

А.Ю. Зимогляд, А.І. Гуда, С.О. Ткаченко

## ВПЛИВ СТРУКТУРИ ЗАПОВНЕННЯ ЗРАЗКІВ ПРИ 3D ДРУКУ НА ЇХ МІЦНІСТЬ

*Анотація.* У статті описано дослідження впливу структури заповнення 3D деталі на механічну міцність. Параметр заповнення (Infill) впливає на міцність та механічні властивості отриманого тривимірного об'єкта більше за інші. Тому саме цей параметр було досліджено в цій статті, її вплив на міцність надрукованої деталі.

У роботі було проведено дослідження впливу структури заповнення на механічні властивості деталі та проведено серію дослідів. Усього було перевірено 5 структур, а саме: зірка, клітинка, лінії, сітка та трикутник. За допомогою створеного устаткування, описаного у статті було проведено низька дослідів.

По отриманим даним можна зробити висновок, що деталі з заповненням трикутниками і зірками мають більшу механічну міцність, ніж лініями, сітками і клітинками. Також на цих заповненнях досягається більший модуль пружності.

*Ключові слова:* 3D print, структура заповнення деталі.

**Вступ.** Адитивні технології та зокрема 3D-друк - одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі. Друк здійснюється 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і простіші у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів (PLA, ABS, та ін.) та з різними механічними і фізичними властивостями за один процес друку.

3D-друк часто називають «магічною» технологією, оскільки дозволяє перетворювати, отримані в САД-системах моделі в готові вироби. У реальності процес 3D-друку вимагає також багато ручної праці, що включає попередню підготовку і подальшу обробку надрукованих деталей для досягнення їх бажаної якості.

Як і більшість верстатів з цифровим керуванням, 3D-принтери створюють тривимірний об'єкт за допомогою G-CODE. G-CODE є найбільш популярною мовою програмування комп'ютерного числового керування (CNC, computer numerical control), зокрема для керування 3D-принтерами. G-CODE складається з команд, що вказують рухи, швидкості, нагрівання екструдеру, нагрівання стола та інші параметри пристрою під час виробництва моделі. Кожна команда G-CODE має конкретний формат і відповідає

певному виробничому процесу або дії. Мова G-CODE була розроблена в далекому 1950 році у лабораторії MIT (також відома, як RS-274 вже після декількох змін від версії RS-273). Перша стандартизована версія була опублікована в 1963 році та фіналізована в 1982 (Standards for Computer Aided Manufacturing).

Для генерації G-CODE, який призначено для створення тривимірного об'єкта 3D-принтером використовується програмне забезпечення під назвою «слайсер» (Slicer). Slicer бере трьохвимірну модель у одному з спеціалізованих форматів, ділить її на окремі шари (товщину яких можна задати в налаштуваннях), а потім планує відповідний маршрут екструдера. При цьому існує безліч шляхів, як саме можна надрукувати ту чи іншу деталь, і використання кожного з шляхів задає певні властивості виробу. Також Slicer використовує велику множину різних параметрів, які задають правила створення тривимірного об'єкта, що друкується. До цих параметрів можна віднести: швидкість подачі (Feed Rate), рівномірність подачі (Flow Rate), температура екструдера (extruder) і ліжка\*(bed), параметри шарування, підтримка (Support), заповнення (Infill), режими друку (Print Modes), матеріал: та інші.

Параметр заповнення (Infill) впливає на міцність та механічні властивості отриманого тривимірного об'єкта більше за інші. Тому саме цей параметр було досліджено в цій статті, її вплив на міцність надрукованої деталі.

**Заповнення тривимірного об'єкта.** Заповнення в процесі 3D-друку відіграє важливу роль, впливаючи на міцність, вагу та витрати матеріалів. Воно може автоматично підлаштовуватися під параметри друку, але оптимізація цих налаштувань дозволяє заощадити ресурси та покращити якість готових виробів. Правильний вибір типу заповнення допомагає досягти кращих результатів, зокрема щодо міцності, гнучкості чи естетики виробу. Основні різновиди заповнення можна умовно розділити на такі категорії: гнучкі деталі (використовуються для моделей, що потребують скручування чи гнучкості, зберігаючи структуру при зміні осей); підвищена точність; об'ємні типи заповнення (надають виробу додаткову міцність); стандартна міцність (універсальні налаштування для виробів середньої міцності підходить для повсякденного використання); декоративні вироби (оскільки міцність не є пріоритетом, основний акцент робиться на підтримці верхніх шарів, можна зменшити щільність заповнення або взагалі його уникнути).

