

М. Р. ТКАЧ¹, Ю. М. ГАЛИНКІН¹, Ю. Г. ЗОЛОТИЙ¹, І. Ю. ЖУК²,
А. А. ШИНКАРЕНКО¹, О. А. КОСТРІКОВ¹

¹ Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна

² Чорноморський державний університет імені Петра могили, Миколаїв, Україна

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ РЕБЕР ЖОРСТКОСТІ НА ВІБРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D ДРУКОВАНИХ СТІЛЬНИКОВИХ БАЛОК З PLA-ПЛАСТИКУ

Аддитивне виробництво забезпечило універсальний інструмент, що дозволяє виготовляти тривимірні об'єкти будь-якої складності при мінімальних витратах матеріалу. 3D-друк на базі Fused Filament Fabrication займає домінуючі позиції в прототипному та малосерійному виробництві деталей. На стадії проєктування в залежності від передбачуваних умов експлуатації важливо забезпечити їх динамічну стійкість та міцність під впливом резонансного віброзбудження. Для цього проведено опрацювання теоретичної методики визначення частотного й модального спектрів виробу та експериментальної верифікації отриманих результатів. Досліджено вібраційні характеристики балок стільникової конструкції з PLA-пластику розмірами (мм) $192,63 \times 29,7 \times 5,0$ і кроком внутрішніх ребер 5,0 мм, створених методом 3D друку. Розглянуто однакове значення товщини обшивки та ребра. Експериментально, методом електронної спекл-інтерферометрії реального часу визначено частоти та форми коливань п'яти зразків балки стільникової конструкції з товщиною обшивки 0,8 мм. Граничні умови закріплення балки – вільні. Достовірність розрахункових значень вібраційних характеристик балки, визначених методом скінчених елементів, підтверджено експериментально. Середня квадратична похибка розрахункових значень частот складає від 0,6% для згинальних форм до 2,7% для крутильних форм коливань. Теоретично досліджено вплив товщини обшивки та ребра стільникового заповнення в діапазоні 0,8...2,0 мм на вібраційні характеристики балки. Показано, що зменшення товщини ребра (обшивки) призводить до підвищення власних частот коливань балки стільникової конструкції. Для частот крутильних форм коливань ця залежність більш суттєва, ніж для частот згинальних коливань. Доведено, що порівняно з аналогічною за зовнішніми розмірами суцільною балкою аналогічного матеріалу частоти згинальних коливань балки стільникової конструкції в залежності від товщини ребра збільшуються на 5%...15%, а крутильних – у 1,3...1,8 рази.

Ключові слова: вібраційні характеристики; спекл-інтерферометрія; балка; стільникова конструкція; метод скінчених елементів.

1. Вступ

Аддитивне виробництво, зокрема метод осадження розплавленої нитки (Fused Filament Fabrication, FFF), за останні десятиліття перетворилося з експериментальної технології на універсальний інструмент сучасного інженера, конструктора та дослідника. Це дозволяє виготовляти тривимірні об'єкти будь-якої складності без використання традиційної оснастки та при мінімальних витратах матеріалу. Завдяки гнучкості, простоті підготовки моделей, доступності обладнання й філаменту, 3D-друк на базі FFF став домінуючим методом у побутовому, прототипному, освітньому та малосерійному виробництві [4, 6, 11]. Він активно застосовується у галузях, що вимагають швидкого виготовлення індивідуалізованих конструкцій — у машинобудуванні, робототехніці, електроніці, біомедичних розробках, а також при виготовленні тимчасових або

допоміжних елементів [7, 10].

Одним з найуживаніших матеріалів у цій технології є полілактид (PLA) — біорозкладний полімер рослинного походження, що демонструє високі показники жорсткості та стабільності при кімнатній температурі. PLA не потребує термостійких камер чи додаткових адгезивних матеріалів, добре зберігає геометрію та забезпечує якісну поверхню друку. У численних дослідженнях доведено, що при відповідному підборі параметрів 3D-друку PLA здатен демонструвати міцність, порівнянну або й вищу за ABS, при нормальних умовах експлуатації [1, 2, 5, 13]. Це зумовлює широке його використання для конструкцій, до яких пред'являються вимоги легкості, жорсткості та точності. Попри це, властивості PLA залишаються чутливими до внутрішньої структури виробу, міжшарових зв'язків та параметрів друку — товщини шару, заповнення, орієнтації тощо [3, 9, 12].



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Більшість існуючих досліджень зосереджується на вивченні механічних властивостей 3D-друкованих зразків за умов розтягування-стиску, згину або зсуву. Значно менше уваги приділяється вивченню вібраційних властивостей виробів — особливо для зразків з внутрішньою сітчастою структурою, що мають неочевидну динамічну поведінку. При цьому саме динамічна надійність — здатність зразка протистояти резонансним навантаженням — критично важлива для сучасних конструкцій, що використовуються в умовах вібрацій: корпуси виробів та сенсорів, монтажні основи мікроелектроніки, легкі опори та перегородки та інше [14, 15].

