УДК 539.3 https://doi.org/10.15407/itm2022.01.042

І. І. ДЕРЕВЯНКО[1,2], Б. В. УСПЕНСЬКИЙ[1], К. В. АВРАМОВ[1,3], О. Ф. САЛЕНКО[4]

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ І ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТІЛЬНИКОВИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

[1] Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного
Національної академії наук України,
вул. Пожарського, 2/10, 61046, Харків, Україна; e-mail; admi@ipmach.kharkov.ua
[2]Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»
вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна; e-mail: info@yuzhnoye.com
[3]Харківський національний університет радіоелектроніки
пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна; info@nure.ua
[4]Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна; mail[at]kpi.ua

Запропоновано підхід до експериментально-розрахункового дослідження розтягнення стільникових заповнювачів, виконаних FDM адитивними технологіями. Підхід полягає в експериментальному дослідженні зразків на розтягнення. Випробування на розтягнення стільникових блоків проводилися на атестованій універсальній розривній машині TiraTest 2300. Для проведення випробувань на розтягнення стільникових панелей підготовлено групи зразків. Описано технологію виготовлення цієї групи стільникових заповнювачів, використовуючи адитивні технології FDM. Кріплення зразків проводиться в лещатоподібних затискачах машини для проведення випробувань на розтягнення і здійснюється за вершинами ряду стільників. Експериментальний аналіз супроводжується числовим скінченно-елементним моделюванням експериментів на розтягнення. Для числового моделювання розтягнення зразків стільникових заповнювачів необхідно знати дев’ять механічних характеристик в осях матеріалу. Ці параметри розглянуто в статті. Проводилось пряме скінченно-елементне моделювання стільникового заповнювача з урахуванням деформації всіх стільників. Для забезпечення рівномірності деформації зразка, яка присутня в фізичному експерименті, його навантаження проводиться завданням зміщення одного кінця на постійне значення. Другий кінець при цьому затискається. Як випливає з експериментального аналізу, перед руйнуванням стільників переміщення кінця стільників порівняні з їх товщиною. Тому в розрахунках враховується геометрично нелінійне деформування стільників при розтягненні і в пакеті ANSYS розв’язується нелінійна задача. Прямий розрахунок стільників і аналіз гомогенізованої моделі дають різні результати. При прямому моделюванні стільників вони є тонкостінними стрижневими конструкціями, які працюють на згин. В цьому випадку геометрична нелінійність вносить помітний внесок в деформування конструкції. При розтягненні пластини (гомогенізована модель) внесок геометричної нелінійності дуже малий. Тому, залежність наближається до лінійної.

Ключові слова: *стільниковий заповнювач, адитивні технології, розтягнення, діаграма деформування.*

This paper proposes an approach to the experiment-and-calculation analysis of the tension of honeycombs made by FDM additive technologies. The approach includes experimental tension analysis. Tension tests of honeycombs were conducted on a certified TiraTest 2300 universal tension testing machine. To do this, sets of honeycomb samples were prepared. The method of honeycomb manufacturing by FDM additive technologies is described. The vertices of a honeycomb cell row are fixed in the vise-type clamps of the tension testing machine. The experimental analysis is accompanied by a numerical finite-element simulation of tension tests. To simulate honeycomb tension, nine mechanical characteristics of the material in material axes must be known. These nine parameters are considered in the paper. A direct finite-element simulation of a honeycomb with account for the deformation of all its cells was performed. To provide the uniformity of sample deformation in a physical experiment, the sample is loaded by setting the displacement of one of its ends to a constant value. In doing so, the other end is clamped. As follows from the experimental analysis, before failure the honeycomb cell end displacements are comparable with the honeycomb cell thickness. Because of this, the geometrically nonlinear deformation of the honeycomb cells in tension is accounted for in the calculations, and a nonlinear problem is solved using ANSYS. The direct simulation of honeycombs and the analysis of their homogenized model give different results. In the direct simulation of honeycombs, they are considered as thin-walled beams working in bending. In this case, the geometrical nonlinearity contributes significantly to the structural deformation. For plate tension (homogenized model), the contribution of the geometrical nonlinearity is very small, Because of this, the stress-strain response is close to linear.

