

УДК 621.438

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.08

М. Р. ТКАЧ, А. А. ШИНКАРЕНКО

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна*

ВПЛИВ КУТА ОРІЄНТАЦІЇ ВНУТРІШНІХ РЕБЕР НА ВІБРАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ 3D-ДРУКОВАНИХ СТІЛЬНИКОВИХ PLA-БАЛОК

У роботі досліджено вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на вібраційні характеристики 3D-друкованих стільникових балок з PLA-пластику. Дослідження виконано методом скінченних елементів для серії геометрично ідентичних балок із кутами між внутрішніми ребрами жорсткості 30°, 45°, 60°, 90° і 120°. Для всіх моделей зовнішні геометричні параметри, товщина ребер і обшивки, а також механічні властивості матеріалу залишались незмінними. Метою дослідження було визначення впливу кута між внутрішніми ребрами жорсткості на власні частоти та форми згинальних і крутильних коливань конструкцій. Модальний аналіз виконано в середовищі SolidWorks Simulation із використанням вільних граничних умов (free-free), що відповідають умовам попередньо верифікованого експериментального дослідження. Визначено власні частоти та форми згинальних і крутильних коливань для всіх досліджуваних варіантів конструкцій. Установлено, що зміна кута між внутрішніми ребрами жорсткості найбільш суттєво впливає на згинальні форми коливань, тоді як для крутильних форм зміна частот має менш виражений характер. Показано, що максимальні значення згинальних власних частот отримано для конструкції з кутом між внутрішніми ребрами жорсткості 120°, а вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості зростає зі збільшенням номера форми коливань. Для крутильних форм відносна зміна частот не перевищує 1,4 %, що свідчить про незначний вплив даного параметра на крутильні форми коливань. Виконано порівняння результатів із суцільною балкою з аналогічними зовнішніми розмірами. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні легких конструкцій адитивного виробництва з підвищеними вимогами до жорсткості та вібростійкості. Установлені закономірності впливу кута між внутрішніми ребрами дозволяють обґрунтовано обирати геометрію внутрішньої структури залежно від вимог до динамічних характеристик виробу та умов його експлуатації. Установлено, що для більшості досліджуваних форм коливань стільникові конструкції демонструють вищі значення власних частот порівняно із суцільною балкою з аналогічними зовнішніми розмірами, причому для окремих крутильних форм коливань частоти перевищують відповідні значення суцільної балки більш ніж у 1,5 рази.

Ключові слова: вібраційні характеристики; PLA; FFF; стільникова структура; метод скінченних елементів; власні частоти; балка.

1. Вступ

Сучасний розвиток адитивних технологій відкриває широкі можливості для створення конструкцій зі складною внутрішньою геометрією, що поєднують високу жорсткість із малою масою. Однією з найбільш поширених технологій виготовлення полімерних деталей є метод пошарового наплавлення матеріалу (Fused Filament Fabrication, FFF/FDM), який активно використовується в машинобудуванні, авіаційній техніці, робототехніці та прототипуванні завдяки відносній простоті процесу, доступності обладнання та широкому спектру матеріалів [1–4]. Серед термопластичних матеріалів особливе поширення отримав PLA-пластик, який характеризується стабільністю друку, низькою усадкою та достатніми механічними характеристиками для створення функціональних елементів конструкцій [5–7].

Одним із перспективних напрямків розвитку адитивного виробництва є застосування стільникових та lattice-структур, які дозволяють суттєво зменшити масу виробу при збереженні необхідної жорсткості та міцності. Подібні структури широко використовуються при створенні енергопоглинальних елементів, панелей, балок та інших тонкостінних конструкцій [8–11]. У останні роки значну увагу приділяють дослідженню механічних і динамічних характеристик 3D-друкованих стільникових конструкцій, зокрема впливу параметрів друку, товщини оболонок, густини заповнення та геометрії внутрішніх елементів на їх жорсткість і власні частоти [12–15].

У роботах [16–18] показано, що параметри внутрішньої структури суттєво впливають на вібраційні характеристики полімерних конструкцій. Разом із цим, більшість наявних досліджень присвячена впливу густини заповнення, товщини оболонки, параметрів друку та типу внутрішньої структури



[14, 22], тоді як вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості стільникових PLA-балок на власні частоти коливань досліджений недостатньо.