У межах адитивного виробництва внутрішня структура деталей відіграє ключову роль у забезпеченні необхідних вібраційних характеристик. Вироби ситової конструкції з регулярним заповненням у вигляді певної структури дозволяють досягти значного зниження ваги без істотної втрати функціональності [2, 10]. Проте залежність частотних характеристик від геометричних параметрів внутрішньої структури — таких як товщина ребер, орієнтація структури, її симетрія та кратність відповідно до діаметра сопла — досі залишається недостатньо вивченою [3, 15, 16].

Метою цього дослідження є аналіз вібраційних характеристик 3D-друкованих пластин із PLA з внутрішньою сітчастою структурою. Особливу увагу приділено впливу зміни товщини ребер структури (у межах 0.8–2.0 мм) на власні частоти коливань. Пластини виготовлені методом FFF-друку із використанням PLA Matte на принтері Bambu Lab A1, а для їх оцінки застосовано як експериментальну методику (цифрову спекл-інтерферометрію), так і чисельне моделювання в середовищі SolidWorks. Дослідження має на меті розробити практичну методику верифікованого моделювання динамічної поведінки 3D-друкованих деталей для застосування в інженерних проєктах [17, 18].

2. Експериментальна частина

2.1. Опис експериментального стенду

Оптична схема та апаратне забезпечення стенду для дослідження вібраційних характеристик методом спекл-інтерферометрії представлені на рис.1. Джерелом когерентного світла служить твердотільний DPSS-лазер 1 з потужністю випромінювання 50 мВт та довжиною хвилі $\lambda=0,532$ мкм. Лазерний промінь оптичним клином 2 ділиться на прохідний та відбитий, формуючи канали предметного та опорного пучків. Предметний промінь, розширюється мікрооб'єктивом 3, розсіюється матовою поверхнею досліджуваної пластини 12 створює дифуз-

ну об'єктну хвилю 13. Проходячи через світлоділльник 17, вона фокусується об'єктивом відеокамери 18 на площині ПЗЗ-матриці, як предметне спекл-поле. Промінь, відбитий від світлодільного клина, розширюється мікрооб'єктивом 20, колімується лінзою 15 і розсіюється пропускаючим дифуззором 16, формуючи дифузну опорну хвилю 19. На світлоділльнику 17 вона поєднується з предметною хвилею 13 і після заломлення в об'єктиві камери утворює на поверхні матриці опорне спекл-поле. При інтерференції предметних та опорних спеклів виникає результуюче спекл-поле, що відображається відеосистемою в якості спеклограми. Її контраст буде максимальним при однакових значеннях середньої інтенсивності та узгодженій поляризації пучків, що інтерферують. Щоб уникнути деполяризації випромінювання, дифуздор 16 виконаний тонким поверхневим травленням, а для фарбування пластини використовується алюмінієва пудра. Вирівнювання значень інтенсивності здійснюється зміною інтенсивності опорної хвилі при переміщенні лінзи 15. Формування цифрових спекл-інтерферограм коливань реалізоване методом визначення контрасту динамічної картини спеклів [20]. В ньому смуги інтерференції формуються згідно розмаху мерехтіння спеклів, що виникає при низькочастотному регульованому зсуві фази опорної хвилі. Він регулюється сигналом комп'ютера, який після підсилення підсилювачем 4 подається на п'єзокерамічний актуатор оптичного клина 2.

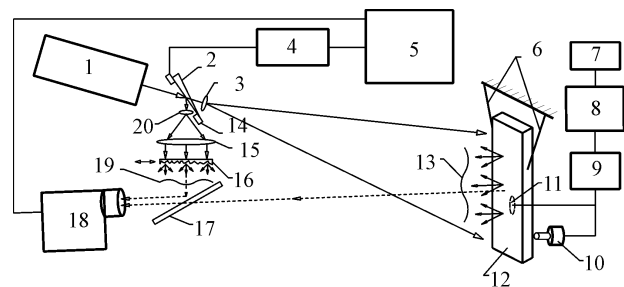


Рис. 1. Експериментальний стенд:

- 1 – лазер; 2 – оптичний клин;
- 3, 20 – мікрооб'єктиви; 4, 9 – підсилювачі низької частоти; 5 – персональний комп'ютер; 6 – кріплення експериментальної пластини; 7 – електронний частотомір; 8 – звуковий генератор; 10 – акустичний збуджувач; 11 – п'єзоелемент; 12 – експериментальна пластина 13 – предметна хвиля;
- 14 – п'єзокерамічне кільце; 15 – збиральна лінза; 16 – дифуздор; 17 – світлоділльник; 18 – відеокамера; 19 – опорна хвиля

Оцінка розподілу амплітуд коливань традиційно ускладнюється високим рівнем спекл-шуму цифрової спекл-інтерферограми. Для зменшення впливу шуму запропоновано метод багатоканального усереднення N зображень ідентичної картини смуг z

некорельованими шумами [19]. Випадкові флуктуації яскравості спеклів досягаються плоским переміщенням дифузора 16 між реєстраціями інтерферограм на відстань, що перевищує розмір спекла. З цією метою дифузор змонтований на спеціальному пристрої з приводом від крокового двигуна. На усередненій інтерферограмі при цьому співвідношення сигнал/шум зростає $\sqrt{N}$ разів.

