

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

Аддитивні технології дедалі ширше застосовуються у машинобудуванні, приладобудуванні, архітектурному макетуванні, прототипуванні, виробництві оснащення, функціональних деталей і допоміжних елементів технологічного обладнання. Особливий інтерес становить виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку, оскільки це дає змогу скоротити витрати матеріалу, зменшити кількість технологічних операцій та виготовляти вироби складної форми без застосування традиційного формоутворювального інструменту. У останніх роботах [1, 2] великоформатне аддитивне виробництво розглядається як перспективний напрям виготовлення складних і великих геометричних об'єктів із потенційним зменшенням матеріальних та енергетичних витрат.

Водночас збільшення габаритів друкованої деталі істотно ускладнює забезпечення її якості [3]. Для технологій FDM/FFF характерним є поширене нанесення розплавленого полімерного матеріалу, який після виходу з сопла охолоджується, твердне і зазнає усадки. Чим більші розміри деталі, тим складніше забезпечити рівномірність температурного поля по всій площі виробу. Унаслідок цього виникають внутрішні напруження, деформації, викривлення кутів, відрив країв від платформи, порушення розмірної точності та погіршення зовнішнього вигляду виробу. Проблеми короблення, усадки, міжшарової міцності та розмірної точності є типовим обмеженням FDM-друку, особливо для великих деталей і матеріалів на основі ABS, PC, PETG, поліамідів та інших термопластів із помітною термічною усадкою.

Згідно робіт [4, 5], особливо гостро ця проблема проявляється під час друку довгих, широких або плоских деталей, коли площа контакту першого шару з робочою платформою є значною, а краї виробу охолоджуються швидше, ніж центральна частина. У результаті між шарами виникають різні температурні деформації, що призводить до накопичення залишкових напружень. Вивчення термічних і напружено-деформованих процесів у FDM-друці підтверджують, що температурне поле та термічні напруження безпосередньо впливають на формування короблення деталі.

Тому актуальною задачею є розроблення простих, технічно доступних і економічно доцільних способів підвищення якості 3D-друку габаритних деталей. Одним із таких способів може бути локальний або зональний підігрів основи гарячим повітрям, який дає змогу підтримувати нижні шари деталі в більш стабільному температурному режимі та зменшувати різницю температур між платформою, надрукованим матеріалом і навколишнім середовищем.

Під якість виготовлення габаритної деталі [5] у цьому випадку розуміють сукупність таких показників: відповідність заданим геометричним розмірам, мінімальне короблення, надійне зчеплення першого шару з платформою, відсутність відшарування між шарами (деламінації), стабільність форми після охолодження, прийнятна шорсткість поверхні та повторюваність результатів друку.

Покращення якості виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку потребує комплексного підходу, оскільки дефекти формуються під впливом декількох взаємопов'язаних чинників: температури сопла, температури платформи, швидкості друку, висоти шару, типу матеріалу, заповнення, орієнтації деталі на платформі, наявності охолодження та умов навколишнього середовища.

Одним із найважливіших етапів є правильне формування першого шару. Саме перший шар забезпечує зв'язок між деталлю і робочою поверхнею, тому від його якості залежить стабільність усього подальшого процесу друку. Якщо перший шар недостатньо прогрітий або має слабе зчеплення з платформою, краї деталі можуть поступово підніматися, що призводить до короблення. Для невеликих деталей таке явище може бути незначним, однак для габаритних виробів навіть невелике підняття країв здатне спричинити значну похибку форми.

Традиційним способом зменшення короблення є використання підігрівної платформи. Проте під час друку великих деталей звичайного підігріву знизу може бути недостатньо. Це пояснюється тим, що тепло розподіляється нерівномірно, особливо на краях платформи, а верхні та бічні ділянки деталі інтенсивно охолоджуються повітрям. Тому доцільним є застосування додаткового підігріву гарячим повітрям, спрямованим у зону основи деталі.

Технологічна система підігріву гарячим повітрям (рис. 1) може складатися з нагрівального елемента, вентилятора, повітряного каналу, сопла або розподільного колектору, датчиків температури та блока керування. Гаряче повітря доцільно подавати не безпосередньо на сопло екструдера, а в зону нижніх шарів деталі або на ділянку контакту деталі з платформою. Це дає змогу підтримувати стабільніші умови формування основи виробу без надмірного перегріву свіжонанесеного матеріалу.

