

С.Л. Куцик, О.А. Мікуліч

Луцький національний технічний університет, кафедра прикладної математики та механіки

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ЕФЕКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ 3D-ДРУКУ

*В роботі представлено результати експериментальних досліджень зміни ефективних характеристик у елементах 3D друку за наявності геометричної неоднорідності та їх армування. Дослідження проведені у випадку стискувальних випробувань вздовж та впоперек орієнтації волокон. Для проведення досліджень використовувалися тестові зразки, виготовлених на 3D принтері з використанням PETG пластику. Встановлено, що дія стискувального навантаження у напрямку, перпендикулярному друку зразків, дозволяє збільшити пружні характеристики на 12%. На основі експериментальних досліджень вивчено ефективність використання армуючих елементів оптимізацію механічних та міцнісних характеристик деталей. Запропонований у роботі підхід дозволяє оптимізувати експлуатаційні характеристики деталей, виготовлених 3D друком.*

*Ключові слова:* Філамент, FDM-технологія, ефективні характеристики

S.L. Kutsyk, O.A. Mikulich

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECTIVE CHARACTERISTICS CHANGING FOR 3D PRINTING ELEMENTS

*The paper presents the results of experimental research on the change of effective characteristics in 3D printing elements in the presence of geometric heterogeneity and their reinforcement. The study was carried out in the case of compression tests along and across the orientation of the fibers. Test samples made on a 3D printer using PETG plastic were used for the research. It was established that the action of the compressive load in the direction perpendicular to the printing of the samples increases the elastic characteristics by 12%. Based on experimental studies, the effectiveness of the use of reinforcing elements and the optimization of the mechanical and strength characteristics of the parts were studied. The approach proposed in the work allows the optimize the operational characteristics of parts manufactured by 3D printing.*

*Keywords:* Filament, FDM technology, effective characteristics

**Постановка проблем.** Використання адитивного виробництва, що є технологією пошарового автоматизованого створення тривимірних об'єктів, істотно зросло у сучасній інженерії. Застосування таких технологій сьогодні дозволяє значно розширити та продовжити експлуатаційні терміни багатьох машин, оскільки дає можливість швидкої заміни деталей без значних технологічних труднощів. В наш час 3D друк стає все більш поширеним та універсальним методом виробництва який зустрічається як в домашніх умовах, так і на виробництві та навчанні. Ця технологія характеризується ефективністю при виготовленні складних деталей за короткий проміжок часу без значних фінансових затрат, що дозволяє отримати різноманітні елементи: від невеликих деталей, таких як шестерні, дрібні запчастини, до будівництва будинків.

Проте, використання технологій 3D друку дає лише можливість отримати деталі, аналогічні за формою та розміром, але, не завжди, аналогічні за міцнісними характеристиками. Крім того, технологія друку істотно впливає на експлуатаційні характеристики відповідних деталей. Слід відмітити, що не у всіх випадках можливе натурне випробування деталей, отриманих 3D друком.

Тому, **метою дослідження** є експериментальне дослідження зміни ефективних характеристик матеріалів, отриманих 3D друком, за різних режимів навантажування.

**Огляд літературних джерел.** В роботах [1-4] було проаналізовано результати випробувань на розтяг, згин та стиск зразків з різною орієнтацією друку, швидкості, щільності заповнення, товщиною та було встановлено, що найбільшу міцність мають зразки зі стільниковою структурою. Крім того, експериментально підтверджено, що швидкість друку має значний вплив на якість зразка, при тому що такі характеристики, як: мікротвердість, модуль Юнга мало залежать від швидкості друку.

В [5], [6] представлені результати досліджень механічних властивостей зразків, які виготовлені з PETG пластику без включень і з армуванням. В даних роботах проаналізовано вплив армування на механічні властивості пластику його позитивний та негативний вплив на механічні характеристики деталі, а також потенційну можливість використання 3D технології для покращення властивостей матриці і її зв'язку з волокнами армування.

