

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ НАСАДКИ НА ФОРМУВАННЯ ШАРУ БУДІВЕЛЬНОЇ СУМІШІ ПРИ 3D-ДРУЦІ

Денис Сідан аспірант¹ (ORCID: 0009-0006-7945-5615),

Тетяна Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-2387-8575),

Микола Нестеренко, доцент, к.т.н., доцент¹ (ORCID: 0000-0002-4073-1233),

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка 24, 36011, Україна

АНОТАЦІЯ. У роботі розглянуто вплив параметрів екструзійної насадки на формування шару будівельної суміші при 3D-друці. Показано, що якість пошарового укладання матеріалу визначається не лише реологічними властивостями суміші та режимами її подачі, а й геометричними характеристиками формувальної насадки: площею вихідного отвору, його формою, еквівалентним діаметром, довжиною формувального каналу та умовами перебудови потоку перед виходом із сопла. Обґрунтовано, що раціонально підібрані параметри насадки забезпечують стабільну витрату суміші, зменшення гідравлічного опору, рівномірне витікання матеріалу та формування шару із заданою шириною і висотою. Встановлено, що узгодження швидкості переміщення друкувальної головки з фактичною витратою суміші є необхідною умовою безперервності процесу 3D-друку та збереження геометричної точності надрукованого елемента.

Ключові слова: будівельний 3D-друк; екструзійна насадка; будівельна суміш; формування шару; екструзія; сопло; витрата суміші; реологічні властивості; друкувальна головка; адитивне будівництво.

Вступ. Для встановлення впливу основних конструктивних і режимних параметрів малогабаритного обладнання для вібраційної очистки деталей на характер руху робочого контейнера доцільно застосувати математичне моделювання механічної системи. Реальна система, що включає контейнер із деталями та робочим наповнювачем, пружні опори, віброзбуджувач і привід, має складний характер взаємодії елементів, тому її повний чисельний аналіз є досить громіздким. З метою спрощення розрахунків розглянуто узагальнену механічну модель вібраційної установки, яка дозволяє описати основні закономірності коливального руху контейнера та оцінити вплив амплітуди, частоти, маси робочого середовища і параметрів віброзбудження на інтенсивність процесу очистки. Початковим етапом побудови такої моделі є визначення кінетичної енергії системи з подальшим складанням рівнянь руху на основі положень аналітичної механіки.

Аналіз літературних джерел. Аналіз сучасних досліджень показує, що якість формування шару при будівельному 3D-друці значною мірою залежить від узгодження реологічних властивостей суміші, параметрів подачі матеріалу та геометрії екструзійної насадки. У роботі [1] розглянуто процес осадження бетонної суміші екструдером будівельного 3D-принтера та показано, що стабільність формування шару визначається режимами подачі суміші й умовами її виходу з формувальної головки. Це джерело є базовим для аналізу завершального етапу технологічного процесу – укладання матеріалу на поверхню друку.

У праці [2] систематизовано вплив параметрів насадки на екструдованість, здатність до нарощування шарів і міжшарове зчеплення 3D-друкованого бетону. Авторами встановлено, що найбільш важливими параметрами є швидкість переміщення насадки, її розмір, форма вихідного отвору та відстань до попереднього шару. Ці положення безпосередньо пов'язані з обґрунтуванням геометричних характеристик насадки для забезпечення рівномірного формування шару.

У роботі [3] розроблено чисельний підхід до моделювання процесів екструзії та пошарового осадження матеріалу при 3D-друці бетоном. Показано, що форма шару залежить від витрати матеріалу, швидкості руху друкувальної головки, поведінки суміші в свіжому стані та умов контакту між шарами. Запропонований підхід дозволяє оцінювати вплив параметрів екструзії на геометрію надрукованого елемента.

Окрему увагу питанню екструдованості приділено у дослідженні [4], де процес витікання 3D-друкованого бетону розглянуто як двофазний дискретний потік. Авторами показано, що невідповідність між розміром вихідного отвору насадки та крупністю заповнювача може

призводити до закупорювання сопла, нестабільної подачі й погіршення форми екструдованого шару. Це підтверджує необхідність раціонального вибору діаметра насадки з урахуванням гранулометричного складу суміші.

Аналіз літератури свідчить, що екструзійна насадка є одним із ключових елементів технологічної системи будівельного 3D-друку. Її форма, розміри, довжина формувального каналу та положення відносно поверхні друку визначають стабільність матеріального потоку, геометрію шару, якість міжшарового контакту та безперервність процесу пошарового формування.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження впливу геометричних і технологічних параметрів екструзійної насадки на процес формування шару будівельної суміші при 3D-друці. Передбачається проаналізувати вплив форми та площі вихідного отвору, еквівалентного діаметра, довжини формувального каналу, витрати суміші та швидкості переміщення друкувальної головки на стабільність матеріального потоку, рівномірність укладання шару та точність його геометричних параметрів. Особливу увагу приділено обґрунтуванню умов узгодження подачі суміші з параметрами пошарового формування для забезпечення безперервності процесу друку, зменшення дефектів шару та підвищення якості надрукованих будівельних елементів.

Виклад основного матеріалу. Екструзійне формування шару будівельної суміші є завершальним етапом технологічного процесу 3D-друку, під час якого матеріал після змішування та подачі насосною системою надходить до друкувальної головки й витікає через формувальну насадку.