Key words*: honeycomb structure, additive technologies, tension, stress-strain response.*

Вступ. Адитивні технології використовуються при виготовленні літальних апаратів [1, 2]. Завдяки використанню адитивних технологій можна виготовити відносно легкі і міцні конструкції, тому що ця технологія дозволяє надрукувати деталі з внутрішніми порожнинами. В роботі [3] наводяться приклади використання матеріалу ULTEM і адитивних технологій в аерокосмічній техніці.

Як випливає з результатів експериментальних досліджень, матеріал деталей, надрукованих на 3D-принтері, є анізотропним [4]. У статті [5] показано, що растровий кут, повітряний зазор і швидкість друку впливають на механічні характеристики надрукованих деталей. В роботі [6] зазначається, що матеріал ULTEM має високий потенціал для використання в аерокосмічній техніці, тому що він має велике значення відношення міцності до ваги. Оскільки матеріал ULTEM 9085 почав використовуватися недавно, немає великої кількості досліджень, присвячених цього матеріалу [7]. У статті [8] показується, що при 3D-друку полімерних конструкцій не вдається вибрати оптимальні параметри для друку з точки зору міцності матеріалу.

Механічні властивості деталей, надрукованих на 3D-принтері, при розтягненні, стисненні і згині аналізуються експериментально в роботі [9]. Деформування коміркуватої конструкції, виготовленої FDM адитивною технологією, досліджується в статті [10]. Руйнування стільникового заповнювача під дією квазістатичного і динамічного стиснення досліджується експериментально і чисельно за допомогою методу скінченних елементів в [11]. Скінченно-елементна модель гратчастої рами, надрукованої з поліефіраміду, досліджувалася чисельно в роботі [12].

В цій роботі експериментально досліджується розтягнення стільникового заповнювача. В результаті експериментального аналізу будується діаграма деформування, яка відображає залежність зусиль від переміщень в стільниковому заповнювачі.

Експериментальний аналіз показав, що переміщення кінця стільникового заповнювача можна порівняти з його товщиною. Тому, при моделюванні враховується його геометрично нелінійне деформування. У скінченно-елементній моделі розтягнення зразків враховується деформування всіх стільників конструкції.

Підхід до експериментального аналізу. 3D-система Fortus 900 mc використовувалася для друку зразків у вигляді стільникових заповнювачів. Ця система використовує технологію FDM. Спочатку будувалася 3D-модель стільникового заповнювача. Ця модель перетворювалася в програмному пакеті Insight™ з урахуванням наступних заданих опцій. Нарощування шарів здійснюється по висоті стільників; використовується наконечник розріджувача T16 (повне заповнення). Висота шару вибирається автоматично, виходячи з рекомендацій розробника, кількість шарів дорівнює 45 при висоті стільників 10 мм. Товщина всіх стінок стільникового заповнювача дорівнює двом шарам, кожен з шарів утворюється одним проходом екструдера. Зразки виготовлялися з матеріалу PLA. За рекомендаціями розробника при друку виробів з тонкими стінками необхідно знизити температуру печі на 10 °C з метою зменшення спотворення деталі. Цю рекомендацію було використано для друку стільникового заповнювача.

Для вибору інших параметрів технологічного процесу використовується програмне забезпечення самого 3D-принтера. Ця програма розрізає деталь на шари і вибирає траєкторії руху інструменту. Повітряний зазор приймався нульовим.

Друк стільників проводився відповідно до наступного алгоритму.

1. Завантаження файла завдання з прикладної програми, встановленої на робочій станції ПК. Завдання відправляються в систему у форматі CMB і поміщаються в чергу друку.
2. Розміщення нового модельного листа на робочому столі.
3. Розміщення контейнерів модельного і допоміжного матеріалів і завантаження філамента в головку.
4. Увімкнення живлення системи. Стабілізація системи займає приблизно чотири години.
5. Друк здійснюється в автоматичному режимі.
6. Після друку і охолодження матеріалу, виріб витягується з принтера і здійснюється видалення допоміжного матеріалу.