В роботі [7], [8] було проаналізовано вплив таких факторів, як додавання армуючих волокон, схема заповнення та швидкість випробування на розтяг та стиск. В результаті було встановлено, що механічні властивості композиту збільшують міцність зразків до 30%, у випадку коли напрям армуючих волокон збігається з напрямом друку. Також для вибору оптимального філаменту для друку матриці, було проаналізовано різні види пластику які могли бути застосовані для

випробувань, їхні механічні характеристики. Тому на основі [9], було зроблено висновок, що найкращим по механічним характеристикам та простоті друку буде PETG пластик. Ще одним важливим фактором при виборі параметрів друку були такі, як температура нагріву філаменту та стола. На основі [10], нами було вибрано встановити оптимальну температуру нагріву сопла – 240 °С та стола – 80 °С.

Одним з аспектів, якому нами було приділена велика увага, це вибір оптимального напрямку волокон при випробуванні дослідних зразків на стиск. На основі дослідження [11], було проаналізовано чисельне моделювання та поведінку пластику в залежності від осі стискання. Також був проведений аналіз впливу розміру, тобто вибору оптимального розміру досліджуваних зразків на його механічні характеристики. В роботі [12] було встановлено, що механічні властивості друківаних полімерів залежать від розміру, але не залежать від типу матеріалу і найбільший вплив «ефект розміру» має на згин та розтяг, а лише потім на стиск та модуль пружності. Однак чіткої загальної тенденції в цьому відношенні авторами не було встановлено.

В роботі [13] на основі аналітично-числових підходів досліджено вплив ефективних механічних характеристик на концентрацію напружень у пластинах з подвійно періодичною системою підкріплених отворів. На основі даних числового експерименту можна зробити висновок, що використання у перфорованих пластинках замкнутих підкріплювальних накладок на отворах дає можливість значно знизити концентрацію напружень на них та збільшити ефективні механічні характеристики такої композиції.

**Методика дослідження.** Для проведення дослідження, використовувався PETG пластик від «Monofilament». Цей вид філаменту характеризується хорошим поєднанням фізико-механічних характеристик і простоти 3D друку. Це робить його зручним матеріалом для 3D друку об'єктів за технологією FDM, які можуть піддаватися постійному або динамічному навантаженню. Його можна використовувати для виготовлення деталей машин, деталей 3D-принтера, захисних корпусів, деталей для автомобілів та багато іншого.

Механічні характеристики філаменту [14]: густина – 1,25 г/см<sup>3</sup>, температура експлуатації – 0...+70 °С, міцність на розтяг – 50 МПа, відносне видовження при розриві – 24%, модуль пружності при розтягу – 1920 МПа, модуль пружності при згині – 1980 МПа, міцність при згині – 76 МПа, твердість за Роквеллом – 104, водопоглинання – 3% (за 24 год. при 23 °С).

Друк зразків проводився на 3D-принтері «KLEMA 180» з наступними параметрами друку: швидкість друку – 50 мм/с; щільність заповнення – 90%; висота шару – 0,2 мм. Для дослідження зміни механічних та міцнісних характеристик друківаних виробів було виготовлено три групи досліджуваних зразків, які стискалися вздовж та поперек волокон.

Перша група зразків мала вигляд куба зі сторонами 20x20x20 мм. На рис. 1 представлено дослідні зразки, що стискалися вздовж та впоперек волокон (напрямок деформування показано стрілками). Випробування на стиск проводилося на дослідній машині МІ-40КУ з граничним навантаженням 40 кН при швидкості 2 мм/хв навантаженням, що відповідає випадку статичного навантаження. На основі діаграм стиску зразків, представлених на рис. 1, було вивчено ефективні механічні характеристики матеріалу, отриманого при 3D друці, в залежності від напрямку деформування.

Для вивчення впливу концентраторів напружень на зміну ефективних характеристик матеріалів, отриманих 3D друком, було досліджено другу (рис. 1 в, з) та третю (рис. 1 д, е) групи дослідних зразків, виготовлених у вигляді прямокутного паралелепіпеда, що послаблений системою чотирьох тунельних порожнин кругового перерізу, які друкувалися різним типом з наявністю і відсутністю підсилень отворів.

