

УДК 666.972.16:621.7

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ СОПЛА НА ЯКІСТЬ ЕКСТРУЗІЇ ПРИ 3D-ДРУЦІ

THE INFLUENCE OF NOZZLE GEOMETRY ON EXTRUSION QUALITY IN 3D PRINTING

Марчук В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0999-0402, Тарасюк Т.О., аспірант ORCID 0009-0003-2261-9840 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marchuk Vitalii., Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0003-0999-0402, Tarasyuk T.O., graduate student, ORCID 0009-0003-2261-9840 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

У роботі досліджено вплив швидкості руху сопла та його геометричної форми на якість екструзії й адгезійну міцність між шарами будівельних сумішей придатних для 3D-друку. Проаналізовано особливості формування екструдованого шару при використанні сопел круглого, прямокутного та проміжного (овально-прямокутного) перерізу. Експериментальні дослідження виконано із застосуванням методів математичного планування експерименту з подальшою статистичною обробкою результатів. Отримано регресійні моделі другого порядку, що описують вплив швидкості руху сопла та його геометрії на показник якості екструзії та міцність на розтяг при розколюванні, яку розглянуто як характеристику міжшарової адгезії. Встановлено нелінійний характер впливу досліджуваних факторів і наявність оптимальних областей їх значень. Показано, що підвищення швидкості руху сопла покращує геометричну стабільність екструзії, проте знижує міжшарову міцність. Визначено, що форма сопла суттєво впливає на рівномірність потоку, площу контакту між шарами та ефективність ущільнення матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації параметрів будівельного 3D-друку з метою підвищення якості формування та механічних характеристик надрукованих конструкцій.

This study investigates the influence of nozzle travel speed and nozzle geometry on extrusion quality and interlayer bond strength of cement-based mixtures in extrusion-based 3D concrete printing. The geometry of the nozzle is considered a critical parameter affecting the flow behavior of fresh mixtures, pressure distribution, and the quality of layer deposition.

Three nozzle geometries were examined: circular, rectangular, and an intermediate oval-rectangular shape with rounded edges. The latter was designed to combine the advantages of both conventional geometries by ensuring smoother flow conditions and reducing stress concentration near sharp corners. Experimental investigations were carried out using a laboratory-scale 3D printer developed at the Department of Building Materials and Products Technology.

A two-factor, three-level experimental design based on the method of design of experiments was applied. The main factors included nozzle travel speed and nozzle perimeter (as a coded representation of nozzle geometry). The responses analyzed were extrusion quality (evaluated using a qualitative scoring system) and interlayer bond strength, determined through splitting tensile strength tests.

Second-order regression models were developed to quantify the effects of the studied parameters and their interactions. The analysis revealed that both factors exhibit nonlinear effects, with clearly defined optimal regions. Increasing nozzle speed was found to improve extrusion continuity and geometric stability of the deposited layer, but simultaneously reduce interlayer adhesion due to shorter contact time between successive layers.

The results also indicate that nozzle geometry significantly affects material flow, contact area between layers, and compaction efficiency. In particular, the intermediate nozzle geometry demonstrated improved performance by balancing flow uniformity and interlayer bonding. However, increasing the complexity of the nozzle geometry may negatively affect extrusion quality due to uneven stress distribution within the material flow.

Response surface analysis confirmed that the optimal conditions for extrusion quality do not coincide with those for maximum interlayer strength, highlighting the need for a compromise in process parameter selection.

The findings of this study provide a basis for optimizing process parameters in extrusion-based 3D concrete printing and can be used to improve both the printability and mechanical performance of printed structures.

Ключові слова: 3D-будівельний принтер, екструзія, сопло, якість екструзії, міцність на розтяг при розколюванні, планування експерименту.
3D construction printer, extrusion, nozzle, extrusion quality, splitting tensile strength design of experiments.

Вступ. Геометрія сопла у процесі 3D-друку відіграє ключову роль у формуванні якості надрукованих виробів. Вона визначає не лише характер виходу пластичної будівельної суміші, але й якість і рівномірність екструзії, стабільність тиску та якість взаємодії між шарами. Особливого значення набуває форма вихідного перерізу сопла. В даний час найбільш поширеними є

- кругла або прямокутна [1], оскільки саме вона визначає геометрію екструзійного шару та його взаємодію з поверхнею попереднього шару.

Стан питання та задачі дослідження.

Круглий переріз сопла забезпечує івномірність потоку та стабільність екструзії, симетричний розподіл тиску у зоні виходу, що мінімізує ризик локальних турбулентностей [2]. Така форма створює стабільну циліндричну нитку шару суміш, яка зберігає рівномірний діаметр по всій довжині друку. При круглому соплі екструзійна смуга має напівеліптичний поперечний профіль завдяки цьому підвищується плавність переходів між проходами, зменшується кількість мікропорожнин між сусідніми шарами, забезпечується добра міжшарова дифузія матеріалу. Разом з тим, кругла форма менш ефективна для покриття великих площ за один прохід.

Сопла з прямокутним перерізом формують «сплюснутий» шар з чітко визначеною шириною та товщиною. Вона має переваги у випадках, коли необхідна висока площинність нанесення матеріалу. Прямокутний переріз збільшує ефективність заповнення площі поперечного перерізу конструкції покращуючи фізико-механічні характеристики надрукованої конструкції, знижує ризик появи прямолінійних швів, покращує рівномірність поверхні [3]. Прямокутна смуга забезпечує збільшену площу контакту між сусідніми екструзіями, що може покращувати міцність на зсув між сусідніми шарами, зменшувати виражену в певному напрямку зміну властивостей виробу чи конструкції [4]. Проте через широку зону контакту сопло частіше торкається поверхні й може спричинити ефект «мазання» у складних зонах моделі.

В ході 3D друку важливим параметром є стабільність екструдованого шару суміші після виходу з сопла принтера. Деформація екструдованого шару після його екструзії залежить від властивостей суміші, що використовується [5], а також від поперечного перерізу сопла [1].

Аналіз літературних джерел [1, 6, 7] дало змогу встановити необхідність проведення досліджень по встановленню закономірностей впливу форми сопла залежно від швидкості його руху на якість формування шару будівельної суміші методом екструзії

Таким чином форма сопла — один із визначальних параметрів, що впливають на якість 3D-друку.

Мета роботи полягала у кількісному встановленні особливостей форми сопла на якість екструзії суміші.

Матеріали, які були використані в дослідженнях:

- портландцемент ПЦ II/A-Ш-500 P-H, згідно ДСТУ Б EN 197-1:2015 виробництва ПрАТ ВПЦЕМ, м. Здолбунів;
- дрібний заповнювач кварцовий пісок згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95, Славутського кар'єру (Хмельницької області) з $Mkr = 2,1$;
- суперпластифікатор (СП) полікарбоксилатного типу Melflux 2651F відповідно до ДСТУ Б В.2.7-171:2008, BASF, Німеччина

Методи досліджень.

Основні дослідження були виконані з використання лабораторного 3D принтеру розробленого на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП [6].

Для достовірної реалізації дослідів, технологічного аналізу й оптимізаційних рішень використовували метод математичного планування експериментів (МПЕ) [8]. Результати дослідів оброблялися за допомогою методів математичної статистики.

Отримані результати та їх аналіз.

У даному дослідженні розглянуто такі фактори впливу: швидкість руху сопла (V_c) та форма сопла, яка враховувалася в моделі у вигляді умовно-числового (кодованого) параметра, що відображає зміну геометрії поперечного перерізу сопла.

Досліджувалися три варіанти форми сопла:

- кругле сопло ($d = 35$ мм) з периметром 11,0 см;
- проміжне прямокутне сопло з заокругленнями ($b \times h$, 45 мм x 24 мм) з периметром 11,9 см.
- прямокутне сопло ($b \times h$, 40 мм x 24 мм) з периметром 12,8 см;

Для цього були виконані алгоритмізовані експерименти у відповідності до двохфакторного трьохрівневого плану B_2 [8]. Умови планування якого наведені в табл.1.



Рис. 1. Геометрія перерізів сопла 3D-принтера: а - кругле сопло; б – овально-прямокутне з заокругленими бічними сторонами; в - прямокутне сопло.

У проміжному соплі між круглими і прямокутними бічними сторонами виконані заокруглення, тобто форма перерізу наближена до овально-прямокутної. В даному соплі відсутні різкі кути, таким чином перехід між горизонтальними та вертикальними ділянками здійснюється по дугах великого радіуса. Проміжне сопло мало заокруглені бічні сторони, що формують овально-прямокутний переріз з розмірами $b \times h = 45 \times 24$ мм. Така геометрія забезпечує плавний характер руху будівельної суміші за рахунок відсутності різких кутів і зменшення градієнтів швидкості поблизу стінок сопла. Периметр перерізу становив 11,9 см, що дозволяє розглядати дану форму як перехідну між круглим та прямокутним соплами.

Таблиця 1

Технологічні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Швидкість переміщення сопла, мм/с (V_c)	X_1	50	125	200	75
Периметр сопла (P_c), см	X_2	11,0	11,9	12,8	0,9

Фактори варіювалися в межах технологічно допустимих значень. Фактори варіювалися в межах технологічно допустимих значень відповідно до умов, які дають змогу формувати зразок за допомогою 3D принтера. Для аналізу впливу факторів на показник якості екструзії з використанням методу планування експерименту була побудована адекватна регресійна модель, що дозволяє врахувати лінійні та квадратичні ефекти впливу, а також взаємодію між факторами. Швидкість подачі (продуктивність) в даних дослідженнях, була прийнята 125 об/хв.

У якості досліджуваних параметрів для вивчення впливу форми сопла і швидкості переміщення його було проведено оцінювання якості екструзії будівельної суміші з сопла по умовній шкалі згідно [6] та міцності зчеплення між надрукованими шарами, яку оцінювали за міцністю на розтяг при розколюванні на межі шарів.

У ході досліджень у кожній точці плану для оцінки впливу варійованих факторів готували суміші, що містили поргландцемент, кварцовий пісок та суперпластифікатор Melflux 2651F для покращення екструзійних характеристик у наступному співвідношенні компонентів ПЦ:Пісок – 1:3 (по масі) та 0,2% СП від маси цементу, при В/Ц - 0,45. Слід відмітити, що витрата води була збільшена у порівнянні з попередніми дослідженнями та підбиралася для досягнення розпливу конуса на струшуючому столику 220..225 мм для кращого формування зразків за допомогою круглого сопла.

Після статистичної обробки результатів експериментів, виконаних згідно [8] для кількісної оцінки впливу технологічних параметрів на якість екструзії та міцність на розтяг при розколюванні, яку можна розглядати як характеристику адгезійної міцності між накладеними шарами, будівельної суміші в процесі 3D-друку з сопла будівельного принтера побудовано адекватні регресійні математичні моделі другого порядку, які визначають вплив параметрів принтеру, зокрема швидкості руху сопла (V_c) та форми (периметру стінок) сопла:

Показник якості екструзії (ПЕ)

$$PE = 4,69 - 0,33X_1 - 0,5X_2 - 1,71X_1^2 - 0,21X_2^2 + 0,13X_1X_2 \quad (1)$$

Міцність на розтяг при розколюванні ($f_{c,m}$)

$$f_{c,m} = 2,61 - 0,18X_1 + 0,26X_2 - 0,32X_1^2 - 0,13X_2^2 - 0,05X_1X_2 \quad (2)$$

Аналіз моделі (1) дозволив зробити висновок, що вільний член рівняння (4,69) відповідає середньому значенню показника якості екструзії в центрі плану експерименту, що є вищим від нормативного ПЕ ≥ 4 . Покращення даного показника у порівнянні з дослідженнями проведеними в п.2.3 зумовлене тим, що швидкість подачі суміші (швидкість обертання шнека) було вибрано оптимальним. Негативний коефіцієнт при лінійному члені X_1 ($-0,33$) свідчить про тенденцію до зниження якості екструзії зі зростанням швидкості руху сопла, що може бути пов'язано з недостатнім часом стабілізації потоку суміші та погіршенням формування екструдованого шару. Від'ємний коефіцієнт при факторі X_2 ($-0,50$) вказує на суттєвий вплив геометричної форми сопла на процес екструзії. Зі збільшенням периметра сопла та ускладненням його геометрії спостерігається зниження показника якості екструзії, що зумовлено нерівномірним розподілом напружень у потоці суміші. Наявність квадратичних членів $-1,71X_1^2$ та $-0,21X_2^2$ свідчить про нелінійний характер впливу обох факторів і наявність оптимальних значень швидкості руху сопла та форми сопла, за яких досягається максимальна якість екструзії. Позитивний коефіцієнт взаємодії $0,13X_1X_2$ вказує на взаємозалежний характер впливу швидкості руху сопла та геометрії сопла, що підтверджує необхідність їх узгодженого вибору для забезпечення стабільного режиму екструзії.

Аналізуючи модель адгезійної міцності (2) маємо, що вільний член рівняння (2,61) характеризує середній рівень міцності на розтяг при розколюванні в центрі плану експерименту та може розглядатися як базове значення адгезійної міцності між накладеними шарами. Негативний коефіцієнт при лінійному члені X_1 ($-0,18$) свідчить про зниження міжшарової адгезії зі збільшенням швидкості руху сопла. Це зумовлено скороченням часу контакту між екструдованими шарами та зменшенням можливості їх взаємного зчеплення. Додатний коефіцієнт при факторі X_2 ($+0,26$) вказує на позитивний вплив оптимізованої геометрії сопла на формування адгезійних зв'язків між шарами. Зокрема, використання проміжної прямокутної форми з фасками сприяє кращому ущільненню матеріалу та підвищенню площі контакту між шарами. Наявність від'ємних квадратичних членів $-0,32X_1^2$ та $-0,13X_2^2$ підтверджує нелінійний характер впливу досліджуваних факторів і свідчить про існування оптимальних значень швидкості руху сопла та геометрії сопла, за яких досягається максимальна адгезійна міцність. Негативний коефіцієнт взаємодії $-0,05X_1X_2$ свідчить про те, що одночасне збільшення швидкості руху сопла та ускладнення геометрії сопла не призводить до синергетичного ефекту щодо підвищення міцності на розтяг при розколюванні, що підкреслює необхідність ретельного підбору комбінації параметрів.