У попередній роботі авторів [1] було експериментально верифіковано чисельну модель 3D-друкованої стільникової PLA-балки методом електронної спекл-інтерферометрії [19] і досліджено вплив товщини внутрішніх ребер жорсткості на вібраційні характеристики конструкції. Отримано добру збіжність між експериментальними та чисельними результатами, що підтвердило достовірність використаної скінченно-елементної моделі.

Метою даної роботи є дослідження впливу кута між внутрішніми ребрами жорсткості на власні частоти та форми коливань 3D-друкованих стільникових PLA-балок методом скінченно-елементного аналізу.

2. Мета, об'єкт і предмет дослідження

2.1. Мета дослідження

Метою даної роботи є визначення впливу кута між внутрішніми ребрами жорсткості на вібраційні характеристики 3D-друкованих стільникових балок з PLA-пластику при сталих геометричних параметрах конструкції.

2.2. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є 3D-друковані стільникові PLA-балки з внутрішньою системою ребер жорсткості.

2.3. Предмет дослідження

Предметом дослідження є вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на власні частоти та форми коливань балки стільникової конструкції.

2.4. Задачі дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити геометричні моделі стільникових балок з різними кутами між внутрішніми ребрами жорсткості.

2. Виконати скінченно-елементне моделювання вібраційних характеристик досліджуваних конструкцій.

3. Визначити власні частоти та форми згинальних і крутильних коливань для кожного варіанта геометрії.

4. Провести порівняльний аналіз впливу кута між внутрішніми ребрами жорсткості на спектр власних частот.

5. Провести порівняння власних частот стільникових конструкцій із власними частотами суцільної балки аналогічних зовнішніх розмірів.

3. Геометрія моделей і методика чисельного моделювання

Об'єктом дослідження є 3D-друковані балки стільникової конструкції з PLA-пластику з регулярною внутрішньою системою ребер жорсткості. Геометричні моделі балок побудовано в системі автоматизованого проектування SolidWorks.

Зовнішні геометричні розміри балок для всіх досліджуваних моделей залишались незмінними та становили $192,63 \times 30 \times 5,0$ мм. Крок внутрішніх ребер жорсткості складав 5,0 мм, а товщина обшивки та ребер приймалась однаковою та становила 0,8 мм. Матеріал конструкції — PLA-пластик.

Особливістю дослідження є варіювання кута між внутрішніми ребрами жорсткості стільникової структури. У роботі розглянуто п'ять варіантів конструкцій з кутами між ребрами 30° , 45° , 60° , 90° та 120° . Значення кутів обрано таким чином, щоб охопити широкий діапазон можливих значень кута між внутрішніми ребрами та оцінити характер зміни динамічних характеристик конструкції в широкому діапазоні значень кута між внутрішніми ребрами.

У загальному вигляді досліджувані геометричні моделі наведено на рис. 1. Внутрішню стільникову структуру PLA-балки, виготовленої методом FFF-друку, наведено на рис. 2.

Дослідження вібраційних характеристик виконано методом скінченних елементів у середовищі SolidWorks Simulation. Достовірність застосованої чисельної моделі підтверджено у попередній роботі авторів [1], де проведено експериментальну верифікацію результатів методом електронної спекл-інтерферометрії, що узгоджується з підходами до верифікації скінченно-елементних моделей, наведеними в роботі [20]. Середня квадратична похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями частот становила 0,6 % для згинальних і 2,7 % для крутильних форм коливань.