В результаті проведених робіт було виготовлено серію пластин стільникового заповнювача в кількості, необхідній для запланованого об’єму випробувань. Як приклад, один з надрукованих стільників наведено на рис. 1.

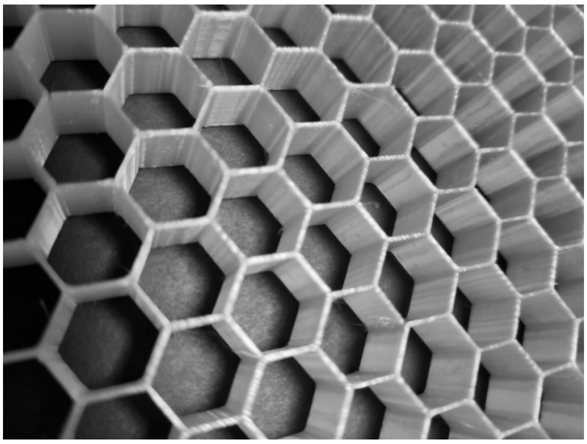


Рис.1 – Фотографія стільників

Випробування на розтягнення стільникових блоків проводилися на атестованій універсальній розривній машині TiraTest 2300. Для проведення випробувань на розтягнення стільникових панелей підготовлені групи зразків. *L*-напрямок цих стільників збігався з лінією дії розтягувальних зусиль. Розміри стільникового заповнювача дорівнювали 180 × 66,5 × 10 мм. Кріплення зразка проводиться в лещатоподібних затискачах машини для проведення випробувань на розтягнення (рис. 2) і здійснюється за вершинами ряду стільників таким чином, що відстань між захватами становить 126 мм.

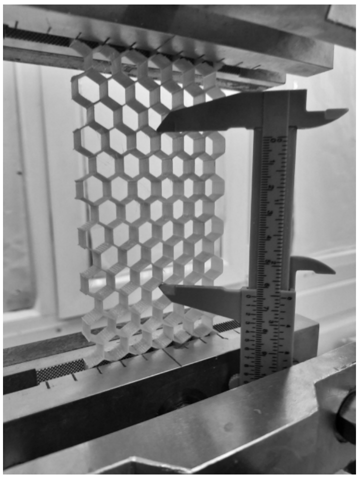


Рис. 2 – Зразок стільникової панелі, встановленої в затискачі

Результати експериментального аналізу і числового моделювання. Для числового моделювання розтягнення зразків стільникових заповнювачів необхідно знати дев’ять механічних характеристик матеріалу в осях матеріалу, оскільки матеріал, що розглядається, є ортотропним. Ці дев’ять констант такі:

$$E_{11},\ G_{12},\ \nu_{12},\ E_{22},\ G_{23},\ \nu_{23},\ E_{33},\ G_{13},\ \nu_{13}, \qquad (1)$$

де E_{11}, E_{22}, E_{33} – модулі Юнга матеріалу; G_{12}, G_{23}, G_{13} – модулі зсуву; ν_{12}, ν_{23}, ν_{13} – коефіцієнти Пуасона. Ці дев’ять констант були експериментально визначені в попередній статті авторів [13]. Механічні характеристики ортотропного матеріалу PLA наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Механічні характеристики деталі з ортотропного матеріалу PLA

E_{11}, Па	E_{22}, Па	E_{33}, Па	G_{12}, Па	G_{13}, Па	G_{23}, Па	ν_{23}	ν_{31}	ν_{21}
$3{,}58\times10^9$	$3{,}00\times10^9$	$3{,}81\times10^9$	$1{,}07\times10^9$	$1{,}40\times10^9$	$1{,}41\times10^9$	0,224	0,22	0,25

Розміри одного стільникового заповнювача з матеріалу PLA дорівнюють: h = 0,4 мм; l = 6,11 мм, де h – товщина стінки однієї комірки; l – довжина внутрішньої сторони комірки стільника.