Для більш повного та графічного аналізу отриманих експериментально-статистичних моделей були побудовані поверхні відгуку досліджуваних параметрів рис. 2 та рис. 3.

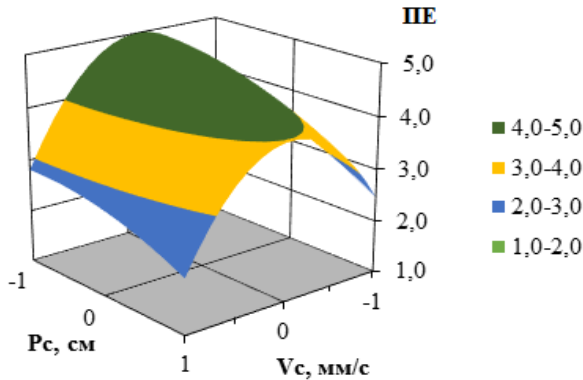


Рис. 2. Поверхня відгуку, що ілюструє вплив параметрів 3D принтеру на якість екструзії

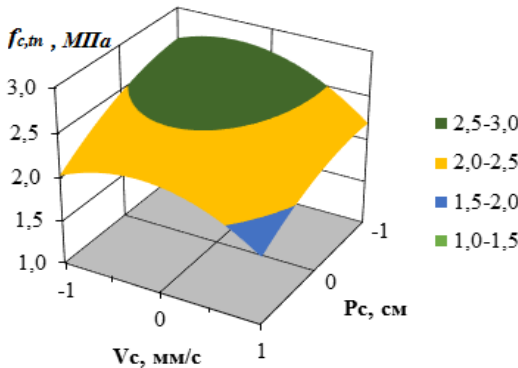


Рис. 3. Поверхня відгуку, що ілюструє вплив параметрів 3D принтеру на адгезійну міцність між шарами

Аналіз поверхні відгуку підтверджує наявність області оптимальних режимів екструзії, в якій показник якості перевищує граничне значення $PE \geq 4$. Максимальні значення показника спостерігаються при середніх значеннях швидкості переміщення сопла та швидкості обертання шнека, що узгоджується з результатами аналітичної оптимізації

Висновки.

Досліджено вплив швидкості руху та геометричної форми сопла на якість екструзії та адгезійну міцність між накладеними шарами будівельної суміші в процесі 3D-друку.

На основі методів планування експерименту отримано регресійні математичні моделі другого порядку для показника якості екструзії та міцності на розтяг при розколюванні.

Встановлено, що оптимальні режими, які забезпечують максимальну якість екструзії, не збігаються з режимами, за яких досягається максимальна адгезійна міцність між шарами. Підвищення швидкості руху сопла сприяє стабільності екструзії та покращенню геометричної точності формування шару, проте водночас призводить до зниження міжшарової адгезії.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних параметрів будівельного 3D-друку з метою підвищення підвищення механічних характеристик будівельних конструкцій та споруд виготовлених за технологією 3D-друку

1. Perrot A., Rangedard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0848-4>.

2. Nan Zhang, Jay Sanjayan, «Extrusion nozzle design and print parameter selections for 3D concrete printing», «Cement and Concrete Composites» (2023)..

3. Sanjayan J., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 2018.

4. Dong An, Mahfuzur Rahman, Y.X. Zhang, Richard (Chunhui) Yang, Effects of Key 3D concrete printing process parameters on layer shape: Experimental study and Smooth Particle Hydrodynamics modelling, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 22, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04718>

5. Hager, I.; Golonka, A.; Putanowicz, A. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Proc. Eng.* 2016, Vol. 151, pp. 292–299.

6. Марчук В.В., Дворкін Л.Й., Макаренко Р.М. Вплив параметрів та критерій визначення якості екструзії при 3D-друці. *Вісник НУВГП. Технічні науки. Том 1 № 113* (2026)

7. Savytskyi M.V., Shatov S.V., Ozhyshchenko O.A., «3D-друк будівельних об'єктів», «Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури». 2020. Вип. 2, С. 59–68. 8. Dvorkin, L.; Dvorkin, O.; Ribakov, Y. *Mathematical experiments planning in concrete technology*. Nova Science Publishers: New York, USA, 2011, 173 p.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	28.03.2026	Received	28.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	01.04.2026	Received in revised form	01.04.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

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

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.