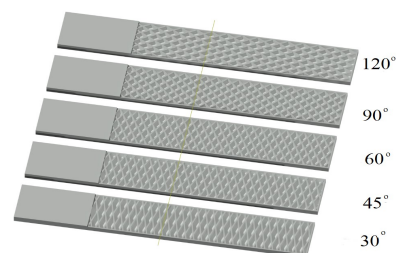


Рис. 1. Геометричні моделі стільникових балок з різними кутами між внутрішніми ребрами жорсткості

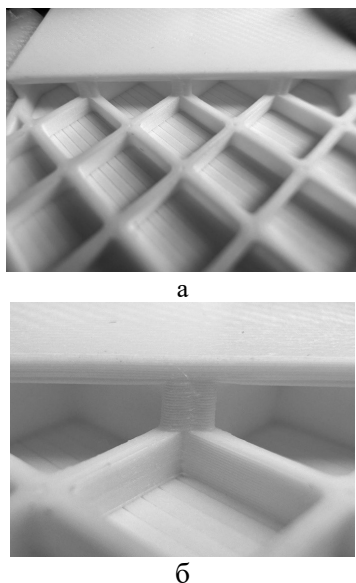


Рис. 2. Внутрішня стільникова структура PLA-балки, виготовленої методом FFF-друку
а – фрагмент стільникової структури;
б – вузол перетину внутрішніх ребер

Механічні властивості PLA-пластику, використані в розрахунках, прийнято за попередньо верифікованою моделлю [1] з урахуванням технічних даних матеріалу PLA Matte [21]:

- модуль Юнга $E = 2,763$ ГПа;
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,35$;
- густина $\rho = 1352,3$ кг/м³.

Граничні умови моделей прийнято вільними (free-free), що відповідає умовам попереднього експериментального дослідження. Для дискретизації геометрії використано скінченно-елементну сітку типу Blended curvature-based mesh з максимальним розміром елемента 1,87 мм.

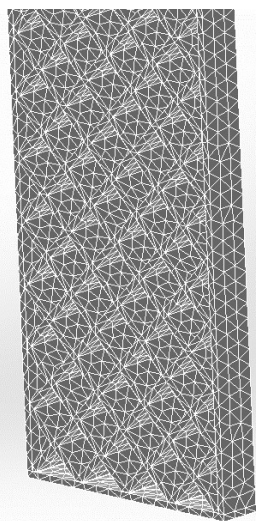


Рис. 3. Скінченно-елементна модель досліджуваної балки

Скінченно-елементну модель досліджуваної балки наведено на рис. 3. Для кожної моделі виконано модальний аналіз із визначенням спектра власних частот і відповідних форм коливань. У межах дослідження аналізувалися згинальні та крутильні форми коливань балки.

4. Результати дослідження та їх аналіз

У результаті проведеного скінченно-елементного моделювання визначено власні частоти згинальних і крутильних коливань стільникових PLA-балок з різними кутами між внутрішніми ребрами жорсткості. Для забезпечення коректності порівняння зовнішні геометричні розміри моделей, товщина обшивки та ребер, а також механічні властивості матеріалу залишалися незмінними для всіх розглянутих варіантів конструкцій.

У таблиці 1 наведено результати визначення власних частот згинальних форм коливань для балок із кутами між внутрішніми ребрами жорсткості 30°, 45°, 60°, 90° та 120°. Для порівняння також наведені частоти суцільної балки аналогічних зовнішніх розмірів.

Таблиця 1

Залежність власних частот згинальних коливань балки від кута між внутрішніми ребрами жорсткості

№	Кут між внутрішніми ребрами, градусів					Суцільна балка
	30	45	60	90	120	
1	227,3	227,9	226,4	227,4	230,9	198,0
2	619,2	621,9	618,3	622,3	632,8	545,8
3	1190,9	1199,9	1194,6	1205,3	1228,4	1069,9
4	1917,0	1938,8	1934,2	1958,1	2001,7	1768,6
5	2770,7	2814,3	2813,8	2860,0	2934,9	2642,0
6	3723,2	3800,6	3808,6	3887,8	4007,8	3690,1

Як свідчать результати, наведені в табл. 1, зміна кута між внутрішніми ребрами жорсткості суттєво впливає на згинальні форми коливань балки. Для більшості досліджуваних форм зі збільшенням кута між внутрішніми ребрами жорсткості спостерігається зростання власних частот коливань. Це свідчить про зміну розподілу жорсткості конструкції залежно від геометрії внутрішньої стільникової структури.