Нижче представлені основні різновиди заповнення, що використовуються частіше за все.

На рис. 1 представлено прямолінійне заповнення. Воно є одним із найпоширеніших типів для 3D-друку. Воно утворює прямі лінії, які чергуються між шарами: один шар друкується в одному напрямку, наступний — під кутом 90°. Така техніка допомагає ефективно використовувати нитку без надлишкового накопичення матеріалу на перетинах, як це буває у випадку сітчастого заповнення. Це робить процес швидшим і економічнішим.

Порівняно з сіткою, прямолінійний варіант забезпечує вдвічі кращу підтримку верхніх шарів, при цьому споживаючи аналогічну кількість матеріалу. Цей тип єдиний, який рекомендується для заповнення зі 100% щільністю. Якщо в налаштуваннях вста-

новлено інший тип заповнення, але щільність збільшується до 100%, програма автоматично змінить його на прямолінійний.

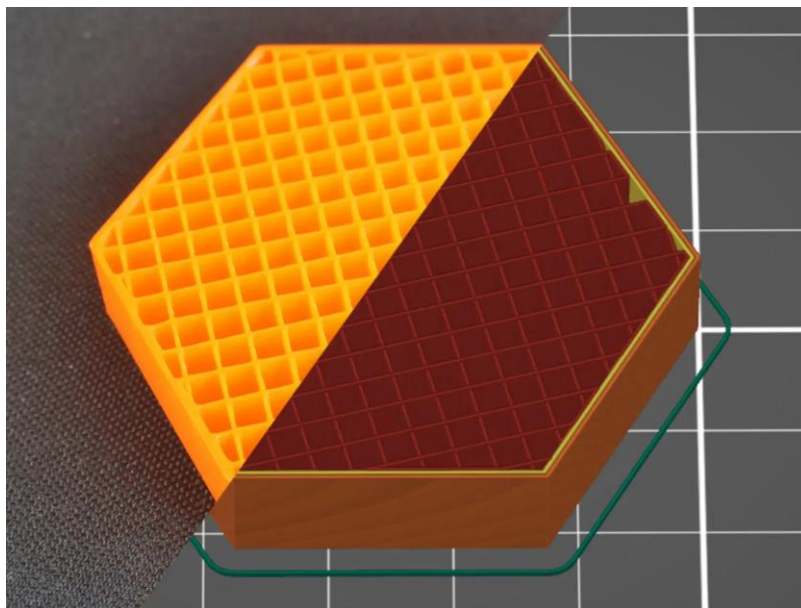


Рисунок 1 – Прямолінійне заповнення

На рис. 2 представлено сітчасте заповнення є одним із найпростіших та найшвидших варіантів для 3D-друку. Лінії перетинаються під кутом  $90^\circ$  в кожному шарі, що забезпечує високу міцність і кращу адгезію між шарами. Цей метод, на відміну від прямолінійного, дозволяє друкувати в обох напрямках, що значно прискорює процес.

Однак накопичення матеріалу в місцях перетину може викликати шум або навіть помилки під час друку, оскільки сопло проходить через ці точки. Якщо немає спеціальних вимог до виробу, сітчасте заповнення є універсальним рішенням, яке забезпечує баланс між міцністю, вагою та швидкістю друку.