Розгорнутий опис схеми, методів та алгоритмів обробки спекл-інтерферограм розглянуто у попередніх публікаціях [19 - 21].

2.2. Граничні умови та результати експерименту

Експериментальне визначення вібраційних характеристик реалізовано для балки зовнішніми розмірами (мм) $192,63 \times 29,7 \times 5,0$ стільникової внутрішньої конструкції. Геометрична модель балки реалізована в системі SolidWorks.

Товщина обшивки та ребра – 0,8 мм. Крок внутрішніх ребер – 5,0 мм а їх товщина – 0,8 мм. Розрахункова вага деталі 21,45 грам. Ребра стільникового заповнення розташовані під прямим кутом (рис. 2а).

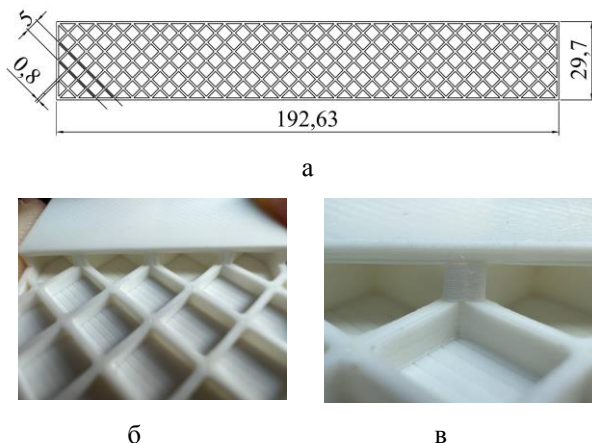


Рис. 2. Досліджувана деталь:
а – креслення видаленою верхньою обшивкою;
б, в – зображення надрукованого внутрішнього стільникового заповнення

Деталь створеною методом FFF (Fused Filament Fabrication) друку на 3D принтері Bambu Lab A1. Матеріал деталі – полілактид PLA Matte від Bambu Lab. діаметр сопла принтера – 0.4мм.

Параметри налаштування 3D принтеру: товщина шару – 0,1мм.; заповнення – 100%; температура сопла - 220°C; температура пластини - 65°C; швидкість друку – 200мм/с.;

Зразок друкованої деталі зі зрізаною верхньою обшивкою ілюструє якість реалізації цифрової моделі (див. рис. 2,б та рис. 2,в).

Експериментальне визначення частот та форм власних коливань виконано у граничних умовах, максимально наближених до вільних. Це забезпечено вертикальним підвішування балки на тонких (0,05 мм ... 0,1 мм) нитках та використанням акустичного збудження коливань (рис.3). Зовнішній вигляд розташування експериментальної балки на стенді наведено на рис.3. Колом позначена точка кріплення лівої нитки підвісу з однієї грані балки. Друга точка підвісу розташована симетрично на протилежній грані балки. Пристрій правіше балки – акустичний збуджувач.

Як свідчать результати експериментальних досліджень, у діапазоні частот до 5 кГц виявлено вісім форм згинальних та п'ять форм крутильних коливань (табл. 1). (m – кількість вузлових ліній по ширині балки)

Прямолінійна форма та координати розташування вузлових ліній на поверхні балки відповідають теоретичним значенням для суцільних балок.

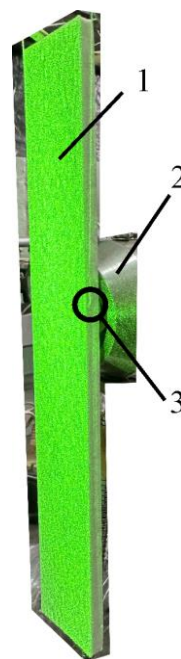


Рис. 3. Експериментальний зразок балки (1) на стенді:
2 – акустичний збуджувач, 3 – кріплення лівої нитки підвісу

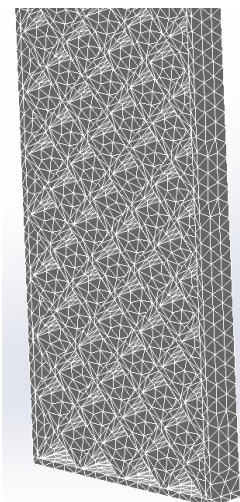


Рис. 4. Розподіл моделі балки на скінчені елементи (фронтальну обшивку видалено задля наочності)

З метою перевірки повторюваності результатів виготовлено та досліджено п'ять зразків балок, виконаних за однією 3D моделлю та надрукованих з однаковими параметрами 3D принтера. Максимальне значення розбіжності ваги балок склала 0,12 грама, а частоти коливань – 0,5 %.

Таблиця 1

Спектр коливань стільникової PLA балки розмірами (мм) 192,63×29,7×5,0

Форма, (m,n)	(0,1)	(0,2)	(1,1)	(0,3)	(1,2)	(0,4)	(1,3)	(0,5)	(1,4)	(0,6)	(1,5)
Експеримент											
Розрахунок											

3. Теоретична частина

Розрахунок значень власних коливань деталей методом кінцевих елементів (МСЕ), заснованих на варіаційному принципі Лагранжа [22, 23]:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0, \quad (1)$$

$$i = (1, \dots, n),$$

де $L = \Pi - T$ – функція Лагранжа;

Π – потенційна енергія деформації скінченного елемента;

T – кінетична енергія коливань скінченного елемента;

q_i – узагальнена координата i -го вузла;

n – кількість елементів елемента.

Потенційна та кінетична види енергії скінченного елемента:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(\{u\}^T [K] \{u\} \right) \quad K = \frac{1}{2} \left(\{u\}^T [M] \{u\} \right), \quad (2)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості елемента;

$\{u\}$ – вектор узагальнених переміщень вузлів елемента;

$[M]$ – матриця мас скінченного елемента.

Підстановка залежностей (2) до рівняння (1) визначає рівняння вільних коливань елемента в матричному вигляді:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = 0. \quad (3)$$

Спектр частот коливань лопатки лопаток визначається результатом розв'язування рівняння:

$$[K_{IJ}] u_J - f^2 [M_{IJ}] u_J = 0, \quad (4)$$

$$I, J = (1, 2, \dots, N),$$

де f – частота коливань лопатки;

N – число ступенів свободи моделі.

На базі створеної геометричної моделі, параметри якої зазначені у розділі 2, визначені частоти та

форми власних коливань стільникової балки, що досліджено експериментально.

Механічні властивості матеріалу прийнято наступними: модуль Юнга $E=2,763$ ГПа та коефіцієнт Пуассону $\mu = 0,35$. Значення щільності матеріалу друкованої деталі $\rho = 1352,3$ кг/м³ визначено порівнянням розрахункового та реального значень ваги балки.

Сітка скінчених елементів побудована типу Blended curvature-based mesh з максимальним розміром елементу 1,87 мм (рис.4). Граничні умови закріплення балки в процесі розрахунку – вільні. Загальна кількість скінчених елементів у моделі – $52,9 \cdot 10^3$.

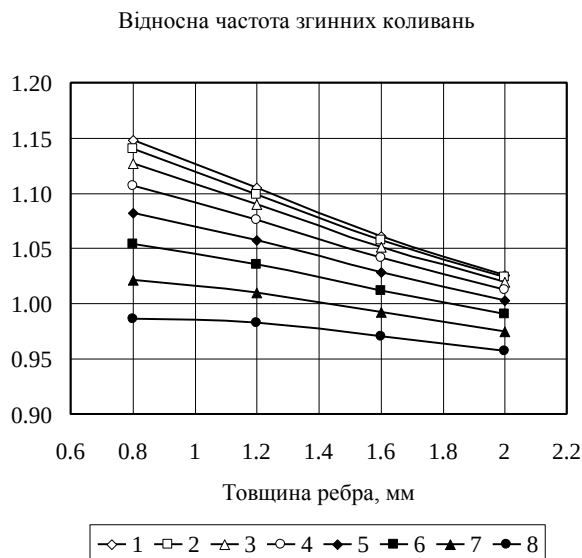


Рис. 4. Відносна частота згинальних коливань балки в залежності від товщини ребра (обшивки). Цифри біля маркерів кривих позначають номер форми коливань

Розрахункові значення частот та форм коливань визначено відповідно до балки зовнішніми розмірами (мм) $192,63 \times 29,7 \times 5,0$ стільникової внутрішньої конструкції. Товщина обшивки та ребра – 0,8 мм. Крок внутрішніх ребер – 5,0 мм а їх товщина – 0,8 мм (див. табл.1).

Порівняння експериментальних та розрахункових значень частот власних коливань балки стільникової конструкції демонструє середню квадратичну похибку розрахунку 0,6% та 2,7% для згинальних та крутильних форм коливань балки відповідно (m – кількість вузлових ліній по ширині балки) (табл.2).

В процесі досліджень розглянуто балку зовнішніми розмірами (мм) $192,63 \times 29,7 \times 5,0$ стільникової внутрішньої конструкції з кроком внутрішніх ребер – 5,0 мм. Значення товщини обшивки та ребра варіювались у діапазоні (мм) – 0,8...2,0. Геометричні моделі розглянутих варіантів балок реалізовані в системі SolidWorks.

Визначення впливу геометричних параметрів стільникового заповнення та обшивки на вібраційні характеристики балки

Таблиця 2

Розрахункові та експериментальні частоти (Гц) коливань досліджуваної балки

Номер форми коливань	Згинні форми $m=0$		Крутильні форми $m=1$	
	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент
1	227	226	787	812
2	622	623	1588,2	1640
3	1205	1204	2418	2492
4	1958	1955	3307	3381
5	2860	2851	4239	4350
6	3888	3882	5230	

Механічні властивості матеріалу прийняті у розрахунку: модуль Юнга $E=2,763$ ГПа, коефіцієнт Пуассону $\mu = 0,35$, щільність $\rho = 1352,3$ кг/м³.

Виявлені значення частот власних коливань в залежності від їх типу та форми коливань наведено у таблиці 3 та таблиці 4.

У зазначених таблицях також наведені розрахункові (МСЕ) значення частот коливань суцільної балки із зовнішніми розмірами ($192,63$ мм $\times$ $29,7$ мм $\times$ $5,0$ мм) та механічними властивостями ($E=2,763$ ГПа, $\mu = 0,35$, $\rho = 1352,3$ кг/м³) ідентичними до стільникової балки.

Як свідчать наведені результати, зменшення товщини ребра (обшивки) призводить до підвищення частот власних коливань у порівнянні з суцільною балкою для перших п'яти форм згинальних коливань.

Для більш високих форм спостерігається відповідне збільшення вказаних частот при малих значеннях товщини ребра та їх зменшення при збільшенні товщини ребра.

Що стосується крутильних форм, то в порівнянні з суцільною балкою збільшення частоти власних коливань спостерігається для всіх розглянутих значень товщини ребра (рис. 5). Слід відзначити, що залежність для частот крутильних форм коливань більш суттєва, ніж для згинальних. Такий ефект є наслідком більш суттєвого зменшення інерційних характеристик балки у порівнянні з пружними в процесі зменшення товщини обшивки та ребра.

З метою узагальнення отриманих результатів виконано порівняння відносних частот коливань досліджуваних балок. У якості базового значення прийнято частоти суцільної балки для відповідної форми коливань (див. табл. 3 та табл. 4).

Як свідчать наведені результати, максимальне збільшення частот згинальних форм стільникової балки у порівнянні з суцільною досягає 5...15 відсотків на перших формах коливань.

Таблиця 3

Залежність власний частот (Гц) згинальних коливань балки від товщини ребра та обшивки

№	Товщина ребра, мм				
	0.8	1.2	1.6	2	суцільна
1	227.4	218.8	210.0	203.1	198.0
2	622.3	600.0	577.1	558.7	545.8
3	1205.3	1166.0	1124.5	1090.8	1069.9
4	1958.1	1902.6	1841.6	1790.9	1768.6
5	2860.0	2794.0	2716.1	2649.5	2642.0
6	3887.8	3821.1	3732.9	3654.1	3690.1
7	5018.0	4963.8	4874.9	4790.3	4912.8
8	6224.6	6198.4	6121.3	6039.2	6310.2

Таблиця 4

Залежність власний частот (Гц) крутильних коливань балки від товщини ребра та обшивки

№	Товщина ребра, мм				
	0.8	1.2	1.6	2	суцільна
1	787.2	759.97	736.52	718.77	441
2	1591.3	1538.8	1493	1458	915
3	2427.2	2353.4	2287.2	2236.4	1452
4	3307	3217.5	3134.4	3069.4	2079
5	4239.4	4141.7	4046	3969.8	2815
6	5230.8	5133.9	5031.3	4947.4	3674

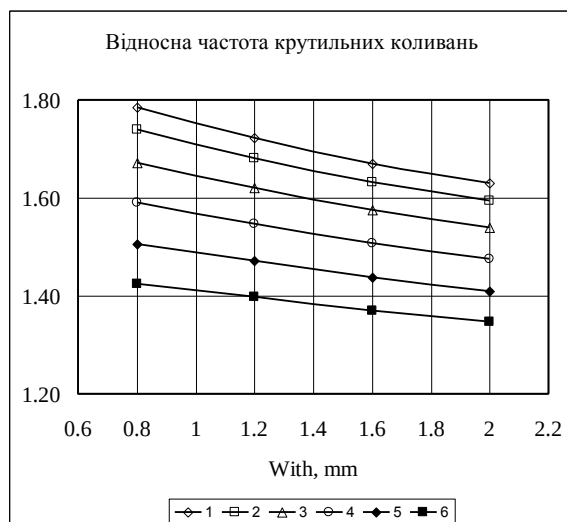


Рис. 5. Відносна частота крутильних коливань балки в залежності від товщини ребра (обшивки).. Цифри біля маркерів кривих позначають номер форми коливань

Відповідно до крутильних форм коливань частоти перших форм коливань збільшується у 1,4...1,8 разів.

4. Висновки

Розроблено та створено методом 3D друку зразки балки стільникової конструкції з PLA-пластику розмірами (мм) 192,63×29,7×5.0, кроком внутрішніх

ребер – 5,0 мм з однаковою товщиною обшивки та ребра у діапазоні від 0,8 мм до 2,0 мм.

Експериментально, на основі цифрової електронної спекл-інтерферометрії, та теоретично – методом скінчених елементів, визначено частоти та форми коливань балки з товщиною обшивки 0,8 мм при вільних умовах закріплення.

Середня квадратична похибка розрахункових значень частот складає від 0,6% до 3,5%. Показано, що зменшення товщини ребра (обшивки) призводить до підвищення частот, при чому, для частот крутильних форм коливань залежність більш суттєва, ніж для згинальних коливань.

Визначено, що у порівнянні аналогічною за зовнішніми розмірами суцільною балкою що частоти згинальних коливань балки стільникової конструкції в залежності від товщини ребра збільшуються на 5%...15%, а крутильних – у 1,3...1,8 рази.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел – М.Р. Ткач, Ю.М. Галинкін, Ю.Г. Золотий, І.Ю. Жук, А.А. Шинкаренко, О.А. Костріков; формулювання мети і постановка задач дослідження – М.Р. Ткач, Ю.М. Галинкін, А.А. Шинкаренко; проведення математичного моделювання – О.А. Костріков, А.А. Шинкаренко, І.Ю. Жук; дослідження вібраційних характеристик балок – Ю.Г. Золотий, А.А. Шинкаренко, І.Ю. Жук; аналіз результатів дослідження – М.Р. Ткач, Ю.М. Галинкін, А.А. Шинкаренко, О.А. Костріков; формулювання висновків – М.Р. Ткач, Ю.М. Галинкін, Ю.Г. Золотий, А.А. Шинкаренко; написання статті – М.Р. Ткач, Ю.М. Галинкін, Ю.Г. Золотий, А.А. Шинкаренко, І.Ю. Жук, О.А. Костріков.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису

Література

1. Gebrehiwot, B. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Filament Fabrication Process [Text] / B. Gebrehiwot, & S. Bandyopadhyay // *Polymers*. - 2021. - Vol. 13(9). - P. 1398. doi: 10.3390/polym13091398.
2. Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process [Text] / V. Kuznetsov, A. Solonin, A. Tavitov [et al.] // *Rapid Prototyping Journal*. - 2020. - Vol. 26(3). - P. 495–503. doi: 10.1108/RPJ-01-2019-0017.
3. The influence of stiffener geometry on flexural behavior of 3D printed PLA structures [Text] / K. Kang, J. Park, C. Lee [et al.] // *Materials Today Communications*. - 2020. - Vol. 25. - P. 101651. doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101651.
4. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [Text] / T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano [et al.] // *Composites Part B*. - 2018. - Vol. 143. - P. 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
5. Characterizing the mechanical properties of parts fabricated using fused deposition modeling additive manufacturing technology [Text] / A. R. Torrado, C. M. Shemelya, J. D. English [et al.] // *J. Manuf. Sci. Eng.* - 2015. - Vol. 137(1). - P. 011011. doi: 10.1115/1.4028725.
6. Bikas, H. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review [Text] / H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chrysosolouris // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* - 2016. - Vol. 83. - P. 389–405. doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
7. Mechanical characterization of 3D-printed polymers [Text] / J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen [et al.] // *Additive Manufacturing*. - 2018. - Vol. 20. - P. 44–67. doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
8. ASTM D638–14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken [Text], PA, USA, 2014. doi: 10.1520/D0638-14.
9. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens [Text] : A review / D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza [et al.] // *Polym. Test.* - 2018. - Vol. 69. - P. 157–166. doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
10. Design and analysis of lightweight lattice structures for additive manufacturing [Text] / T. Yang, X. Chen, J. Zhao [et al.] // *Materials & Design*. - 2019. Vol. 183. - P. 108137. doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
11. Mohamed, O. A. Optimization of fused deposition modeling process parameters [Text] : a review of current research and future prospects / O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik // *Adv. Manuf.* - 2015. - Vol. 3(1). - P. 42–53. doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
12. Carneiro, O. S. Fused deposition modeling with polypropylene [Text] / O. S. Carneiro, A. F. Silva, R. Gomes // *Materials & Design*. - 2015. - Vol. 83. - P. 768–776. doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
13. Study on the free vibration analysis and mechanical behaviour of 3D printed composite I shaped beams made up of short carbon fiber reinforced ABS and PLA materials [Text] / C. Senthamarakannan, B. Parthasarathy, S. Surya, & S. Tharun Rajan // *Materials Today: Proceedings*. - 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.141
14. The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams [Text] / S. Z. Gebrehiwot, Leal L. Espinosa, J. N. Eickhoff, & L. Rechenberg // *Progress in Additive Manufacturing*. - 2021. - Vol. 6. - P. 71–81. doi: 10.1007/s40964-020-00146-2
15. Effect of Infill Percentage on Vibration Characteristic of 3D-Printed Structure [Text] / P. K. Yadav, K. Abhishek, K. Singh, & J. Bhaskar // *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering*. - 2021. doi: 10.1007/978-981-15-8542-5_49.
16. Maqsood, N. Characterization of Carbon Fiber Reinforced PLA Composites Manufactured by Fused Deposition Modeling [Text] / N. Maqsood, & M. Rimasauskas // *Composites Part C: Open Access*. - 2021. doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100112.
17. Bambu Lab. Technical Data Sheet V3.0 – PLA Matte [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bambulab.com> (дата звернення: 17.05.2025).
18. Anderson, I. Mechanical properties of 3D printed polymers: a comparative study of materials and infill [Text] / I. Anderson // *3D Printing and Additive Manufacturing*. - 2017. - Vol. 4(3). - P. 123–134. doi: 10.1089/3dp.2016.0054.
19. Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical Vibrodiagnostic Complex [Text] / M. Tkach, Y. Zolotoy, Y. Halynkin [et al.] // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* - 2020. *ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. - 2021. -Vol 188. - P. 277-289. doi: 10.1007/978-3-030-66717-7_23.
20. Пат. UA 103068 Україна. Спосіб визначення частот і форм резонансних коливань лопаток ГТД методом спекл-інтерферометрії [Текст] / Ткач М. Р., Золотой Ю. Г., Довгань Д. В., & Жук И. Ю. - № 103068 ; опубл. 10.12.2015.
21. Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method [Text] / M. Tkach, S. Morhun, Y. Zolotoy, & I. Zhuk // *Int. J. Turbo Jet-Eng.* – 2020. - Published ahead of print. doi: 10.1515/tjj-2020-0014.
22. Придорожний, Р. П. Влияние ползучести материала на работоспособность лопаток соплового аппарата турбины высокого давления [Текст] / Р. П. Придорожний, А. В. Шереметьев, & А. П. Зиньковский // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 7 (167). – С. 41–46. doi: 10.32620/akt.2020.7.06.
23. Анализ колебаний лопаточного аппарата ГТД с монокристаллическими лопатками [Текст] / Ю. С. Воробьев, М. А. Чугай, В. Н. Романенко и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. -