Найбільші значення власних частот для всіх досліджуваних згинальних форм отримано для конструкції з кутом між внутрішніми ребрами 120°. Порівняно з базовою моделлю з кутом між внутрішніми ребрами 90°, збільшення частот становить від 1,5 % для першої форми до 4,0 % для восьмої форми коливань. При цьому вплив кута між внутрішніми ребрами стає більш помітним зі зростання номера форми коливань.

Для більш наочного аналізу впливу кута між внутрішніми ребрами на згинальні коливання виконано нормування власних частот відносно балки з кутом між внутрішніми ребрами 90° , яка прийнята за базовий варіант. Відносні власні частоти визначалися як відношення частоти відповідної моделі до частоти базової конструкції. Отримані залежності наведено на рис. 4, що дозволяє оцінити характер зміни динамічних характеристик балки залежно від кута між внутрішніми ребрами жорсткості.

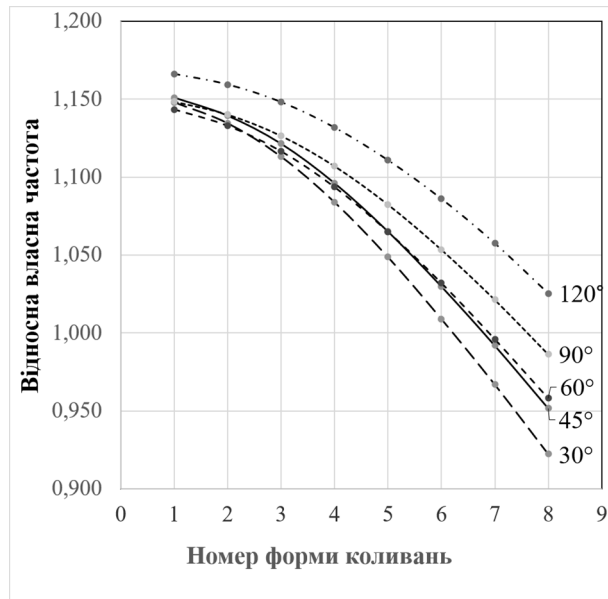


Рис. 4. Вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на відносні власні частоти згинальних коливань балки

З аналізу рис. 4 видно, що вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на власні частоти згинальних коливань зростає зі збільшенням номера форми коливань. Для нижчих форм різниця між досліджуваними варіантами є незначною, тоді як для високочастотних форм вона стає більш помітною. Це свідчить про підвищену чутливість вищих форм коливань до зміни внутрішньої геометрії конструкції та перерозподілу її жорсткісних характеристик.

Максимальні значення відносних частот для всіх досліджуваних форм коливань спостерігаються в конструкції з кутом між внутрішніми ребрами 120° . Для цієї моделі відносна частота зростає від 1,015 для першої форми до 1,040 для восьмої форми коливань порівняно з базовим варіантом. Отримані результати свідчать про підвищення власних частот згинальних коливань при даному значенні кута між внутрішніми ребрами.

Для конструкцій з кутами між внутрішніми ребрами 30° , 45° та 60° відносні частоти переважно є меншими або близькими до значень, характерних для базової моделі з кутом 90° . При цьому найбільше

зниження відносних частот спостерігається для конструкції з кутом між внутрішніми ребрами 30° , особливо для вищих форм коливань. Отримані результати вказують на те, що кут між внутрішніми ребрами може бути використаний як додатковий параметр керування динамічними характеристиками стільникових конструкцій без зміни їх зовнішніх геометричних розмірів, товщини елементів і механічних властивостей матеріалу.

У таблиці 2 наведено результати визначення власних частот крутильних форм коливань для досліджуваних конструкцій.

Таблиця 2

Залежність власних частот крутильних коливань балки від кута між внутрішніми ребрами жорсткості

№	Кут між внутрішніми ребрами, градусів					Сумарна балка
	30	45	60	90	120	
1	779,11	785,5	782,92	787,2	786	441
2	1576,1	1588,7	1584	1591,3	1589,3	915
3	2406	2424,6	2418,6	2427,2	2425,6	1452
4	3279,7	3306,2	3298,7	3307	3307,92	2079
5	4203,48	4239,76	4233,45	4239,4	4247,5	2815
6	5180,4	5229,8	5226,5	5230,8	5251,3	3674

Отримані результати свідчать, що вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на крутильні форми коливань є значно менш вираженим порівняно зі згинальними формами. При зміні кута між внутрішніми ребрами в досліджуваному діапазоні власні частоти крутильних коливань змінюються незначно, що свідчить про відносно слабку залежність власних частот крутильних коливань від цього геометричного параметра.