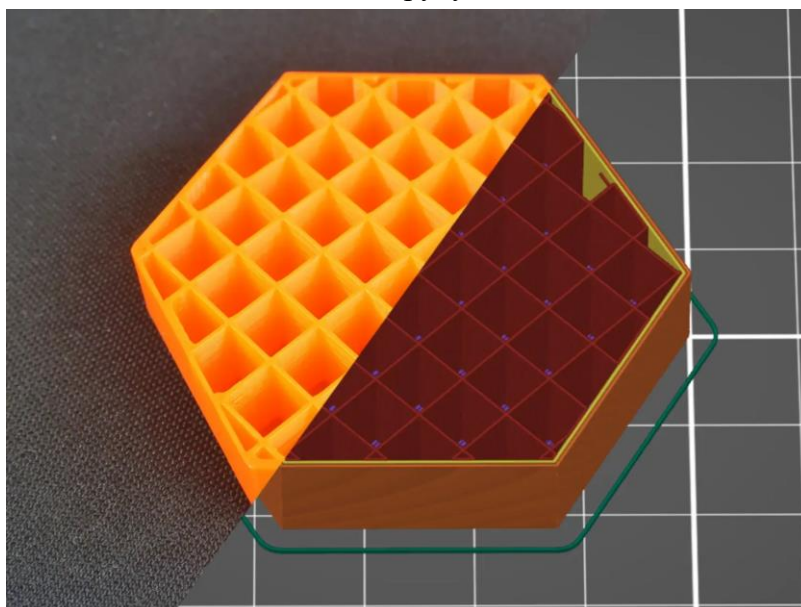


Рисунок 2 – Заповнення прямокутною сіткою

Шестикутне заповнення, або так звана “сотова” структура (рис. 3) створює сітку з шестикутників, яка є однією з найефективніших за своєю механічною стійкістю. Завдяки своїй геометрії, цей тип заповнення забезпечує рівномірний розподіл навантаження та чудову стійкість до деформацій, що робить його ідеальним для виробів, де необхідна висока міцність.

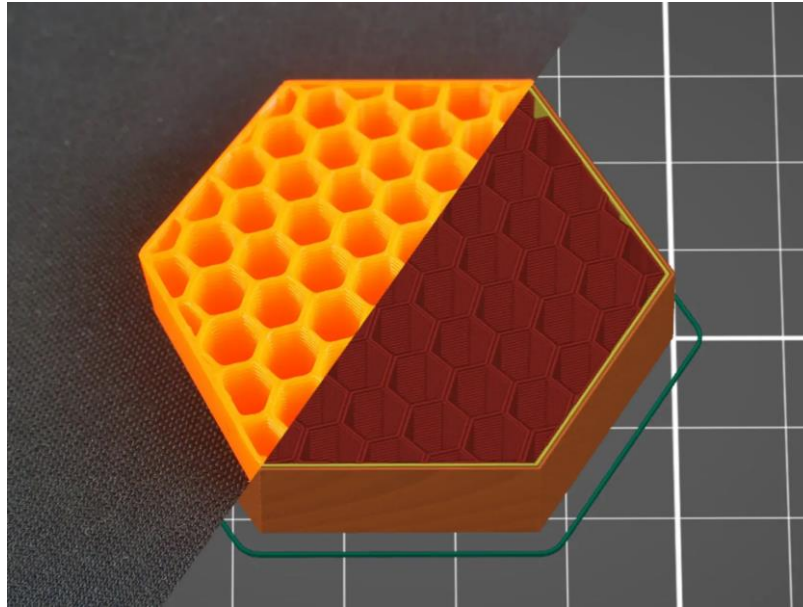


Рисунок 3 – Заповнення «соти»

Основна перевага шестикутного заповнення полягає в тому, що воно мінімізує ризик перетинів нитки, оскільки кожен шар друкується послідовно без зупинок або складних перетинів. Це зменшує ймовірність помилок під час друку та сприяє поліпшенню якості поверхонь. Однак цей тип заповнення має й свої недоліки. Він споживає на 25% більше матеріалу порівняно з іншими варіантами, такими як сітчасте або прямолінійне заповнення. Крім того, час друку значно збільшується — на деяких моделях цей тип заливки може потребувати вдвічі більше часу, що робить його менш ефективним для швидкого прототипування.

Зважаючи на це, шестикутна заливка часто використовується для виробів, де важлива максимальна міцність і стабільність, але не є найкращим вибором для економії матеріалу чи часу.

Заливка (рис. 4) у вигляді 3D-сот — це унікальний тип заповнення, який створює візерунок із чергуванням квадратів і восьмикутників. Ці елементи формують вертикальні стовпчики, що змінюються в товщині залежно від позиції в моделі. Головною особливістю цього типу заливки є те, що лінії не перетинаються в одному шарі, що забезпечує стабільну структуру без додаткового матеріалу на місцях перетинів.

Однак, через специфічний шлях друку, між шарами утворюються невеликі проміжки, що впливає на загальну міцність виробу. Такий підхід має трохи більшу витрату матеріалу і довший час друку, ніж класичні сотові візерунки. Попри це, 3D-соти пропонують унікальний баланс між міцністю та естетикою, роблячи їх гарним варіантом для виробів, де важливий зовнішній вигляд, а не лише механічні властивості.