Експеримент на розтягнення стільникового заповнювача обговорювався вище. Тут наведемо математичне моделювання цього експерименту і результати самого експерименту. При проведенні скінченно-елементного моделювання випробування на розтягнення передбачається, що затискачі розривної машини забезпечують абсолютно жорсткий контакт зі зразком. Вертикально розміщується L-напрямок стільників. Розміри зразка, надрукованого з матеріалу PLA, дорівнюють 146,2×66,3×10 мм. Розміри одного стільника з матеріалу PLA представлені вище. Проводилось пряме скінченно-елементне моделювання стільникового заповнювача з урахуванням деформації всіх стільників. Скінченно-елементна модель містить 893700 елементів з 4969545 вузлами.

Для забезпечення рівномірності деформацій зразка, яка присутня в фізичному експерименті, його навантаження проводиться шляхом завдання зміщення одного кінця на постійне значення Δ_X. Другий кінець при цьому затискається (рис. 3).

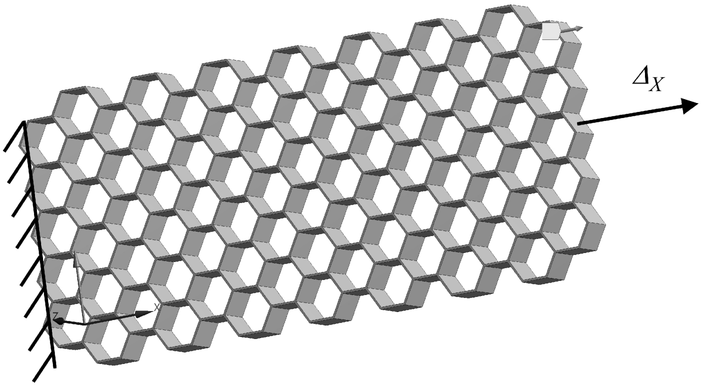


Рис. 3 – Граничні умови при розтягненні стільникового заповнювача

Для розрахунку сили, яка призводить до переміщення Δ_X, розраховується зважене значення напружень σ_X в зразку за формулою:

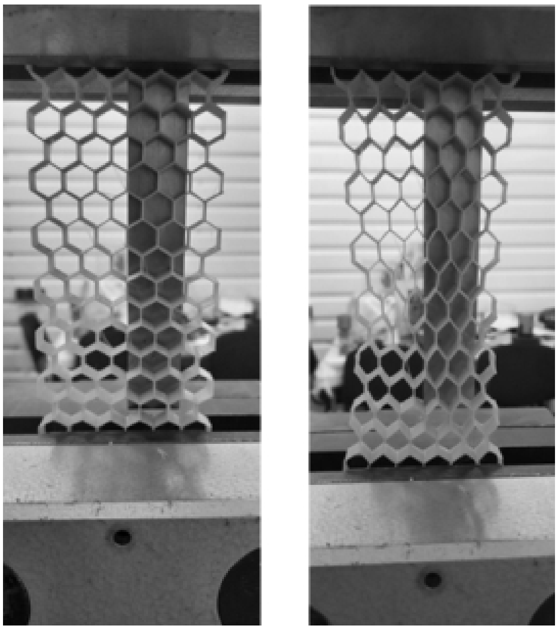
$$\sigma_X = \sum_{k=1}^{N_f} \bar{\sigma}_k v_k, \qquad (2)$$

де N_f – число скінченних елементів; $\bar{\sigma}_k$ – усереднене значення напруження в k-му скінченному елементі; v_k – об’єм k-го скінченного елемента. За величинами напружень розраховуються розтягувальні зусилля.

Як випливає з експериментального аналізу, перед руйнуванням стільників переміщення кінця стільників порівняні з їх товщиною. Тому в розрахунках враховується геометрично нелінійне деформування стільників при розтягненні і в пакеті ANSYS розв’язується нелінійна задача. Було проведено моделювання зразків з матеріалу PLA.