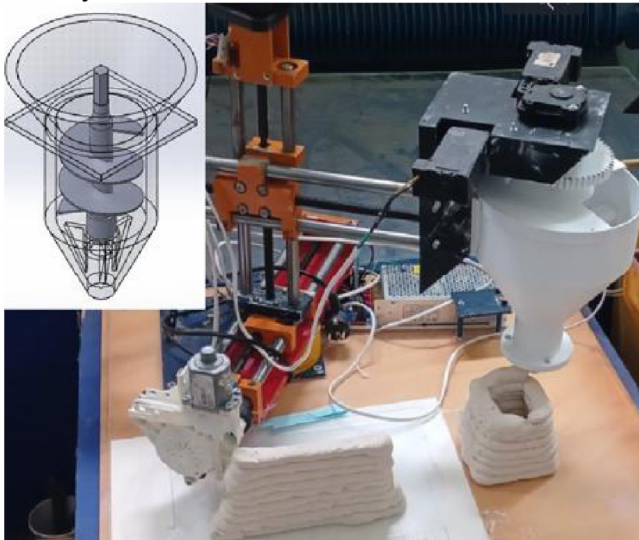


Рис. 1. Лабораторний 3D-принтер з екструзійною головкою для формування шару будівельної суміші

Саме на цьому етапі остаточно задаються геометричні параметри шару, його ширина, висота, суцільність і здатність зберігати форму після укладання. Тому екструзійна насадка є одним із ключових елементів лабораторного 3D-принтера, що безпосередньо впливає на якість пошарового формування будівельної суміші.

Загальний вигляд лабораторного 3D-принтера та екструзійного вузла для подачі будівельної суміші наведено на рис. 1. Установка включає систему переміщення друкувальної головки, бункер для суміші, вузол подачі матеріалу, екструзійну насадку та робочу зону, у якій виконується пошарове формування зразків.

Наявність змінної насадки дозволяє досліджувати вплив її геометричних параметрів на стабільність витікання матеріалу, форму екструдованого шару та рівномірність укладання суміші.

Параметри екструзійної насадки визначають умови переходу суміші від шнекової або трубопровідної подачі до формування шару на поверхні друку. Основними з них є форма та площа вихідного отвору, еквівалентний діаметр, довжина формувального каналу і конфігурація внутрішньої порожнини. Вони впливають на гідравлічний опір, швидкість витікання, рівномірність потоку та здатність суміші зберігати задану форму після виходу з сопла.

Площа вихідного отвору повинна відповідати гранулометричному складу суміші, її рухливості та продуктивності системи подачі. Недостатня площа може спричинити пульсації потоку або закупорювання каналу, а надмірно велика – розпливання шару та втрату геометричної точності. Форма отвору також є важливою: круглі насадки забезпечують рівномірне витікання, тоді як прямокутні або щілинні дозволяють формувати шар із більш прогнозованими розмірами.

Довжина формувального каналу впливає на стабілізацію потоку перед виходом із насадки. Короткий канал зменшує опір руху суміші, але може не забезпечити достатнього вирівнювання потоку, тоді як довший канал покращує однорідність витікання, проте збільшує втрати тиску.

Якість друку залежить від узгодження параметрів насадки зі швидкістю переміщення друкувальної головки та витратою суміші. Надлишкова подача призводить до накопичення матеріалу й деформації шару, а недостатня – до розривів і порожнин. Тому стабільне формування шару можливе лише за раціонального поєднання геометрії насадки, реологічних властивостей суміші та режимів подачі.

Екструзійна насадка виконує не лише функцію випускного елемента, а й формує умови переходу будівельної суміші у стійкий шар. Раціональний вибір її геометричних параметрів дозволяє зменшити гідравлічний опір, забезпечити стабільну витрату матеріалу, підвищити точність формування шару та покращити якість пошарового укладання при будівельному 3D-друці. Це підтверджує доцільність подальших експериментальних досліджень роботи змінних екструзійних насадок на лабораторному 3D-принтері.

Висновки. Встановлено, що параметри екструзійної насадки суттєво впливають на характер виходу будівельної суміші, форму шару, рівномірність укладання та стабільність матеріального потоку при 3D-друці. Основними чинниками є форма і площа вихідного отвору, еквівалентний діаметр, довжина формувального каналу та узгодження цих параметрів із витратою суміші й швидкістю переміщення друкувальної головки. Раціональний вибір геометрії насадки дозволяє зменшити дефекти шару, підвищити точність пошарового формування та покращити якість 3D-друку.

Список використаних джерел

1. Orysenko, O., Nesterenko, M., & Shokalo, A. (2022). The analytical investigation of the concrete mixture deposition process by the concrete 3D printer extruder. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(59), 5–10. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3093>
2. Yang, L., Sepasgozar, S. M. E., Shirowzhan, S., Kashani, A., & Edwards, D. (2023). Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete. *Automation in Construction*, 146, Article 104671. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104671>
3. Rizzieri, G., Ferrara, L., & Cremonesi, M. (2024). Numerical simulation of the extrusion and layer deposition processes in 3D concrete printing with the Particle Finite Element Method. *Computational Mechanics*, 73, 277–295. <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02367-y>
4. Sun, Y., Zhang, X., Zhou, J., Wang, Y., Zhang, B., Zhang, Y., Cui, W., & Tao, Y. (2024). Extrudability analysis of 3D printable concrete as a two-phase discrete flow. *Journal of Building Engineering*, Article 111252. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111252>