Для вивчення впливу концентраторів напружень та режимів експлуатації на ефективні характеристики та механічну поведінку відповідних елементів було проведено експериментальні дослідження на стиск відповідних дослідних зразків, що виготовлені шляхом 3D друку (рис. 1 в, д) з вільними отворами та у випадку наявності підсилень (рис. 1 з, е), та зазнають навантаження у напрямку, що відповідає напрямку друку (рис. 1 в, з) та перпендикулярний до нього (рис. 1 д, е). Для підсилення отворів дослідних зразків другої та третьої групи використовувалася алюмінієва трубка (рис. 2) діаметром 10 мм та товщиною стінки 1 мм. Трубка розміщувалася по всій довжині отвору.

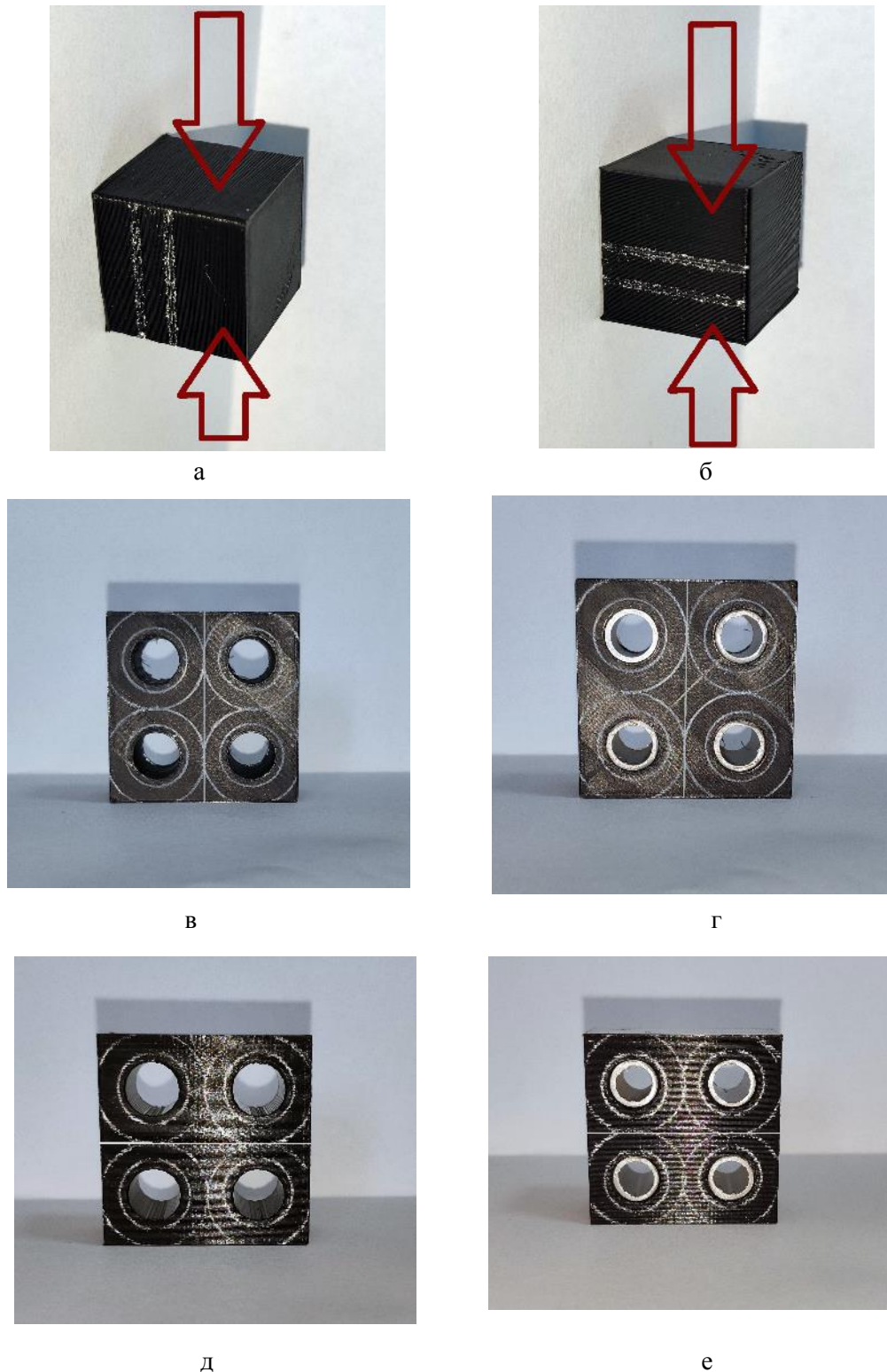


Рис. 1. Різні групи дослідних зразків

Для вивчення впливу концентраторів напружень та режимів експлуатації на ефективні характеристики та механічну поведінку відповідних елементів було проведено експериментальні дослідження на стиск відповідних дослідних зразків, що виготовлені шляхом 3D друку (рис. 1 в, д) з вільними отворами та у випадку наявності підсилень (рис. 1 г, е), та зазнають навантаження у напрямку, що відповідає напрямку друку (рис. 1 в, г) та перпендикулярний до нього (рис. 1 д, е). Для підсилення отворів дослідних зразків другої та третьої групи використовувалася алюмінієва трубка (рис. 2) діаметром 10 мм та товщиною стінки 1 мм. Трубка розміщувалася по всій довжині отвору.

Ефективні характеристики матеріалу: межа текучості, межа пропорційності, модуль Юнга розраховувалися за формулами [15], [16], [17]:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{S_0}, \sigma_{II} = \frac{P_{II}}{S_0}, E = \frac{\Delta P}{\Delta l},$$

де  $P_T$  – навантаження, яке відповідає межі текучості;

$P_{II}$  – навантаження, яке відповідає межі пропорційності;

$S_0$  – площа поперечного перерізу зразка до випробування.

На основі проведених досліджень з діаграм навантажень зразків (рис. 3, 4) ми визначили модуль Юнга для зразка який стискався вздовж волокон  $E = 398$  МПа та поперек волокон  $E = 517$  МПа, межа текучості при цьому становила  $\sigma_T = 29$  МПа та  $\sigma_T = 42$  МПа відповідно.

Враховуючи, що відношення модуля Юнга вздовж та поперек волокон рівне 0,769 можна стверджувати, що матеріал проявляє істотну анізотропію механічних властивостей залежно від напрямку стискання. Тому актуальним є вивчення впливу напрямку прикладання зовнішнього навантаження на експлуатаційні властивості деталей.