Відносні значення крутильних частот, нормовані відносно балки з кутом між внутрішніми ребрами 90° , наведено на рис. 5.

З аналізу рис. 5 видно, що для всіх досліджуваних варіантів конструкцій відносні власні частоти крутильних коливань залишаються близькими до одиниці. Навіть при зміні кута між внутрішніми ребрами жорсткості від 30° до 120° відхилення від базового варіанта не перевищують 1,4 %, що свідчить про незначний вплив даного параметра на власні частоти крутильних коливань балки.

Для крутильних форм коливань найбільші значення частот спостерігаються для моделей з кутами між внутрішніми ребрами 90° і 120° , однак різниця між досліджуваними варіантами є незначною. Максимальне відхилення від базового варіанта не перевищує 1,4 %, що підтверджує слабкий вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на крутильні коливання балки.

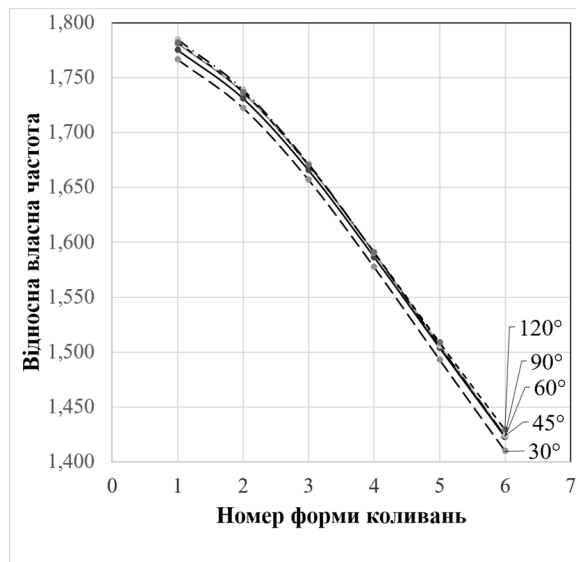


Рис. 5. Вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на відносні власні частоти крутильних коливань балки

Отримані результати показують, що зміна кута між внутрішніми ребрами жорсткості переважно впливає на власні частоти згинальних коливань, тоді як частоти крутильних коливань змінюються незначно.

Порівняння із суцільною балкою аналогічних зовнішніх розмірів показує, що для більшості досліджуваних форм коливань стільникові конструкції мають вищі значення власних частот порівняно із суцільною балкою. Для конструкції з кутом між внутрішніми ребрами 120° перевищення частот згинальних форм порівняно із суцільною балкою становить від 2,5 % до 16,6 %, залежно від номера форми, тоді як для крутильних форм перевищення досягає 1,77 рази для першої форми коливань. Отримані результати підтверджують значний вплив внутрішньої стільникової структури на динамічні характеристики конструкції та можливість цілеспрямованого керування її вібраційними властивостями шляхом зміни геометрії внутрішніх ребер.

5. Висновки

У роботі виконано дослідження впливу кута між внутрішніми ребрами жорсткості на вібраційні характеристики 3D-друкованих стільникових балок з PLA-пластику методом скінченно-елементного аналізу.

Основні результати дослідження полягають у наступному:

1. Розроблено геометричні та скінченно-елементні моделі стільникових PLA-балок із кутами між внутрішніми ребрами жорсткості 30° , 45° , 60° , 90° та 120° при сталих зовнішніх геометричних параметрах конструкції.

2. Установлено, що зміна кута між внутрішніми ребрами жорсткості суттєво впливає на згинальні

форми коливань балки. Найбільші значення власних частот для всіх досліджуваних згинальних форм отримано для конструкції з кутом між внутрішніми ребрами 120° .