Результати розрахункового аналізу порівнювалися з експериментальними даними. При проведенні експериментів розтягувалися чотири стільникові зразки. Отримані діаграми деформування усереднювалися. Випробування проводилися нарощуванням навантаження до руйнування зразка при рівномірній швидкості руху навантажувального затискача машини, що дорівнювала 5 мм/хв. В ході випробувань фіксувалися і записувалися навантаження, переміщення і час.

В експерименті спостерігалися значні переміщення зразків. Так, в довжину зразок розтягувався на (12 ÷ 17) мм. На рис. 4, а) показана фотографію зразка перед початком навантаження, а на рис. 4, б) представлено розтягнутий зразок перед руйнуванням. Фотографії зруйнованих зразків показано на рис. 5.



а) б)

а) – зразок перед випробуванням на розтягнення;
б) – зразок перед руйнуванням

Рис. 4 – Зразок стільникового заповнювача при випробуванні на розтягнення:

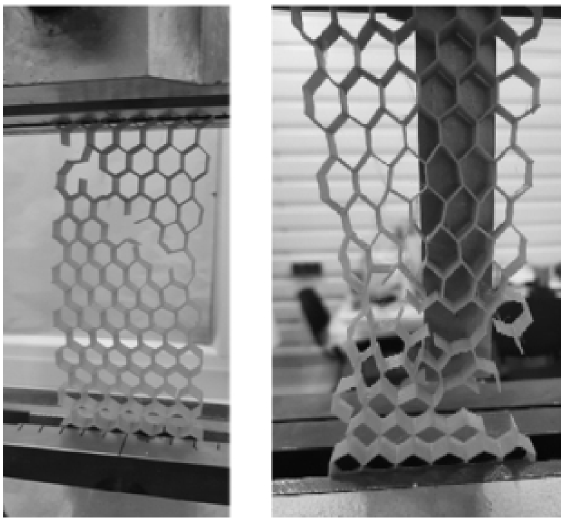


Рис. 5 – Два зруйнованих зразка

На рис. 6 суцільною лінією показана осереднена експериментальна діаграма розтягнення. Результати скінченно-елементного моделювання при геометрично нелінійному деформуванні зразка позначено точками. Більшість розрахункових точок знаходяться поблизу експериментальної кривої.

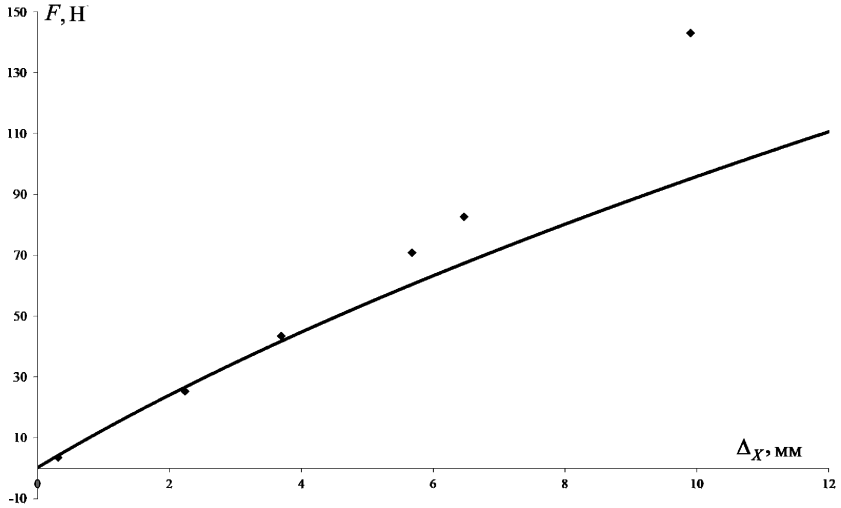


Рис. 6 – Порівняння результатів випробувань на розтягнення із скінченно-елементним моделюванням

Поля переміщень стільникового заповнювача, отримані в пакеті ANSYS, наводяться на рис. 7. Поблизу вільної сторони стільникового зразка спостерігаються максимальні переміщення.