Рис. 2. Алюмінієва трубка для армування зразків

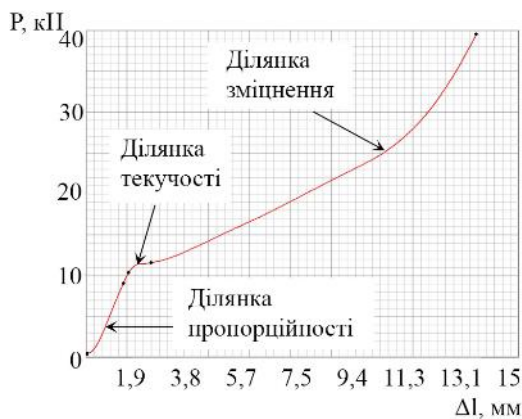


Рис. 3. Діаграма навантажень зразка першої групи, який стискався вздовж волокон

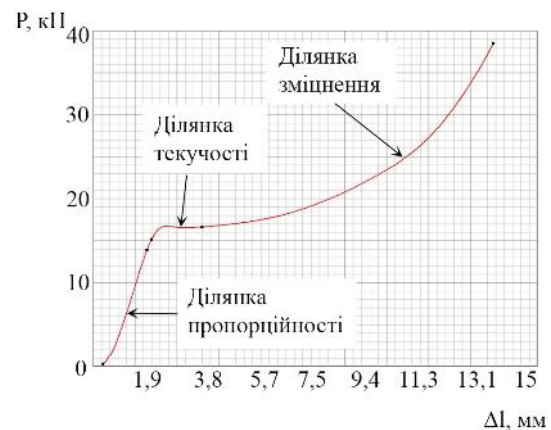


Рис. 4. Діаграма навантажень зразка першої групи, який стискався поперек волокон

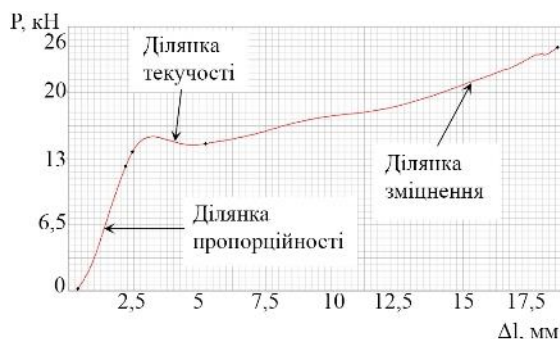


Рис. 5. Діаграма навантажень зразка другої групи з системою вільних отворів, який стискався вздовж волокон

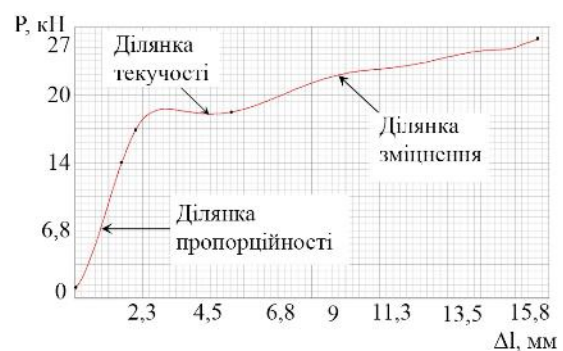


Рис. 6. Діаграма навантажень зразка другої групи з системою підкріплених отворів, який стискався вздовж волокон

На рис. 6, 7, 8, 9 зображені діаграми навантажень зразків другої та третьої групи, котрі стискалися поперек та вздовж волокон.

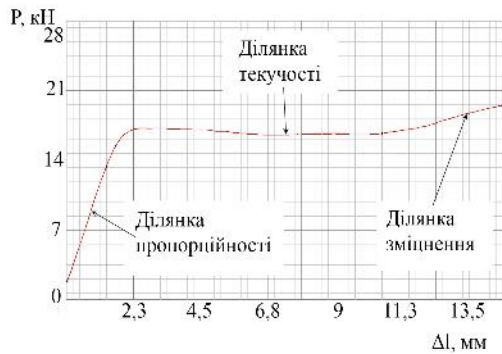


Рис. 7. Діаграма навантажень зразка третьої групи з системою вільних отворів, який стискався поперек волокон

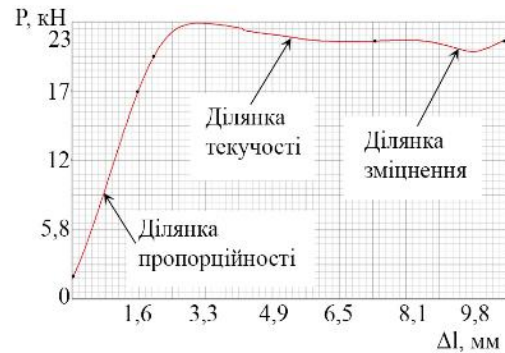


Рис. 8. Діаграма навантажень зразка третьої групи з системою підкріплених отворів, який стискався поперек волокон

На рис. 3-8 зображені діаграми стискання досліджуваних зразків: рис. 3, 4 – діаграми навантажень першої групи зразків, рис. 5, 6 – діаграми навантажень другої групи зразків, рис. 7, 8 – діаграми навантажень третьої групи зразків.