3. Показано, що вплив кута між внутрішніми ребрами жорсткості на крутильні форми коливань є менш вираженим у порівнянні зі згинальними формами. Відносна зміна власних частот крутильних коливань для різних кутів між внутрішніми ребрами жорсткості не перевищує 1,4 %.

4. Установлено, що зміна кута між внутрішніми ребрами жорсткості призводить до помітної зміни спектра власних частот конструкції, що найбільш помітно проявляється для високих форм згинальних коливань.

5. Порівняння із суцільною балкою аналогічних зовнішніх розмірів показало, що для більшості досліджуваних форм коливань стільникові конструкції мають вищі значення власних частот. Для окремих крутильних форм частоти стільникових балок перевищують відповідні значення суцільної балки більш ніж у 1,5 рази.

6. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні 3D-друкованих конструкцій із заданими вібраційними характеристиками, а також для подальшої оптимізації параметрів внутрішньої стільникової структури.

Внесок авторів: постановка задачі дослідження, наукове керівництво роботою, аналіз результатів і редагування рукопису – **М. Р. Ткач**; побудова геометричних моделей, проведення чисельного моделювання, обробка результатів дослідження, підготовка і оформлення рукопису статті – **А. А. Шинкаренко**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів щодо підготовки, проведення та публікації результатів даного дослідження.

Фінансування

Дослідження виконано в рамках наукової роботи аспіранта без залучення окремого зовнішнього фінансування.

Доступність даних

Усі дані, необхідні для відтворення та перевірки результатів дослідження, наведено в тексті статті. Додаткові матеріали можуть бути надані авторами за обґрунтованим запитом.

Використання засобів штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису автори використовували інструменти штучного інтелекту виключно для мовного редагування тексту, перевірки грамати-

ки та покращення стилістичного оформлення матеріалу. Усі результати дослідження, розрахунки, моделі, аналіз даних і наукові висновки отримані авторами самостійно.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Вплив параметрів ребер жорсткості на вібраційні характеристики 3D-друкованих стільникових балок з PLA / М. Р. Ткач, Ю. М. Галінкін, Ю. Г. Золотий та ін. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2025. – № 4 спецвип. 2 (206) – С. 110–118. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.12>.
2. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Modeling Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process / V. E. Kuznetsov, A. N. Solonin, O. D. Urzhumtsev et al. // *Polymers*. – 2018. – Vol. 10, iss. 3. – 11 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10030313>.
3. Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process / V. Kuznetsov, A. Solonin, A. Tavitov et al. // *Rapid Prototyping Journal*. – 2020. – Vol. 26, iss. 1. – P. 107–121. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2019-0017>.
4. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou et al. // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 110. – P. 442–458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
5. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges / T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano et al. // *Composites Part B*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
6. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing / A. R. Torrado, C. M. Shemelya, J. D. English, Y. Lin, R. B. Wicker, D. A. Roberson // *Additive Manufacturing*. – 2015. – Vol. 6. – P. 16–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>.
7. Bikas, H. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review / H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chrysosolouris // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 83. – P. 389–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>.
8. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, R. C. Advincula // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 44–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
9. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review / D. Popescu, A. Zarcu, C. Amza et al. // *Polymer Testing*. – 2018. – Vol. 69. – P. 157–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.
10. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges / T. Maconachie, M. Leary, B. Lozanovski et al. // *Materials & Design*. – 2019. – Vol. 183. – 18 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>.
11. Mohamed, O. A. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects / O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik // *Advanced Manufacturing*. – 2015. – Vol. 3, iss. 1. – P. 42–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.
12. Senthamaraiannan, C. 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 / C. Senthamaraiannan, B. Parthasarathy, S. Surya, S. Tharun Rajan // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 72. – P. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.141>.
13. The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams / S. Z. Gebrehiwot, L. Espinosa Leal, J. N. Eickhoff, L. Rechenberg // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 6. – P. 71–81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00146-2>.
14. Effect of Infill Percentage on Vibration Characteristic of 3D-Printed Structure / P. K. Yadav, K. Abhishek, K. Singh, J. Bhaskar // *Advances in Manufacturing and Industrial Engineering. ICAPIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. – 2021. – P. 565–573. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8542-5_49.
15. Maqsood, N. Characterization of Carbon Fiber Reinforced PLA Composites Manufactured by Fused Deposition Modeling / N. Maqsood, M. Rimasauskas // *Composites Part C: Open Access*. – 2021. – Vol. 4. – 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100112>.
16. Vibration and damping characteristics of 3D-printed lattice beams / K. M. Nisamudhin, A. Acharya, A. Jain, A. DasGupta // *Mechanics of Materials*. – 2025. – Vol. 210. – 12p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105448>.
17. Aslantas, K. Vibration analysis of 3D printed PLA beam with honeycomb cell structure for renewable energy applications and sustainable solutions / K. Aslantas, E. Özkaya, W. Ahmed // *Renewable Energy: Generation and Application (ICREGA 2024). Materials Research Proceedings*. – 2024. – Vol. 43. – P. 164–171. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644903216-22>.
18. Optimization of energy absorption and vibration behaviour of TPMS Schwarz P and Schoen Gyroid lattice structures using Taguchi L9 orthogonal array / N. Sathishkumar, K. M. Kumar, R. Selvam, A. S. M. Udayakumar // *Journal of Elastomers & Plastics*. – 2024. – Vol. 56, iss. 5. – P. 539–576. DOI: <https://doi.org/10.1177/00952443241254924>.
19. Спосіб визначення резонансних форм коливань методом спекл-інтерферометрії : пат. 103068