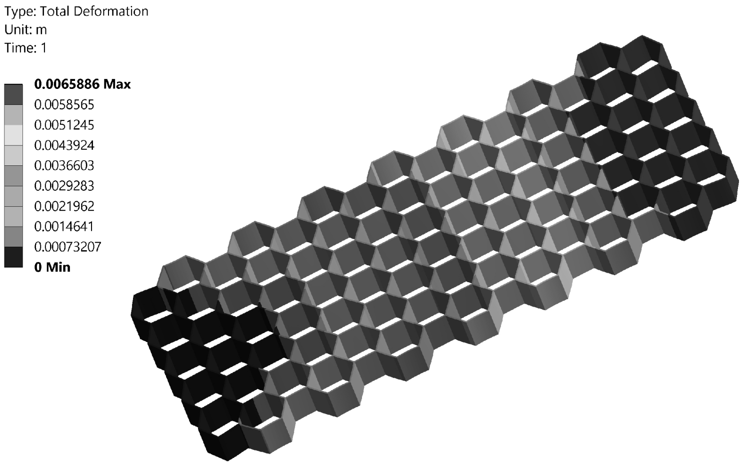


Рис. 7 – Поля переміщень стільникового заповнювача

Проводилося числове моделювання розтягнення зразка з матеріалу PLA в *W*-напрямку стільників. Стільниковий заповнювач мав наступні розміри: 137,6 × 70,2 × 10 мм. Розміри одного стільника з матеріалу PLA представлені вище. Скінченно-елементна модель містить 906200 елементів з 5038637 вузлами.

Для розрахунку діаграми деформування застосовується підхід, запропонований вище. У розрахунках враховувалося геометрично нелінійне деформування стільникового заповнювача. Розраховувався стільниковий заповнювач без побудови гомогенізованої моделі. Результати моделювання діаграми деформування стільникового заповнювача з урахуванням геометричної нелінійності показано суцільною лінією на рис. 8. Як випливає з рис. 8, в цьому випадку поведінка конструкції є нелінійною.

Було побудовано гомогенізовану модель стільникового заповнювача. Стільниковий заповнювач описується пластинкою з ізотропного матеріалу, яка схильна до розтягнення. Враховується геометрично нелінійне деформування пластинки. Результати розрахунку діаграми деформування показано пунктирною лінією на рис. 8. В цьому випадку діаграма деформування близька до прямої лінії.

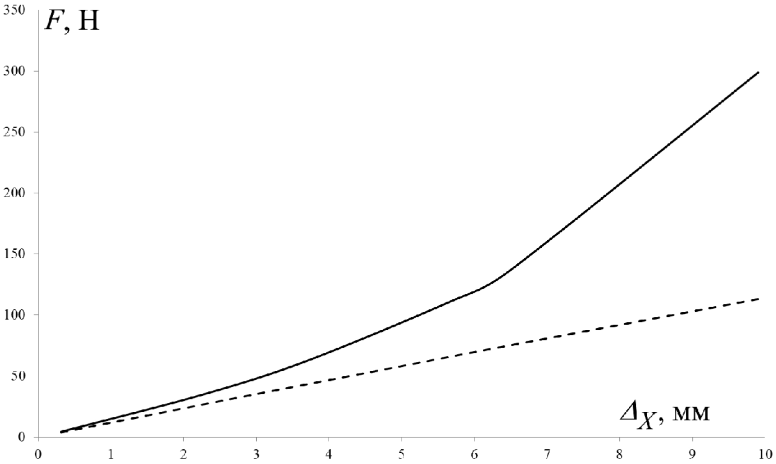


Рис. 8 – Діаграма деформування стільникового заповнювача

Отже, як випливає з рис. 8, прямий розрахунок стільників і аналіз гомогенізованої моделі дають різні результати. При прямому моделюванні стільників вони є тонкостінними стрижневими конструкціями, які працюють на згин. В цьому випадку геометрична нелінійність вносить помітний внесок в деформування конструкції. Тому залежність, зображена суцільною лінією на рис. 8, є нелінійною.