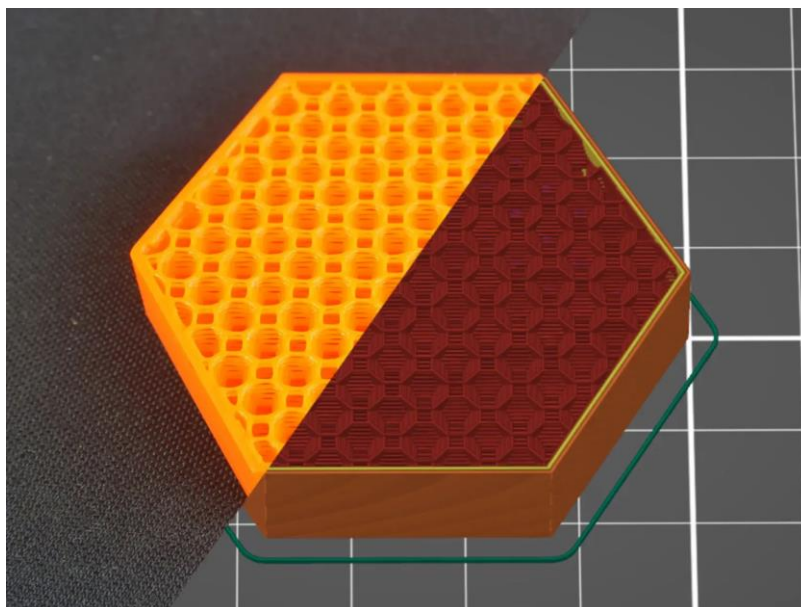


Рисунок 4 – Заповнення «3D соти»

Заливка «зірка» (рис. 5) характеризується шляхами, які перетинаються в межах одного шару, створюючи структуру у вигляді зірки, що орієнтована під певним кутом донизу. В результаті формуються численні повітряні кишені, які можуть слугувати як теплоізоляція або надавати об'єкту плавучість на воді, особливо при використанні водонепроникних матеріалів, таких як PETG. Час друку та витрата ниток залишаються на рівні з іншими варіантами заповнення.

Ця заливка ідеально підходить для виробів, які підлягають навантаженням. Об'ємне заповнення має вигляд симетричних пірамідок, що сприяє зменшенню жолоблення навантаження, яке розподіляється рівномірно по всьому виробу. Візуально на стінках моделей особливо помітно розташування ліній під діагональним кутом. Якщо ви прагнете уникнути цього ефекту, варто взяти відповідних заходів при налаштуванні друку.

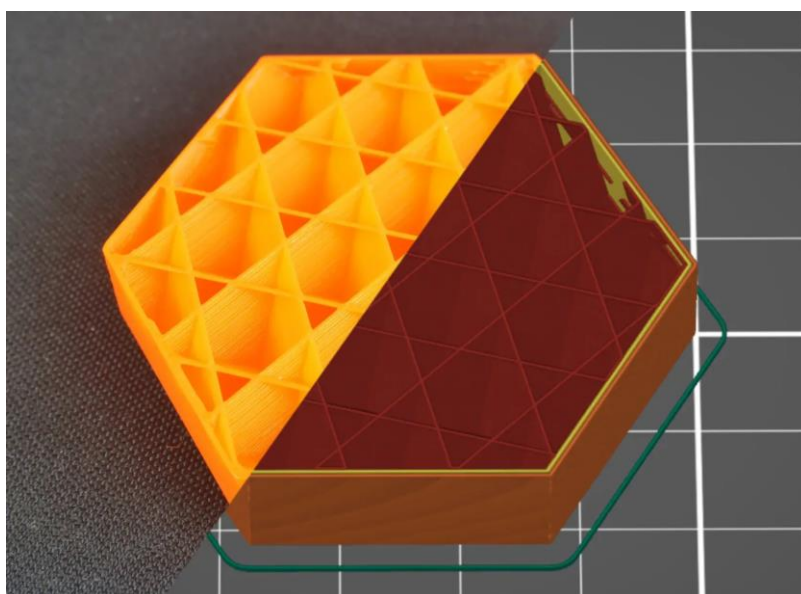


Рисунок 5 – Заповнення «зірка»

Цей тип заливки не лише забезпечує механічну стійкість, але й надає виробам унікальний вигляд, що робить його популярним вибором серед 3D-друкарів.

