

П. М. Єршомін, канд. техн. наук, **А. М. Кириченко**, проф., д-р техн. наук, **А. І. Гречка**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Свяцький**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: p24124@gmail.com

Підвищення точності розмірів деталей з технічних пластиків, виготовлених на 3D-принтерах методом наплавлення

Досліджено сучасний стан використання адитивних FDM-технологій 3D-друку під час виготовлення охоплюємих та охоплюючих деталей із технічних пластиків. Обґрунтовано можливість підвищення геометричної точності виготовлення пластикових виробів шляхом застосування вдосконаленого процесу 3D-друку. Запропоновано покращену методику оцінювання якості виготовлених виробів, зокрема відповідності їх фактично отриманих геометричних параметрів заданим у спеціально розробленій 3D-моделі. Також розроблено рекомендації щодо вибору режимів 3D-друку та адаптованих технологічних підходів до виготовлення деталей із різних марок технічних пластиків.

FDM-технології, точність розмірів, технічний пластик, 3D-друк

Постановка проблеми. В конструкціях сучасних машин та механізмів невпинно зростає доля неметалевих деталей. Це дозволяє економити дефіцитні та коштовні метали, знизити вагу деталей, підвищити стійкість виробів до впливу оточуючого середовища та полегшити їх утилізацію після закінчення строку експлуатації. За останнє десятиріччя отримали дуже широке використання сучасні адитивні FDM-технології (від англійського Fused Deposition Modeling – моделювання методом осадження розплавленої нитки). Це стало можливим завдяки відкриттю ряду патентів за цією тематикою, а також можливості швидкого та ефективного створення в умовах одиничного або дрібносерійного виробництва різноманітних прототипів моделей, макетів та готових деталей. Друк виконується технічними пластиками, вартість яких значно менша, а механічні властивості в багатьох випадках майже не поступаються деталям із чорних або кольорових металів та сплавів.

За рахунок використання FDM-технології (рис. 1) можливо досягти суттєвої економії витратних матеріалів. 3D-принтер під керуванням спеціалізованого програмного забезпечення пошарово накладає (друкує) розігрітий пластик саме там, де це необхідно, тим самим формуючи об'єм створюваної деталі.

Найчастіше в якості витратних матеріалів для 3D-друку використовують пластики PLA, ABS, нейлон, полікарбонат PC, ПВС (PVA), полістирол (HIPS), а також новітні CoPET, PET та PETG. Ще одним важливим фактором є те, що в даний час Україна має значну потребу у власному виробництві пластикових деталей для військових та цивільних підприємств. Такі вироби можуть бути швидко запроєктовані та виготовлені на 3D-принтерах. Все це дає змогу вважати метод пошарового наплавлення сучасною та прогресивною технологією, яка має великий потенціал до розвитку та вдосконалення.

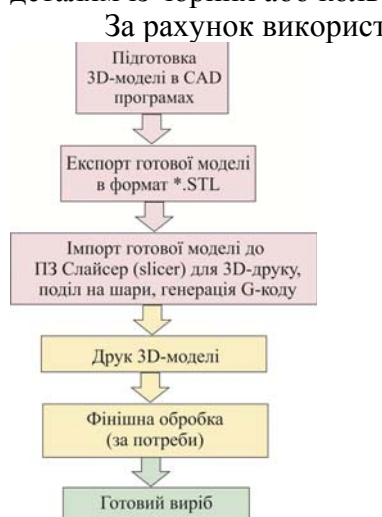


Рисунок 1 – Порядок створення готової деталі

Джерело: розроблено авторами

Однак, існуючий практичний досвід 3D-друку виявив ряд труднощів, які дотепер обмежують промислове використання FDM-технологій. Одним з них є питання забезпечення необхідної точності геометричних розмірів та форми готових виробів із технічних пластиків після завершення 3D-друку. Готову деталь необхідно встановити на призначене їй місце після мінімальної доробки, а краще взагалі без неї. В цьому випадку геометричні розміри та форма деталі повинні мінімально відрізнятися від розмірів 3D моделі або технічних креслень. Також необхідно забезпечити достатню жорсткість, міцність та шорсткість надрукованих деталей. Саме тому задача підвищення точності розмірів деталей з технічних пластиків, виготовлених на 3D-принтерах методом наплавлення є актуальною і потребує всебічного вивчення і подальшого розв'язання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі якості та точності друку деталей, виготовлених за FDM-технологією присвячено досить багато публікацій. Так, наприклад автори статті [1] піднімають питання оптимізації шорсткості поверхні, розмірної точності та часу друку деталей з пластику PETG, виготовлених методом FDM, з використанням статистичних методів та штучної нейронної мережі. У своїх висновках вони зазначають, що товщина наплавленого шару є критичним параметром, який найбільше впливає як на шорсткість поверхні, так і на час друку. Збільшення товщини шару та швидкості друку суттєво скорочує час виробництва, але негативно позначається на якості поверхні. Застосування для аналізу та оптимізації штучних нейронних мереж (ANN) продемонструвало значно вищу точність прогнозування порівняно зі статистичними методами. Розроблені моделі надають виробникам інструмент для інтелектуального налаштування FDM-процесів, дозволяючи отримувати високоякісні деталі з PETG при мінімальних витратах часу в промислових умовах.

В статті [2] проведений огляд сучасних досягнень у забезпеченні розмірної точності 3D-друку методом пошарового наплавлення (FDM). Цей комплексний огляд охоплює дослідження, опубліковані переважно в період з 2021 по 2024 роки та присвячений критично важливому аспекту технології FDM, а саме – розмірній точності виготовлених деталей для медицині, аерокосмічній та автомобільній промисловості. Основна увага в роботі приділена визначенню факторів, що впливають на точність (кут растра, повітряний зазор, ширина растра, орієнтація виробу та адгезія шарів пластику). У роботі зазначені основні причини розмірної похибки. Так, наприклад, основним чинником неточності деталей, виготовлених методом FDM, вказана усадка матеріалу під час його охолодження. Також на точність розмірів суттєво впливають неправильна синхронізація швидкості друку та екструзії. Окрім того, встановлено, що друк при підвищених температурах часто призводить до погіршення якості поверхні та найгірших показників розмірних допусків. В своїх дослідженнях автори наголошують, що деталі з пластику PLA зазвичай мають вищу точність, ніж деталі з ABS. Має значення навіть колір застосовуваного філаменту та умови навколишнього середовища. Наприклад, кондиціонування повітря в приміщенні може мати вплив на кінцеві розміри надрукованих деталей. Як й в публікації [1] рекомендується застосовувати інноваційні методи корекції з використанням ANN та алгоритмами машинного навчання для прогнозування та компенсації розмірних помилок ще на етапі підготовки до друку.

В матеріалах статті [3] досліджується розмірна точність та шорсткість поверхні елементів деталей, виготовлених на двох популярних 3D-принтерах моделі Mendel Max та Kossel Mini з відкритим вихідним кодом. Для перевірки можливостей цих принтерів, що використовують FDM-технологію, авторами було розроблено спеціальну тестову модель (benchmark), що включає критичні геометричні елементи: напівсфери, куб, циліндри та пази. Дослідники варіювали такі параметри, як матеріали PLA та ABS, товщину шару наплавлення в діапазоні від 0,178 до 0,254 мм, а також щільність

заповнення об'єму деталі 20% та 30%. Вимірювання розмірної точності проводилося за допомогою профільного проектора DS600, а шорсткості поверхні – тестером TR200.

Порівняння принтерів продемонструвало менші відхилення розмірів та кращу шорсткість поверхні надрукованих деталей у моделі Mendel Max у порівнянні з принтером Kossel Mini, попри їхню схожу цінову категорію. Також було відмічено, що використання філаменту PLA забезпечує кращу якість поверхні та вищу розмірну точність для обох машин, ніж використання ABS. Автори пояснюють це тим, що пластик ABS більше піддається температурному впливу та схильний до деформації під час друку. Найкращі результати якості та точності для обох пристроїв були зафіксовані при товщині шару 0,178 мм та щільності заповнення 20...30%. Відмічено, що параметри процесу найбільше впливають на точність плоских елементів (пазів) та шорсткість, тоді як для вертикальних елементів (циліндрів та кубів) чіткої закономірності відхилень від параметрів заповнення не виявлено. Дослідження підтверджують, що недорогі 3D-принтери з відкритим кодом здатні створювати складні геометричні елементи, але вимагають ретельного підбору параметрів для досягнення результатів, порівнянних з промисловим обладнанням.

В статті [4] досліджувався вплив орієнтації моделі (build orientation) на якість деталей, виготовлених методом FDM з промислового термопластику-полікарбонату (PC) на принтері FORTUS 360mc. Автори проаналізували п'ять різних варіантів просторового розташування моделей під час друку. Дослідження охоплювало як прості геометричні форми (площини та циліндри), так і складні поверхні довільної форми (free-form surfaces). Оцінка проводилася за двома основними критеріями – точність розмірів та форми. Вимірювання проводилися за допомогою координатно-виміральної машини (КВМ) та 3D-сканера. Шорсткість поверхні (Ra, Rz) вимірювалася як контактним так і оптичним методами. Автори зробили висновки щодо критичності орієнтації деталі на робочій платформі, яка має вирішальне значення для кінцевої якості. Навіть при ідентичних параметрах екструзії, зміна кута нахилу моделі суттєво змінює як шорсткість, так і геометричну точність.

Найкраща якість поверхні (тобто її мінімальна шорсткість) досягається на площинах, орієнтованих паралельно або перпендикулярно до напрямку нанесення шарів. Похилі та криволінійні поверхні демонструють вищу шорсткість через прояв ефекту «сходинок» (staircase effect). Для складних поверхонь вільних форм відхилення розмірів були значно більшими, ніж для простих геометричних примітивів. Найменші похибки форми зафіксовані при орієнтаціях, де вектори нормалі до поверхні були близькі до осі Z. Зазначено, що застосування полікарбонату вимагає суворого дотримання температурних режимів. Дослідження підтвердило, що промислове обладнання Fortus 360mc забезпечує високу повторюваність, проте помилка в орієнтації може нівелювати переваги матеріалу. Також автори довели, що для адитивного виробництва комбінація контактних методів вимірювання шорсткості з оптичним 3D-скануванням дає найбільш повну картину якості виробу.

Постановка завдання. На основі аналізу сучасного стану існуючих FDM-технологій друку:

- розробити вдосконалену методику дослідження якості надрукованих деталей, в плані відповідності реально отриманих геометричних розмірів заданим у 3D-моделі;
- встановити залежність лінійної усадки або розбивки у технічних пластиків типу ABS, PET-G, PCTG, та CoPET для прогнозування розмірної точності;
- на основі отриманих залежностей запропонувати заходи по розробці вдосконаленого алгоритму 3D-друку з використанням FDM-технології;
- розробити рекомендації по режимам друку та методам виготовлення деталей із пластика.

Виклад основного матеріалу. Запропонована методика дослідження якості надрукованих деталей в плані відповідності реально отриманих геометричних розмірів заданим у 3D-моделі полягає в наступному:

В якості еталонних зразків для друку та наступного вимірювання геометричних розмірів було обрано дві 3D-моделі (рис. 2 та 3), перша з яких складається із найбільш розповсюджених у машинобудуванні охоплюваних поверхонь (вали квадратного, круглого, шестигранного перерізу, а також прямокутного профілю), а друга – із пластини з отворами (охоплюючи поверхні) ідентичної форми та розмірів. В якості матеріалів для друку еталонних зразків було обрано технічні пластики типу PLA, ABS, PET-G, PC/CTG, CoPET та нейлон як такі, що мають найбільше розповсюдження.

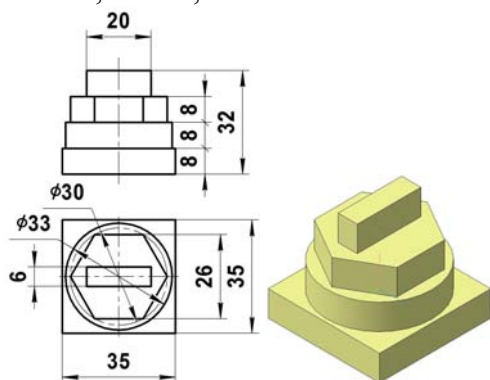


Рисунок 2 – Зразок з охоплюваними валами характерної форми

Джерело: розроблено авторами

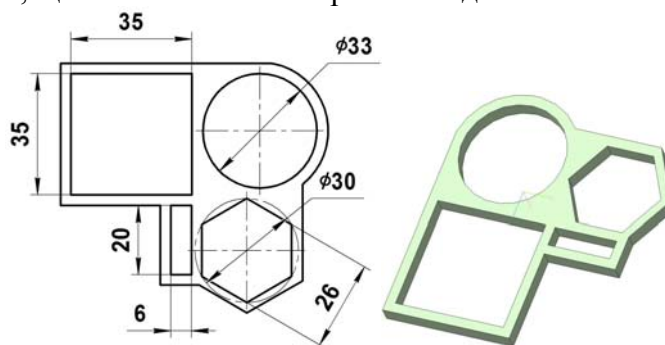


Рисунок 3 – Зразок з охоплюючими отворами характерної форми

Джерело: розроблено авторами

3D-моделі досліджуваних зразків деталі були спроектовані у форматі STL за допомогою програмного комплексу SolidWorks та надруковані у лабораторії 3D-друку кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки ЦНТУ, що обладнана 3D принтером власного виробництва DELTA-FDM (рис. 4). DELTA-FDM – це принтер середнього рівня, виконаний за схемою «дельта-робот» [5]. Він оснащений системою калібрування, відкритим робочим столом з підігрівом та системою охолодження екструдера. DELTA-FDM друкує моделі розмірами до 150 мм у діаметрі та до 125 мм висоти. Мінімальна товщина друкованого шару складає від 0,3 мм. Завдяки системі обдуву моделі під час друку та наявності механізму регулювання підтиску нитки філаменту, принтер може використовувати філамент ABS, PLA, CoPET, Nylon та PETG діаметром 1,75 мм. Друкуюча голівка підвішена на 6-ти діагоналях, шарнірно з'єднаних із трьома каретками, що роблять вертикальні переміщення вздовж напрямних з приводами від крокових двигунів. При цьому друкуюча голівка робить складний плоскопаралельний рух у просторі. Основна перевага цієї схеми полягає в тому, що під час друку модель нерухомо закріплена на столі, і друкуюча голівка піднімається уздовж вертикальної осі моделі, друкуючи пластиком шар за шаром. Також, завдяки зменшеній вазі голівки, швидкість друку вища, ніж у 3D-принтерів, виконаних за іншими схемами.