При розтягненні пластини (гомогенізована модель) внесок геометричної нелінійності дуже малий. Тому залежність наближається до лінійної.

Висновки. Експериментально досліджуються механічні характеристики стільникових пластин на розтягнення. З експериментального аналізу випливає, що стінки стільникового заповнювача при малих значеннях розтягувального зусилля лінійно деформуються, а при значних величинах зусиль відбувається геометрично нелінійне деформування.

Побудовано скінченно-елементну модель розтягнення стільникового заповнювача, що враховує деформування кожного стільника. Діаграма деформування, отримана експериментально, добре узгоджується з розрахунковими даними. Діаграма деформування є нелінійною, що пояснюється геометрично нелінійною деформацією стільників.

Побудовано гомогенізовану модель стільників для дослідження їх розтягнення. Показано, що ця модель неадекватно описує геометрично нелінійне деформування при розтягненні стільників.

Фінансування. Дослідження було фінансовано Національним фондом досліджень України (проєкт «Оптимізація топології та підвищення міцнісних характеристик багатошарових оболонок і твердих тіл при використанні адитивних технологій», реєстраційний номер 2020.02/128).

1. *Matthews N.* Additive Metal Technologies for Aerospace Sustainment. Aircraft Sustainment and Repair. 2018. P. 845–862. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100540-8.00015-7
2. *Boparai K. S., Singh R.* Advances in Fused Deposition Modeling. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2017. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04166-7.
3. *Byberg K. I., Gebisa A. W., Lemu H. G.* Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling. Polymer Testing. 2018. Vol. 72. P. 335–347. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.040
4. *Ahn S.-H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K.* Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal. 2002. Vol. 8 (4). P. 248–257. https://doi.org/10.1108/13552540210441166.
5. *Gerisa A. W., Lenu H. G.* Influence of 3D printing process parameters on tensile properties of ULTEM 9085. Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 30. P. 331–338. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.047.
6. *Motaparti K. P., Taylor G., Leu M. C., Chandrashekhara K., Castle J., Matlack M.* Effects of build parameters on compression properties for ULTEM 9085 parts by fused deposition modeling. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. 2016. P. 964–977.
7. *Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciu F., Marinescu R.* FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. Polymer Testing. 2018. Vol. 69. P. 157–166. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
8. *Zaldivar R. J., Witkin D. B., McLouth T., Patel D. N., Schmitt K., Nokes J. P.* Influence of Processing and Orientation Print Effects on the Mechanical and Thermal Behavior of 3D-Printed ULTEM® 9085 Material. Additive manufacturing. 2016. Vol. 13. P. 71–80. https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.007
9. *Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Q., Advincula R. C.* Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Additive Manufacturing. 2018. Vol. 20. P. 44–67. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002
10. *Kucewicz M., Baranowski P., Stankiewicza M., Konarzewskia M., Płatekb P., Małachowskia J.* Modelling and testing of 3D printed cellular structures under quasi-static and dynamic conditions. Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 145. 106385. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106385
11. *Li S., Liu Z., Shim V.P.W., Guo Y., Sun Z., Li X., Wang Z.* In-plane compression of 3D-printed self-similar hierarchical honeycombs – Static and dynamic analysis. Thin–Walled Structures. 2020. Vol. 157. 106990. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106990
12. *Bhandaria S., Lopez-Anido R.* Finite element analysis of thermoplastic polymer extrusion 3D printed material for mechanical property prediction. Additive Manufacturing. 2018. Vol. 22. P. 187–196. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.009
13. *Деревянко І., Аврамов К., Успенський Б., Саленко О.Ф.* Експериментальний аналіз механічних характеристик деталей ракет-носіїв, виготовлених за допомогою FDM адитивних технологій. Технічна механіка. 2021. №1. С. 92–100. https://doi.org/10.15407/itm2021.01.092

Отримано 27.11.2021,
в остаточному варіанті 06.04.2022