З отриманих діаграм навантажень, нами було розраховано ефективні міцнісні характеристики матеріалів: межу пропорційності та межу текучості для всіх груп зразків. Для першої групи зразків, які стискалися вздовж волокон ці значення становили – 25 та 29 МПа, та поперек волокон – 35 та 42 МПа відповідно. Для другої групи з вільними отворами вздовж волокон – 33, 36 МПа, для третьої групи з вільними отворами поперек волокон – 35 та 42 МПа. Для другої групи зразків з підкріпленими отворами – 37,5 і 46 МПа відповідно, та третьої групи з підкріпленням – 43 та 53 МПа.

**Результати досліджень.** Результати експериментальних випробовувань показують, що межа пропорційності зразків третьої групи, які стискалися поперек волокон з вільними отворами мають кращі механічні характеристики ніж ті, що стискалися вздовж волокон (зразки другої групи) на 6% і на 15% відповідно для підкріплених отворів поперек волокон (III група зразків), а ніж вздовж волокон (II група зразків). Межа текучості для зразків з вільними отворами поперек волокон (III групи) на 17% більша ніж для зразків вздовж волокон (II група) і відповідно з підкріпленими отворами на 15% зразки поперек волокон (III група) проявили кращі механічні характеристики.

У ході проведення експерименту (дослідження зразків другої групи з вільними і підкріпленими отворами) встановлено, що у випадку коли дія стискувального навантаження співпадає з напрямком друку зразка межа пропорційності на 12% є меншою, ніж для зразків, що піддаються стиску у напрямку, перпендикулярному напрямку друку зразків (III група). Крім того, межа текучості є більшою на 14% у випадку коли напрям друку зразка є перпендикулярним, (для зразків III групи) напрямку дії стискаючого навантаження.

На рис. 9-11 наведено вигляд дефектів, що утворилися у зразках під час випробувань.

Експериментальні дослідження показали, що під час руйнування за дії стискувального навантаження не у всіх випадках (рис. 6) на границі отворів утворитися тріщини (рис. 5, 7, 8) в наслідок концентрації напружень. Проте, слід відмітити, що в у випадку підсилення отвору (рис. 6) за дії навантаження вздовж волокон після випробування зразка тріщини на границі отворів не спостерігалися, що може свідчити про те, що армування позитивно впливає на механічні властивості зразка, що підтверджується отриманими результатами.

У випадку коли зразок стискався вздовж волокон з системою вільних отворів (рис. 5), то на зразку в процесі деформації утворилися тріщини (рис. 9). Також тріщини спостерігалися у випадку стискання зразка поперек волокон (рис. 7) з системою вільних отворів (рис. 10). Після проведеного випробування встановлено, що тріщини утворювались і росли не лише паралельно до напрямку волокон, а й перпендикулярно, розриваючи волокна, а також впоперек волокон для випадку деформування зразка з системою підкріплених отворів (рис. 8). Виявлений тип руйнування (рис. 11) міг виникнути через напрям розміщення волокон.

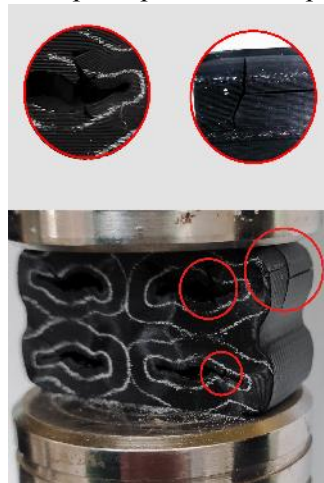
Під час експериментальних досліджень виявлено, що після деформування зразка можна помітити, що верхня права трубка, деформувалась лише на 30%, що викликало додаткове напруження на отвір який розміщувався під нею. У цьому випадку видно, що деформація трубки

значно більша ніж в отворах зліва, в сумі ці два фактори і спричинили утворення концентратора напружень – тріщини в даному зразку.

Підсумовуючи вищесказане можна зробити загальний висновок, що зразки котрі стискалися поперек волокон мають кращі механічні характеристики від зразків вздовж волокон.