Представлені вище типи заливки, це основні, які частіше за все використовують. Взагалі існує більш ніж два десятка різних типів заливки і модифікацій цих типів. В дослідженні було обрано 5 найбільш різних типів, а саме: зірка, клітинка, сітка, трикутник і суцільні лінії.

**Створення об'єкту дослідження.** Для проведення дослідження впливу типу заливки на міцність деталі, створеної на 3D принтері було створено 10 зразків. По 2 зразки кожного типу заповнення, а саме: зірка, клітинка, сітка, трикутник і суцільні лінії.

В якості деталі було обрано пластину розміром 3x70мм, з 4 отворами 3 мм. Матеріалом було обрано PLA пластик, пластинка слугує частиною кріплення акумулятору для дрону (рис. 6).

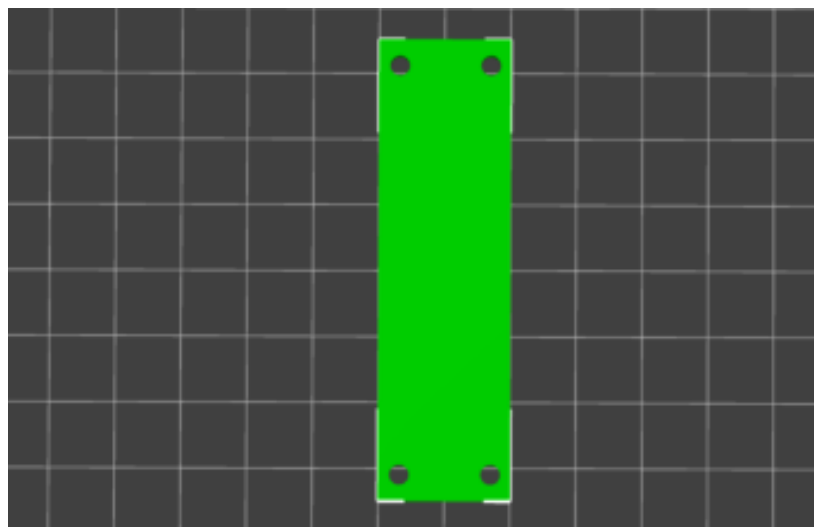


Рисунок 6 – Деталь кріплення акумулятору дрона

Для створення 3D моделі цієї деталі було використано середовище OpenSCAD (рис. 7).

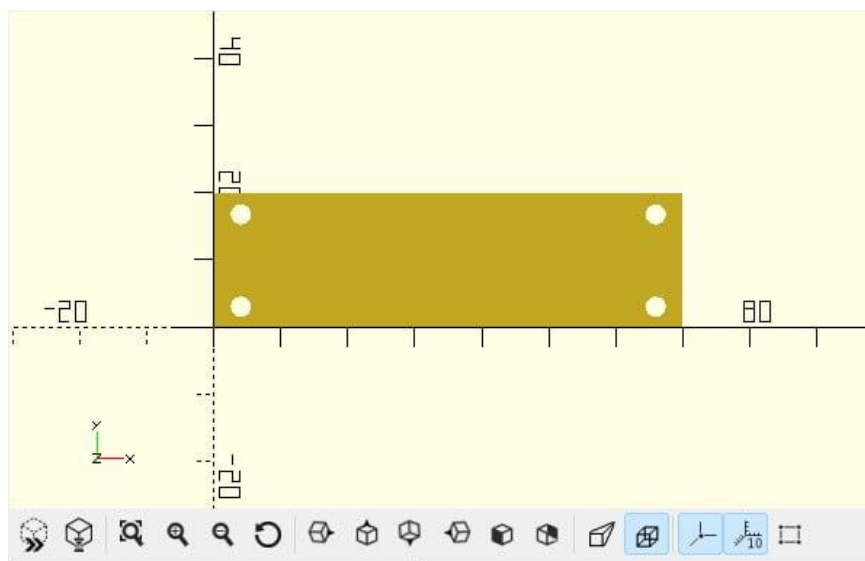


Рисунок 7 – Створена деталь в середовищі OpenSCAD

Лістинг коду деталі (середовище OpenSCAD) представлено нижче.

```
length = 70;
width = 20;
thickness = 3;
hole_diameter = 3;
hole_offset = 3; // Відстань від країв до отворів

module plate() {
  difference() {
    // Основна пластина
    cube([length, width, thickness]);

    // Ліві отвори
    translate([hole_offset, hole_offset, -0.1]) {
      cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter, $fn
= 50);

      translate([0, width - 2 * hole_offset, 0])
        cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter,
$fn = 50);
    }

    // Праві отвори
    translate([length - hole_offset, hole_offset, -0.1]) {
      cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter, $fn
= 50);

      translate([0, width - 2 * hole_offset, 0])
        cylinder(h = thickness + 0.2, d = hole_diameter,
$fn = 50);
    }
  }
}

plate();
```

Після створення 3D моделі в середовищі OpenSCAD і отримання 3D моделі в форматі STL треба було згенерувати G-CODE. Для його генерації було обрано слайсер PrusaSlicer (рис. 8).

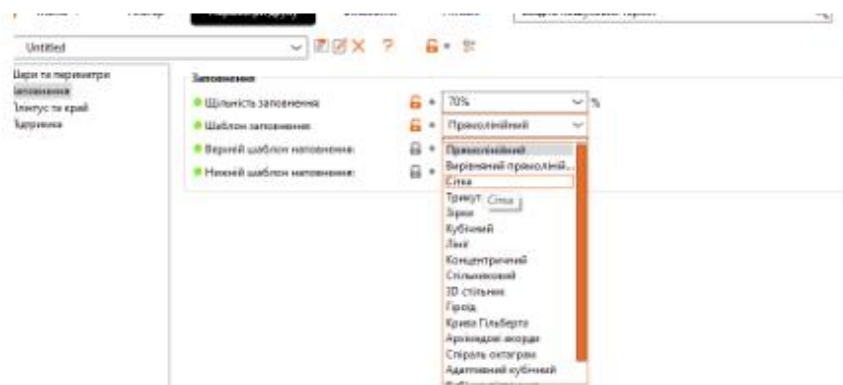


Рисунок 8 – Визначання типу заповнення у PrusaSlicer

За допомогою PrusaSlicer було згенеровано G-код для 5 зразків розробленої деталі з заповненням 70 % та різним шаблоном заповнення, а саме: зірка, клітинка, лінії, сітка та трикутник.

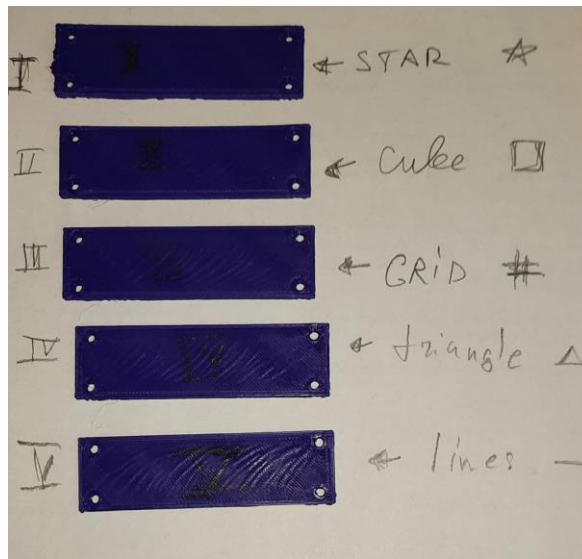


Рисунок 9 – Дослідні зразки з різним шаблоном заповнення

За допомогою отриманого G-коду 5 зразків було надруковано на 3D принтері (рис. 9).

**Дослідження залежності структури заповнення на міцність надрукованої деталі.** Для дослідження залежності структури заповнення на міцність було побудовано устаткування, яке структурно представлено на рис. 10.

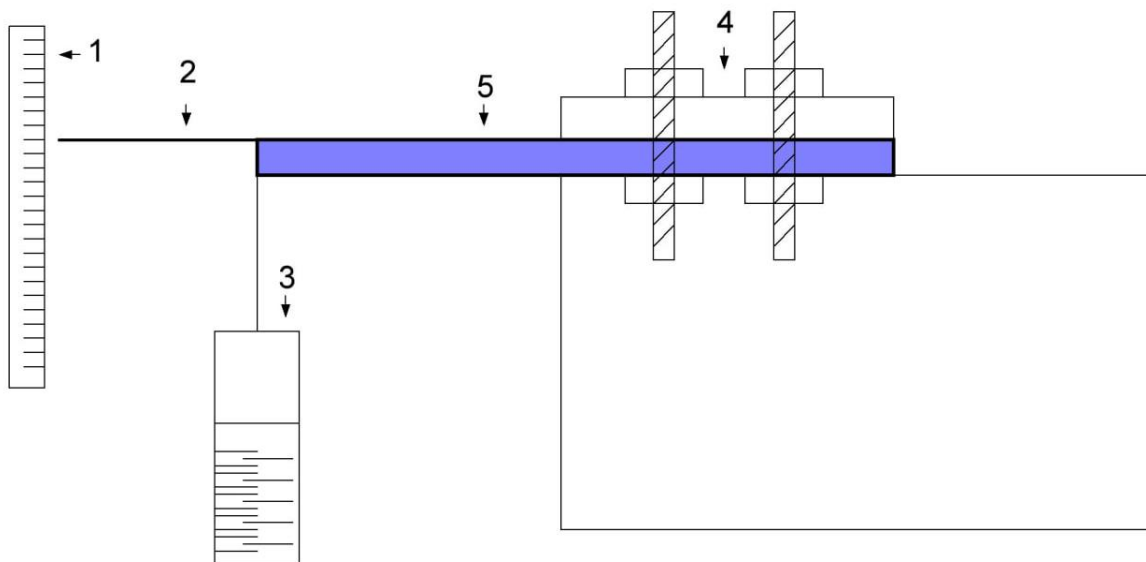


Рисунок 10 – Устаткування для дослідження надрукованих зразків

Устаткування (рис. 10) складається з: 1 – мірна шкала (транспортир); 2 – товста проволочка; 3 – ємність для води; 4 – кріплення зразку до столу; 5 – зразок, що досліджується.



В ході досліджу в ємність для води поступово додавалася вода. При цьому досліджуєми зразок потроху нагинався. При цьому кут нахилу вимірювався за шкалою транспортиру по проволочці закріпленої на зразку.

Для кожного зразка бралось 10 точок з кроком 100 мл, по ним будувався графік залежності структури заповнення на механічну міцність. Результати вимірювань у пружній зоні представлено на рис. 11.

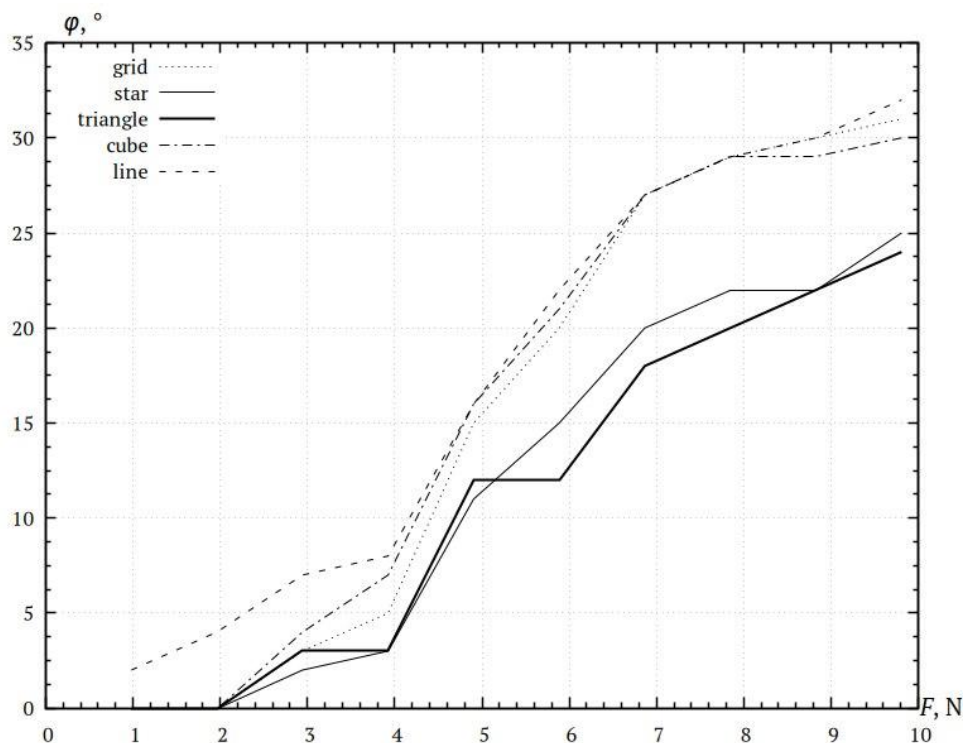


Рисунок 11 – Графік залежності кута нахилу кожного зразка від навантаження

Також було отримані умови навантаження, коли зразок було пошкоджено (Таблиця 1).