Україна / М. Р. Ткач, І. Ю. Жук, Д. О. Довгань, Ю. Г. Золотий. – 2015. – 4 с.

20. *Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method* / M. R. Tkach, S. O. Morhun, Yu. H. Zoloty, I. Yu. Zhuk // *International Journal of Turbo & Jet-Engines*. – 2022. – Vol. 39, iss. 4. – P. 589–597. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0014>.

21. *Bambu Lab. Technical Data Sheet V3.0 – PLA Matte*. – Режим доступу: <https://bambulab.com> (дата звернення: 05.01.2026).

22. *Parpala, R. C. Infill parameters influence over the natural frequencies of ABS specimens obtained by extrusion-based 3D printing* / R. C. Parpala, D. Popescu, C. G. Amza // *Rapid Prototyping Journal*. – 2021. – Vol. 27, iss. 6. – P. 1273–1285. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2020-0110>.

References

1. Tkach, M. R., Halinkin, Yu. M., Zoloty, Yu. H., Zhuk, I. Yu., Shynkarenko, A. A., Kostrikov, O. A. *Vplyv parametriv reber zhorstkosti na vibratsiini kharakterystyky 3D-drukovanykh stilnykovykh balok z PLA* [Influence of stiffener parameters on the vibrational characteristics of 3D-printed honeycomb beams made of PLA]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace Technic and Technology*, 2025, no. 4 sup. 2 (206), pp. 110–118. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.12>.

2. Kuznetsov, V. E., Solonin, A. N., Urzhumtsev, O. D., Schilling, R., Tavitov, A. G. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Modeling Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers*, 2018, vol. 10, iss. 3. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10030313>.

3. 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, no. 1, pp. 107–121. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2019-0017>.

4. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 442–458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

5. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen K. T. Q., Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B*, 2018, vol. 143, pp. 172–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

6. Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., Roberson, D. A. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing.

Additive Manufacturing, 2015, vol. 6, pp. 16–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>.

7. 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: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>.

8. Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., Advincula, R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 44–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.

9. Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., Marinescu, R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 2018, vol. 69, pp. 157–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.

10. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 2019, vol. 183. 18 p. DOI: <https://doi.org/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, iss. 1, pp. 42–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.

12. Senthamarai Kannan, 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, vol. 72, pp. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.141>.

13. 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: <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00146-2>.

14. 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. ICAPIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore*, 2021, P. 565–573. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8542-5_49.

15. Maqsood, N., Rimasauskas, M. Characterization of Carbon Fiber Reinforced PLA Composites Manufactured by Fused Deposition Modeling. *Composites Part C: Open Access*, 2021, vol. 4. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100112>.