*Рис. 9. Виявлена тріщина зразка другої групи з системою вільних отворів*



*Рис. 10. Виявлена тріщина зразка третьої групи з системою вільних отворів*



*Рис. 11. Виявлена тріщина зразка третьої групи з системою підкріплених отворів*

**Висновки.** Отримані у роботі результати експериментальних досліджень впливу орієнтації волокон та наявності армування дозволяють підібрати оптимальні режими експлуатації для деталей, виготовлених при 3D друку. Проведені дослідження дозволили дослідити зміну ефективних характеристик матеріалів, отриманих 3D друком, за різних напрямків дії стискувального навантаження. Експериментальні дослідження геометрично-неоднорідних тіл, що послаблені системою тунельних порожнин кругового перерізу з вільними та підкріпченими отворами, дозволило встановити ефективність використання армуючих елементів на оптимізацію механічних та міцнісних характеристик деталей.

#### **Список використаних джерел:**

1. T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, I. Pakši, Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects, J. Procedia Engineering 149 (2016) pp. 100-104.
2. K. Durgashyam, M. Indra Reddy, A. Balakrishna, K. Satyanarayana, Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method, J. Materials Today: Proceedings 18 (6) (2019) pp. 2052-2059.
3. A. Saxena, A. K. Srivastava, P. K. Kushwaha, S. Sharma, An investigation on the influence of three-dimensional printing orientation on the tensile and flexural strength of polymer and plastic materials, J. Mechanics of Advanced Materials and Structures IF 2.8 (2024).
4. J. Loskot, D. Jezbera, R. Loskot, D. Bušovský, A. Barylski, K. Glowka, P. Duda, K. Aniołek, K. Voglová, M. Zubko, Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products, J. Polymer Testing 123 (2023).
5. K. Szykiedans, W. Credo, D. Osiński, Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints, J. Procedia Engineering 177 (2017) pp. 455-461.
6. S. H. Reza Sanei, Z. Lash, J. Servey, F. Gardone, C. P. Nikhare, Mechanical Properties of 3D Printed Fiber Reinforced Thermoplastic, ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (2019).
7. T. Fisher, J. Humberto S. Almeida Jr, B.G. Falzon and Z. Kazanci, Tension and Compression Properties of 3D-Printed Composites: Print Orientation and Strain Rate Effects, J. Polymers 15(7) (2023)
8. M. Batista, J. M. Lagomazzini, M. Ramirez-Peña and J. M. Vazquez-Martinez, Mechanical and Tribological Performance of Carbon Fiber-Reinforced PETG for FFF Applications, J. Appl. Sci. 13 (23) (2023).

9. J. Sedlak, Z. Joska, L. Hrbackova, E. Jurickova, D. Hrusecka, O. Horak, Determination of Mechanical Properties of Plastic Components Made by 3D Printing, J. Manufacturing Technology 22 (6) (2022) pp. 733-746.

10. F. J. O. Ribeiro, M. F. O. de Miranda, N. dos S. Saad, A. Z. Guarato, Experimental analysis on the mechanical properties of PETG parts made with fused deposition modeling manufacturing, Conference: 25th International Congress of Mechanical Engineering (2019)

11. J. M. Mercado-Colmenero, M. D. La Rubia, E. Mata-Garcia, M. Rodriguez-Santiago and C. Martin-Doñate, Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications, J. Polymers (Basel) 12 (10) (2020).

12. H. Sadaghian, B. Dadmand, M. Pourbaba, S. Jabbari and J. H. Yeon, The Effect of Size on the Mechanical Properties of 3D-Printed Polymers, J. Sustainability 16 (1) (2024).

13. Сулим Г., Пастернак Я., Куцик С. Концентрація напружень та ефективні механічні характеристики пластинок із подвійно періодичними системами підкріплених отворів. // Вісник ТНТУ. – 2012. – Том 67. – № 3. – С. 7–16.

14. <https://3ddevice.com.ua/>

15. [https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s\\_modulus](https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus)

16. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/proportional-limit>

17. [https://en.wikipedia.org/wiki/Yield\\_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering))

**Рецензент:** Делявський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор