілактид, армований вуглецевим волокном PLA-CF. Основні механічні властивостя пластиків подані в табл.2.

Таблиця 2

**Порівняння механічних характеристик філаментів, що зазначаються виробником, із результатами випробувань тестових зразків**

Назва	Міцність на розрив, МПа		Модуль Юнга, МПа, $\times 10^3$		Ударна в'язкість, Дж/м <sup>3</sup>		Термостійкість, °C	
	Заявлена	Експерим.	Заявлена	Експерим.	Заявлена	Експерим.	Заявлена	Експерим.
PLA-C	59-63	58,4	1,68-1,96	1,65	66-92	74	59	65
PLA	28-32	33,1	1,2-1,3	1,24	53-135	90	76	82

При друкуванні було звернуто увагу на те, що сама конструкція стільників є нежорсткою, з багатьма консольними елементами, що вкрай ускладнює екструзійне викладання матеріалу. Навіть на початкових шарах досить часто формуються дефекти у вигляді зрушень перетинок та втрати консольних елементів, розташованих під кутом, рис. 1,б.

При цьому залучення додаткових опор у вигляді деревоподібних структур покращує надійність процесу, передує відриванню заготовки від основи та поліпшує геометричну точність виробу, сприяє зростанню рівня відтворюваності моделі незалежно від типу принтера.

Стільники циліндричні піддавали зважуванню, рис.3,а. Це дозволяло оцінити витрату пластику та стабільність процесу викладання. Встановлено, що вага практично усіх надрукованих виробів склала 70 г, із розсіюванням цього параметра у межах 12 г.

Оскільки кількість виготовлених зразків стільників є достатньо обмеженою (виготовлено зразкових 6 шт, у тому числі, 1 зразок із PLA-C, а також один зразок із зовнішньою стінкою), статистичну обробку даних виконати було вкрай складно. Саме тому було виконане мікроскопічне дослідження зрізів та елементів стільників, які мали однотипні та порівняні



характеристики щодо трас проходу екструдеру, щільності викладання, швидкості відтворення моделі. Мікрофотографії елементів стільників показали наступне, рис.2.

Створити тонку стінку при друкуванні циліндричного стільника на першому етапі досліджень не вдалося. Практично все зводилося до того, що стінка задовільно росла вертикально, однак усі нахилені стінки внаслідок малої товщини розшаровувалися і спадали, рис.2,д. Виключення опції пошуку тонких стінок, рис. 2,а із слайсеру передбачало викладання стінки у дві нитки (оскільки товщина екструдованого пластику становила приблизно 0,38...0,42 мм, а задана стінка становила 0,5 мм, тобто програма розуміла формування стінки більш товстої). В результаті отримували задовільний переріз, рис.2.в, однак наступне формування консольного шару, рис.2.5,г,е відбувалося не тільки зі збільшенням його товщини до 1,2...1,5 мм, а й з формуванням ряду дефектів, зокрема, фантомних частин, рис.2.15,е та пластикового шламу на торцях із потоншенням перетину в місцях зміни напрямку руху головки, рис.2.15,д.