Таблиця 1

Назва зразка	Критичне навантаження, гр
line	2000
star	2700
grid	2200
triangle	3000
cube	2200

**Висновки.** Було проведено дослідження впливу структури заповнення на механічні властивості деталі та проведено серію дослідів. Усього було перевірено 5 структур, а саме: зірка, клітинка, лінії, сітка та трикутник. За допомогою створеного устаткування, описаного у статті було проведено низька дослідів.

По отриманим даним можна зробити висновок, що деталі з заповненням трикутниками і зірками мають більшу механічну міцність, ніж лініями, сітками і клітинками. Також на цих заповненнях достригається більший модуль пружності.

Також слід відмітити, що отримані результати мають суттєві похибки вимірювання. Тому результати, що були отримані, слід розглядати тільки як оцінні. Для отримання результатів, що можуть бути використано для досліджень з використанням кількісних характеристик, слід використовувати спеціалізоване обладнання. Також подальшого дослідження потребує питання анізотропії характеристик отриманих зразків.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kruth J.-P. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping [Text] / J.-P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1998. – Vol. 47, Issue 2. – P. 525–540.
2. Bruce M. R. Measurement and Simulation of Titanium Alloy Deposit Temperature in Electron Beam Additive Manufacturing / M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference. – Chicago, Illinois, USA, 2012. – P. 963–969.
3. Kruth J. P. Selective laser melting of iron-based powder / J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149, Issue 1–3. – P. 616–622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051

Received 03.03.2025.  
Accepted 05.03.2025.

#### ***Influence of 3D printing samples filling structure on their strength***

*Additive manufacturing technologies, and in particular 3D printing, are a form of additive manufacturing technology where a three-dimensional object is created by applying successive layers of material (printing, growing) based on a digital model. Printing is performed by a 3D printer, which creates a physical object by successively applying plastic material based on a virtual 3D model. 3D printers are typically faster, more affordable, and easier to use than other additive manufacturing technologies. 3D printers offer product developers the ability to print parts and mechanisms from multiple materials (PLA, ABS, etc.) and with different mechanical and physical properties in a single printing process.*

*The Infill parameter affects the strength and mechanical properties of the resulting 3D object more than others. Therefore, this parameter was investigated in this article, its effect on the strength of the printed part.*

*The work investigated the influence of the filling structure on the mechanical properties of the part and conducted a series of experiments. A total of 5 structures were tested, namely: star, cell, lines, grid and triangle. Using the created equipment described in the article, a series of experiments were conducted. According to the data obtained, it can be concluded that parts filled with triangles and stars have greater mechanical strength than with lines, grids and cells. Also, a higher modulus of elasticity is observed on these fillings. It should also be noted that the results obtained have significant measurement errors. Therefore, the results obtained should be considered only as estimates. To obtain results that can be used for studies using quantitative characteristics, specialized equipment should be used. Also, the issue of anisotropy of the characteristics of the obtained samples requires further study.*

**Зимогляд Андрій Юрійович** - к.т.н. доцент кафедри ІТС ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Український державний університет науки та технологій.

**Гуда Антон Ігорович** - д.т.н. професор кафедри ІТС ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Український державний університет науки та технологій.

**Ткаченко Станіслав Олександрович** - магістр кафедри ІТС ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Український державний університет науки та технологій.

**Zimoglyad Andrew** - candidate of technical science, assistant professor Department of ITS of the Scientific Research Institute "DMetI" of UDUNT.

**Guda Anton Igorevich** - doctor of engineering's sciences, professor Department of ITS of the Scientific Research Institute "DMetI" of UDUNT.

**Tkachenko Stanislav Oleksandrovych** - student of the ITS department Department of ITS of the Scientific Research Institute "DMetI" of UDUNT.