2021. - № 4 спецвипуск 1. – С. 47–50. doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.12.

References

1. Gebrehiwot, B., Bandyopadhyay, S. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Filament Fabrication Process. *Polymers*, 2021, vol. 13(9), pp. 1398. doi: 10.3390/polym13091398.
2. Kuznetsov, V., Solonin, A., Tavitov, A., Urzhumtsev, O., & Vakulik, A. Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process. *Rapid Prototyping Journal*, 2020, vol. 26(3), pp. 495–503. doi: 10.1108/RPJ-01-2019-0017.
3. Kang, K., Park, J., Lee, C., & et al. The influence of stiffener geometry on flexural behavior of 3D printed PLA structures. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 25, article no. 101651. doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101651.
4. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., & et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B*, 2018, vol. 143, pp. 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
5. Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D. et al. Characterizing the mechanical properties of parts fabricated using fused deposition modeling additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, vol. 137(1), article no. 011011. doi: 10.1115/1.4028725.
6. Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chrysosouris, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 83, pp. 389–405. doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
7. Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 44–67. doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
8. ASTM D638–14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, 2014. doi: 10.1520/D0638-14.
9. Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., & et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 2018, vol. 69, pp. 157–166. doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
10. Yang, T., Chen, X., Zhao, J., & et al. Design and analysis of lightweight lattice structures for additive manufacturing. *Materials & Design*, 2019, vol. 183, article no. 108137. doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
11. Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advanced Manufacturing*, 2015, vol. 3(1), pp. 42–53. doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
12. Carneiro, O. S., Silva, A. F., & Gomes, R. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 2015, vol. 83, pp. 768–776. doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
13. Senthamaraikannan, C., Parthasarathy, B., Surya, S., Tharun Rajan, S. Study on the free vibration analysis and mechanical behaviour of 3D printed composite I shaped beams made up of short carbon fiber reinforced ABS and PLA materials. *Materials Today: Proceedings*. 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.141.
14. Gebrehiwot, S. Z., Espinosa Leal, L., Eickhoff, J. N., & Rechenberg, L. The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams. *Progress in Additive Manufacturing*, 2021, vol. 6, pp. 71–81. doi: 10.1007/s40964-020-00146-2.
15. Yadav, P. K., Abhishek, K., Singh, K., & Bhaskar, J. Effect of Infill Percentage on Vibration Characteristic of 3D-Printed Structure. *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering*, 2021. doi: 10.1007/978-981-15-8542-5_49.
16. Maqsood, N., & Rimasauskas, M. Characterization of Carbon Fiber Reinforced PLA Composites Manufactured by Fused Deposition Modeling. *Composites Part C: Open Access*, 2021. doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100112.
17. Bambu Lab. *Technical Data Sheet V3.0 – PLA Matte*, 2025. Available at: <https://bambulab.com> (Accessed 17 May 2025).
18. Anderson, I. Mechanical properties of 3D printed polymers: a comparative study of materials and infill. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2017, vol. 4(3), pp. 123–134. doi: 10.1089/3dp.2016.0054.
19. Tkach, M., Zolotoy, Y., Halynkin, Y., Proskurin, A., Zhuk, I., Kluchnyk, V., & Bobylev, I. Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical Vibrodiagnostic. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 188, pp. 277–289. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-66717-7_23.
20. Tkach, M. R., Zolotiy, Y. G., Dovgan, D. V., & Guk, I. Y. *Sposib vyznachennya chastot i form rezonansnykh kolyvan lopatok GTD metodom spekl-interferometriyi* [Method of determining of forms of resonant vibrations shapes of blades of gas turbine engine by speckle interferogram]. Patent UA No. 103068, 2015. (In Ukrainian).
21. Tkach, M., Morhun, S., Zolotoy, Y., & Zhuk, I. Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method. *International Journal of Turbo Jet-Engines*, 2020, Published ahead of print. doi: 10.1515/tjj-2020-0014.
22. Pridorozhnyj, R. P., Sheremet'ev, A. V., & Zinkovskij, A. P. Vliyanie polzuchesti materiala na rabotosposobnost' lopatok soplovogo apparata turbiny vysokogo davleniya [Influence of creep of material of a high pressure nozzle vanes on their operability]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7 (167), pp. 41–46. doi: 10.32620/aktt.2020.7.06. (in Russian).