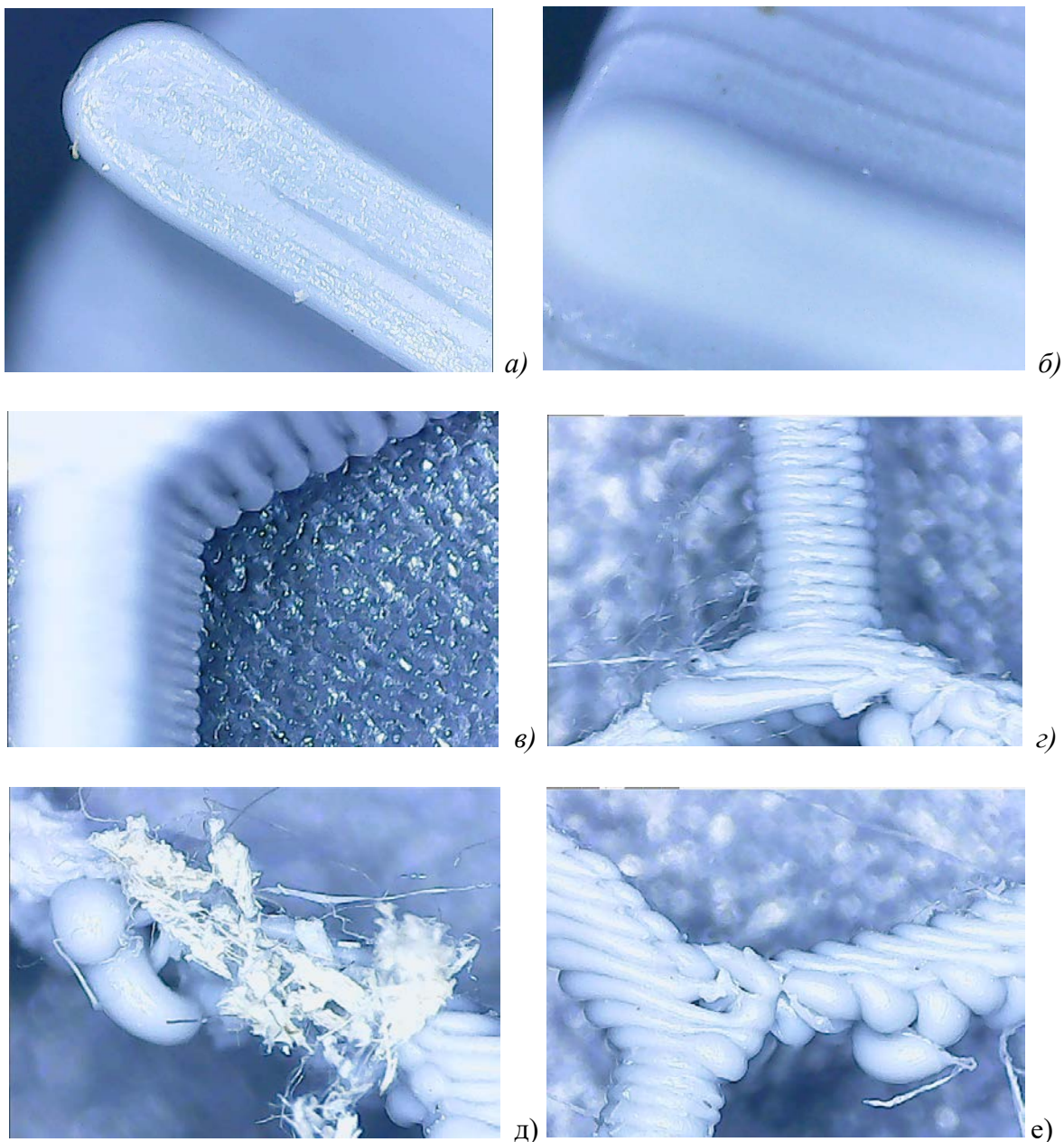


Рис. 2. Мікрофото (600x) частин стільника при горизонтальному викладанні

На етапі виготовлення зразкових стільників було застосовано опцію пошуку тонких стінок, і друк виконували на високошвидкісному принтері Bambu Lab K1S. Мікрофото отриманих виробів показало, що попри кращі геометричні параметри створених стільників щільність їх викладання все одно залишалася відносно низькою; збільшення щільності викладання викликало різке зростання кількості дефектів та унеможливило друк в цілому. Окремі фрагменти стінок стільників мали зони суцільних дефектів.

Виміри товщини  $\delta$ , мм, здійснювали групами на усіх основних площинах стільника: двох вертикальних стінках та 4 консольних, у двох взаємно-перпендикулярних перетинах вертикальною площиною стільника, із дублюванням вимірів по 5 точкам на різних висотах від основи друку, схема вимірів – рис.3,б. Виміри дублювали по 10 разів, отримавши вибірку спостережень 120 вимірів.

Результати статистичного опрацювання подані на рис.4.

Оскільки шари викладалися з товщиною 0,1 мм, для виміру контрольованих величин використовували мікрометр МК-0-10 із цифровою поділкою 0,01 мм, який завдяки плоским торцям значної площі дозволяв більш точно визначати усереднені значення контрольованих товщин. Сам стільник перед вимірами піддавали розрізанню, щоб уникнути ускладнень встановлення інструменту.

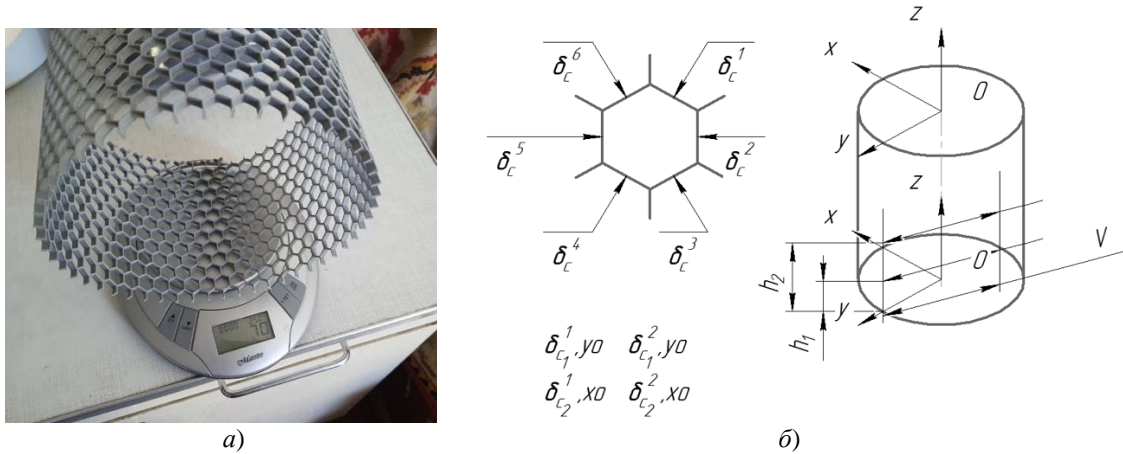


Рис. 3. Зважування циліндричних стільників (а) та схема вимірів геометричних параметрів комірок (б)

Діаграма рис. 4,а, свідчить, що в цілому вибірка значень виміряних товщин стільників за окремими елементами може бути віднесена до певної генеральної сукупності, в якій вертикальні стінки  $\delta_{c2}$  та  $\delta_{c5}$  підкоряються закону нормального розподілу із практично однаковими параметрами  $M(\delta_{c2,5})$  та  $\sigma(\delta_{c2,5})$ . Подібне можна сказати і про елементи 1,3–4 та 6. Однак між собою дисперсії неоднорідні й мають значну відмінність, тобто  $\sigma(\delta_{c2,5}) \neq \sigma(\delta_{c1,3-4,6})$ . Також відмінними є і параметри  $M$ :  $M(\delta_{c2,5}) \neq M(\delta_{c1,3-4,6})$ .

Якщо дані результати можна пояснити тим, що формування нахилених стінок є процесом із значною кількістю випадкових чинників та динамічно несталим, по відмінність відповідних усереднених дисперсій  $\sigma_j$  у функції зростання висоти виміру  $h_1-h_5$  доводить, що обмежена жорсткість виробу яка більше проявляється зі зростанням висоти, викликає більше зрушення шарів при викладанні, отже, похибки форми стають дедалі істотними, рис. 4,б.

Виконання регресійного аналізу дозволило встановити певну функціональну обумовленість зміни середньої товщини  $\delta_{ci}$  і дисперсії  $\sigma(\delta_{ci})$  контрольованих величин і констатувати, що збільшення висоти відтворюваної моделі веде до зміни параметрів шару. При цьому встановлення додаткових опор у вигляді підтримок деревної структури є доцільним і виправданим, рис. 5.



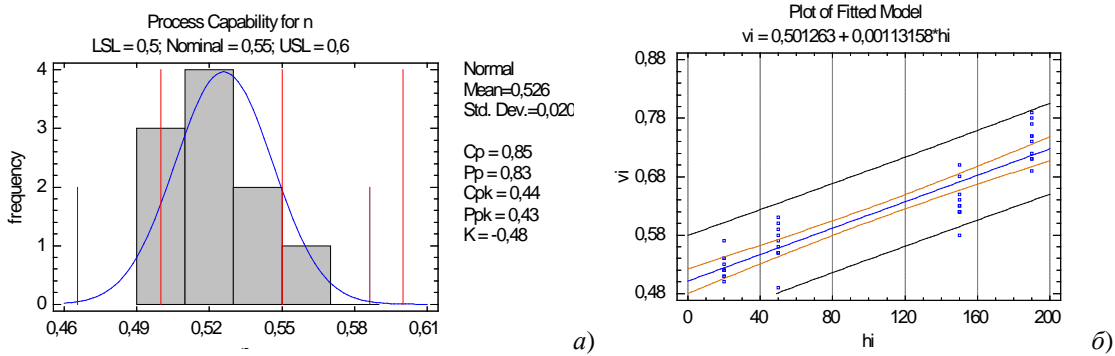


Рис. 4. Результати статистичної обробки вимірів: статистичне поле розсіювання (а) та постульована регресійні пряма (б)



Рис. 5. Виконання стільникових нежорстких систем із проміжними опорами-дендритами

Відповідно регресійні моделі (коефіцієнт кореляції не гірше за 0,82) представлені нижче:

$$k_i = 0,72 + 0,0008 \cdot h_i \quad v_i = 0,50 + 0,001 \cdot h_i$$

Виникаючі проблеми виявилися тотожними як для неармованих матеріалів, так і для армованих.

Однак порівняння мікрофотографічних зразків викладених стінок, зон утворення дефектів (переважно на гострих кутах обходу контуру) доводить, що використання армованого матеріалу, робота із децю більшими температурами екструзії дозволяє значно поліпшити як щільність викладання філаменту (із відповідним збільшенням площин адгезії) так і уникнути ряду дефектів, властивих виробим із неармованих матеріалів.

Оскільки на мікрофото спостерігалось переважно поздовжнє розташування армувальників, очікувати збільшення міцності на міжшаровому проміжку чекати не доводиться.

## Висновки

Подальші дослідження мають бути направлені на зміну умов сполучення армувальника і створення сітки перехресного

плетіння, здатної поширюватися поза межі безпосередньої оболонки екструдованого філаменту. Такі дослідження можуть реалізовуватися на основі аналізу течії потоку розплавленого філаменту як неньютонівської (реологічної) рідини із твердими включеннями.

При цьому високі стільникові елементи повинні видруковуватися із залученням додаткових засобів підтримки; оскільки при планарному викладанні філаменту присутня значна кількість дефектів, бажано враховувати цей чинник при визначенні основних механічних властивостей матеріалу виробу при його статичному та динамічному силовому аналізі.

### Перелік посилань

1. A New FDM Printer Concept for Printing Cylindrical Workpieces - Salenko, A., Kostenko, A., Tsurkan, D., ... Derevianko, I., Samusenko, A. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies This link is disabled., 2023, 178, pp. 459–483
2. Damage Development in a Cellular Axisymmetric Tank Additive-Manufactured from Plastic Filament. Part 1. Damage Development in Cellular Axisymmetric Multilayer Shells Under ... MI Bobyr, MG Kryshchuk, OF Salenko, EE Onyshchenko, DO Tsurkan, ... Strength of Materials, pp. 1–16
3. Створення ущільнених високоміцних конструкцій ракетно-космічного обладнання FDM друку ULTEM™ 9085 PEI пластиком. - O Salenko, I Derevianko, O Samusenko, K Avramov, O Lithot, V Rogulin. - Mechanics and Advanced Technologies 5 (3), 282-293
4. Manufacturing Technology, Experimental and Numerical Analysis of Static Bending of Three-Layer Composite Plate with Honeycomb Structure II Дерев'янюк, КВ Аврамов, БВ Успенський, ОФ Саленко - Проблемы машиностроения 27 (3), 25-33

## THIN-WALL FORMATION IN ENGINEERING PRODUCTS USING FDM PRINTING

D.Yu. Dzhuliy<sup>1</sup>, V.M. Orel<sup>2</sup>, A.Yu. Gavrushkevych<sup>1</sup>, A.O. Kostenko<sup>1</sup>, O.F.Salenko<sup>1</sup>, K.V. Avramov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine;

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk Flight College;

<sup>3</sup> Institute of Mechanical Engineering named after A. M. Pidgorny of the National Academy of Sciences of Ukraine

**Abstract.** The possibility of creating engineering samples of cellular cylindrical systems has been investigated. Printers of various fields of application were used for their implementation. It has been shown that, in general, with rational placement of supports, satisfactory results can be obtained. In this case, the accuracy of the main dimensions is ensured no worse than 11...12 quality, and the thickness of the honeycomb walls is determined by the filament laying modes and is generally equal to no less than 1.5 diameters of the nozzle used.

It has been shown that honeycomb elements should be printed with the involvement of additional support means; since a significant number of defects are present during planar filament laying, it is desirable to take this factor into account when determining the main mechanical properties of the product material during its static and dynamic force analysis.

Further research should be aimed at changing the conditions of the reinforcement connection and creating a cross-weaving mesh capable of extending beyond the immediate shell of the extruded filament.

**Keywords:** 3D printing, precision, cellular systems, defects.