16. Nisamudhin, K. M., Acharya, A., Jain, A., DasGupta, A. Vibration and damping characteristics of 3D-printed lattice beams. *Mechanics of Materials*, 2025, vol. 210. 12p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105448>.

17. Aslantas, K., Özkaya, E., Ahmed, W. Vibration analysis of 3D printed PLA beam with honeycomb

cell structure for renewable energy applications and sustainable solutions. *Materials Research Proceedings*, 2024, vol. 43, pp. 164–171. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644903216-22>.

18. Sathishkumar, N., Kumar, K.M., Selvam, R., Udayakumar, A.S.M. Optimization of energy absorption and vibration behaviour of TPMS Schwarz P and Schoen Gyroid lattice structures using Taguchi L9 orthogonal array. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2024, vol. 56, iss. 5, pp. 539–576. DOI: <https://doi.org/10.1177/00952443241254924>.

19. Tkach, M. R., Zhuk, I. Yu., Dovhan, D. O., Zoloty, Yu. H. *Sposib vyznachennia rezonansnykh form kolyvan metodom spekl-interferometrii* [Method of determining resonant vibration modes by speckle interferometry]. Patent of Ukraine, no. 103068, 2015.

20. Tkach, M. R., Morhun, S. O., Zoloty, Yu. H., Zhuk, I. Yu. Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2022, vol. 39, iss. 4, pp. 589–597. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0014>.

21. Bambu Lab. Technical Data Sheet V3.0 – PLA Matte. Available at: <https://bambulab.com/> (accessed 05 January 2026).

22. Parpala, R. C., Popescu, D., Amza, C. G. Infill parameters influence over the natural frequencies of ABS specimens obtained by extrusion-based 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, vol. 27, iss. 6, pp. 1273–1285. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2020-0110>.

Надійшла до редакції 11.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 07.8.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

INFLUENCE OF THE ORIENTATION ANGLE OF THE INTERNAL RIBS ON THE VIBRATION CHARACTERISTICS OF 3D-PRINTED HONEYCOMB PLA BEAMS

Mykhailo Tkach, Andrii. Shynkarenko

This study investigates the influence of the angle between internal ribs on the vibration characteristics of 3D-printed honeycomb beams manufactured from polylactic acid (PLA). A finite element analysis was performed for a series of geometrically identical beam models with rib angles of 30°, 45°, 60°, 90°, and 120°. For all configurations, the external dimensions, shell and rib thicknesses, and material properties were kept constant. The objective of the study was to evaluate the effect of the internal rib arrangement on the natural frequencies and mode shapes of bending and torsional vibrations. Modal analysis was carried out in the SolidWorks Simulation environment using free-free boundary conditions, as employed in a previously validated experimental investigation. Natural frequencies and vibration modes were determined for all structural configurations considered. The results demonstrated that the investigated geometric parameter has a pronounced influence on bending vibration modes, whereas its effect on torsional behavior is considerably less significant. The highest bending natural frequencies were obtained for the structure with a rib angle of 120°, and the sensitivity of the frequencies to variations in rib orientation increased with the vibration mode number. For torsional modes, the relative frequency variation did not exceed 1.4%, indicating a weak dependence of torsional stiffness on this design parameter. A comparative analysis with a solid beam of identical external dimensions was also conducted. The obtained results indicate that honeycomb structures provide improved dynamic performance while maintaining a lower structural mass. The established relationships between the internal rib angle and vibration characteristics enable purposeful tailoring of the dynamic response of additively manufactured components by modifying the internal architecture without altering overall dimensions or material properties. Furthermore, for most of the investigated vibration modes, the honeycomb beams exhibited higher natural frequencies than the corresponding solid beam, while for certain torsional modes, the frequencies exceeded those of the solid counterpart by more than 1.5 times. The findings may be used to design and optimize lightweight additively manufactured structures with specified dynamic characteristics and enhanced vibration resistance.

Keywords: vibration characteristics; PLA; FFF; honeycomb structure; finite element method; natural frequencies; internal ribs; orientation angle.

Ткач Михайло Романович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв.

Шинкаренко Андрій Андрійович – аспірант, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова.

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

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