23. Vorobyev, Y. S., Chugai, M. A., Romanenko, V. N., Kulishov, S. B., & Skritskyi, A. N. Analiz kolebaniy lopatochnogo apparata GTD s monokristallicheskimi lopatkami [Experimental and calculation determination of the mechanical properties of the

material of GTE blades]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4supl1, pp. 47–50. doi: 10.32620/akt. 2021.4sup1.12. (in Russian).

Надійшла до редакції 15.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

INFLUENCE OF STIFFENER PARAMETERS ON THE VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF 3D-PRINTED HONEYCOMB BEAMS MADE OF PLA

Mykhailo Tkach, Yurii Halinkin, Yuriy Zolotoy, Iryna Zhuk, Andrii Shynkarenko, Oleksandr Kostrikov

Additive manufacturing has provided a universal tool that enables the fabrication of three-dimensional objects of any complexity with minimal material consumption. Fused Filament Fabrication (FFF)-based 3D printing holds a dominant position in prototype and small-batch production of components. At the design stage, depending on the anticipated operating conditions, ensuring dynamic stability and strength under resonant vibrational excitation is crucial. A theoretical method for determining the frequency and modal spectrum of a component and an experimental verification of the obtained results have been developed for this purpose. This study investigates the vibration characteristics of honeycomb-structured PLA beams with dimensions (mm) $192.63 \times 29.7 \times 5.0$ and an internal rib pitch of 5.0 mm, which were produced via 3D printing. The shell and rib thicknesses were set to be equal. The frequencies and mode shapes of five beam samples with 0.8 mm thick shell were experimentally determined using real-time electronic speckle pattern interferometry. The boundary conditions of the beam were free. The numerical vibration characteristics obtained by the finite element method were experimentally validated. The root-mean-square error of the calculated frequency values ranged from 0.6% for bending modes to 2.7% for torsional modes. Theoretically, the influence of shell and rib thicknesses in the range of 0.8 mm to 2.0 mm on the vibrational behavior of the beam was studied. Reducing the rib (shell) thickness increases the natural frequencies of the honeycomb-structured beam. This dependence is more significant for torsional frequencies than for bending frequencies. Compared to a solid beam of the same external dimensions and material, the bending frequencies of the honeycomb beam increased by 5%–15%, while the torsional frequencies increase by 1.3 to 1.8 times, depending on rib thickness.

Keywords: vibration characteristics; speckle interferometry; beam; honeycomb structure; finite element method.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Галинкін Юрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Золотий Юрій Григорович – зав. лаб. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Жук Ірина Юріївна – старш. викл. каф. гігієни, соціальної медицини, громадського здоров'я та медичної інформатики, Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Шинкаренко Андрій Андрійович – асп., Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Костріков Олександр Андрійович – магістрант, Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Mykhailo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com ORCID: 0000-0003-4944-7113.

Yurii Halinkin – PhD, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5272-4156.

Yuriy Zolotoy – Head of the Laboratory of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: goldspekl@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6292-6624.

Iryna Zhuk – Senior Lecturer of the Department of Hygiene, Social Medicine, Public Health and Medical Informatics, Petro Mohyla Black Sea State University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: Iryna.zhuk@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7350-1944.

Andrii Shynkarenko – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: fort1020@gmail.com, ORCID: 0009-0009-8527-8055.

Oleksandr Kostrikov – Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: zefirkakakao@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8174-9265.