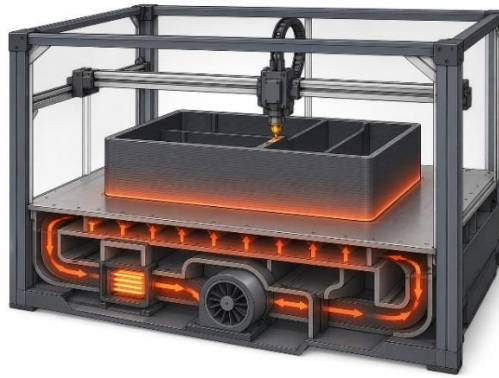


Рис. 1. Система підігріву гарячим повітрям зони основи деталі.

Особливо ефективним може бути зональний підігрів країв платформи, оскільки саме крайові ділянки найчастіше охолоджуються швидше й стають джерелом деформацій. Для довгих деталей доцільно застосовувати направлені потоки гарячого повітря вздовж периметра виробу. Для широких плоских деталей можна використовувати рівномірний розподіл потоку під платформою або вздовж нижньої частини камери друку.

Важливим є правильний вибір температурного режиму. Температура гарячого повітря має бути достатньою для зменшення температурного градієнта, але не повинна спричинити перегрів, розм'якшення або втрату форми нижніх шарів. Для PLA температура підігріву повинна бути нижчою, оскільки цей матеріал має відносно низьку температуру розм'якшення. Для ABS, PETG, PC або поліамідних матеріалів допустимий вищий температурний рівень, оскільки ці матеріали сильніше схильні до усадки та короблення. Слід враховувати, що надмірне або неконтрольоване нагрівання може мати й негативні наслідки: погіршення точності через локальне розм'якшення матеріалу, нерівномірну зміну розмірів, погіршення якості поверхні або виникнення внутрішніх дефектів. Тому система підігріву повинна працювати в керованому режимі з використанням температурного зворотного зв'язку. Доцільним є встановлення термодатчиків у кількох зонах платформи: у центрі, на краях і поблизу найбільш проблемних ділянок деталі. Застосування локального або загального підігріву нижньої частини деталі гарячим повітрям доцільно розглядати не як єдиний, а як один із елементів комплексної системи керування якістю. Найбільший ефект очікується тоді, коли такий підігрів поєднується з підігрівною платформою, закритою камерою, правильними параметрами друку та контролем температури в реальному часі.

Висновки. Під час виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку однією з основних проблем є нерівномірне охолодження полімерного матеріалу, що призводить до короблення, усадки, відшарування від основи та зниження геометричної точності. Застосування підігріву основи гарячим повітрям є технічно доцільним методом покращення якості друку, оскільки дає змогу стабілізувати температурне поле в нижній частині виробу та зменшити внутрішні термічні напруження. Найкращі результати можуть бути отримані за умови поєднання цього методу з підігрівною платформою, закритою камерою друку, оптимальними параметрами екструзії та контролем температури. Запропонований підхід може бути використаний для підвищення надійності, точності та повторюваності виготовлення великогабаритних полімерних деталей методом FDM/FFF-друку.

Список використаної літератури:

1. Goh G. D., Wong K. K., Tan N., Seet H. L., Nai M. L. S. Large-format additive manufacturing of polymers: a review of fabrication processes, materials, and design. *Virtual and Physical Prototyping*. 2024. Vol. 19, № 1. Article e2336160. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2336160>.
2. Vanerio D., Guagliano M., Bagherifard S. Emerging trends in large format additive manufacturing processes and hybrid techniques. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025. Vol. 10. P. 1945-1972. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00771-1>.
3. Mittal Y. G., Patil Y., Kamble P. P., Gote G. D., Mehta A. K., Karunakaran K. Warpage control in thermoplastic ABS parts produced through material extrusion (MEX)-based fused deposition modeling (FDM). *Rapid Prototyping Journal*. 2024. Vol. 30, № 9. P. 1822-1835. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2024-0023>.
4. Chen G., Wang D., Hua W., Wu W., Zhou W., Jin Y., Zheng W. Simulating and Predicting the Part Warping in Fused Deposition Modeling by Thermal-Structural Coupling Analysis. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 10, № 1. P. 70-82. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0119>.
5. Equbal A., Murmu R., Kumar V., Equbal M. A. A recent review on advancements in dimensional accuracy in fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *AIMS Materials Science*. 2024. Vol. 11, No. 5. P. 950-990. DOI: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2024046>.