Далі 3D-моделі були експортовані в формат *.STL та перенесені в слайсер Repetier Host (рис. 5). Враховуючи геометричні особливості розроблених еталонних зразків, з метою забезпечення потрібної якості друку були встановлені такі основні параметри друку моделі в програмі Repetier-Host v.2.1.6: висота наплавленого шару – 0,3 мм; щільність заповнення зразка - 30%; швидкість друку - 50 мм/сек.; температура розігріву використаного філаменту від 210 до 235°C (в залежності від типу застосовуваного матеріалу); температура підігріву стола (за потреби) - 55°C. По закінченню друку зразків (рис. 6), вони ретельно оглядалися з усіх боків на предмет наявності зовнішніх дефектів.

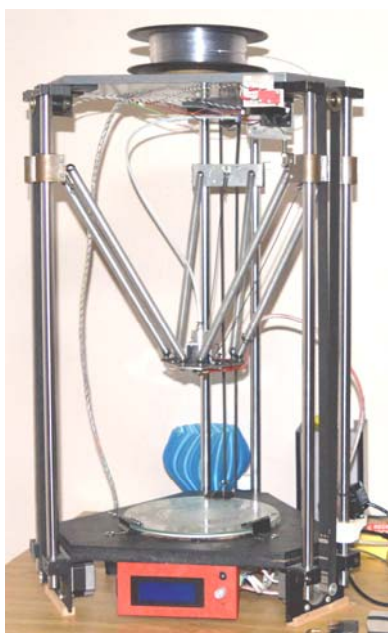


Рисунок 4 – 3D-принтер DELTA-FDM

Джерело: розроблено авторами

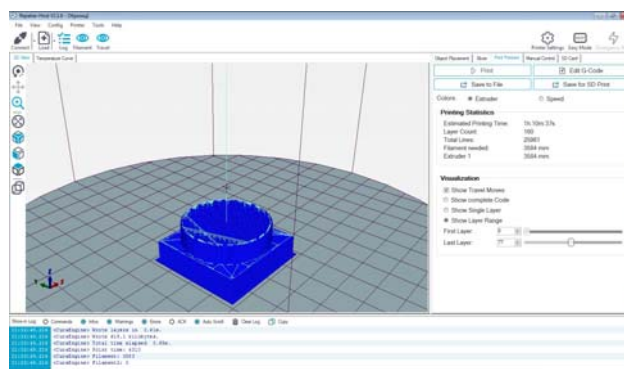


Рисунок 5 – Інтерфейс програми Repetier-Host v.2.1.6

Джерело: розроблено авторами

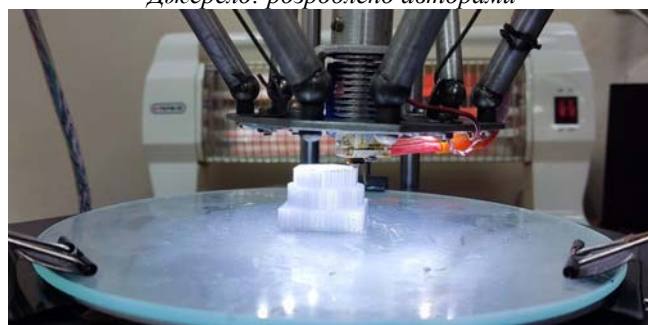


Рисунок 6 – Друк дослідних зразків на 3D-принтері DELTA-FDM

Джерело: розроблено авторами

За необхідності готові зразки (рис. 7) очищувались від пластикового облою та мілких дефектів друку, які можуть впливати на результати вимірювань. Характерні поверхні зразків вимірювались за допомогою повіреного цифрового штангенциркуля з ціною поділки 0,01 мм (рис. 8).



Рисунок 7 – Надруковані дослідні зразки з пластиків PLA, ABS, PET-G, PC/G та CoPET
Джерело: розроблено авторами



Рисунок 8 – Вимірювання розмірів характерних поверхонь дослідних зразків
Джерело: розроблено авторами

Результати вимірювань розмірів на отриманих зразках заносились у порівняльну таблицю, на основі якої були створені графіки у форматі EXCEL (рис. 9).

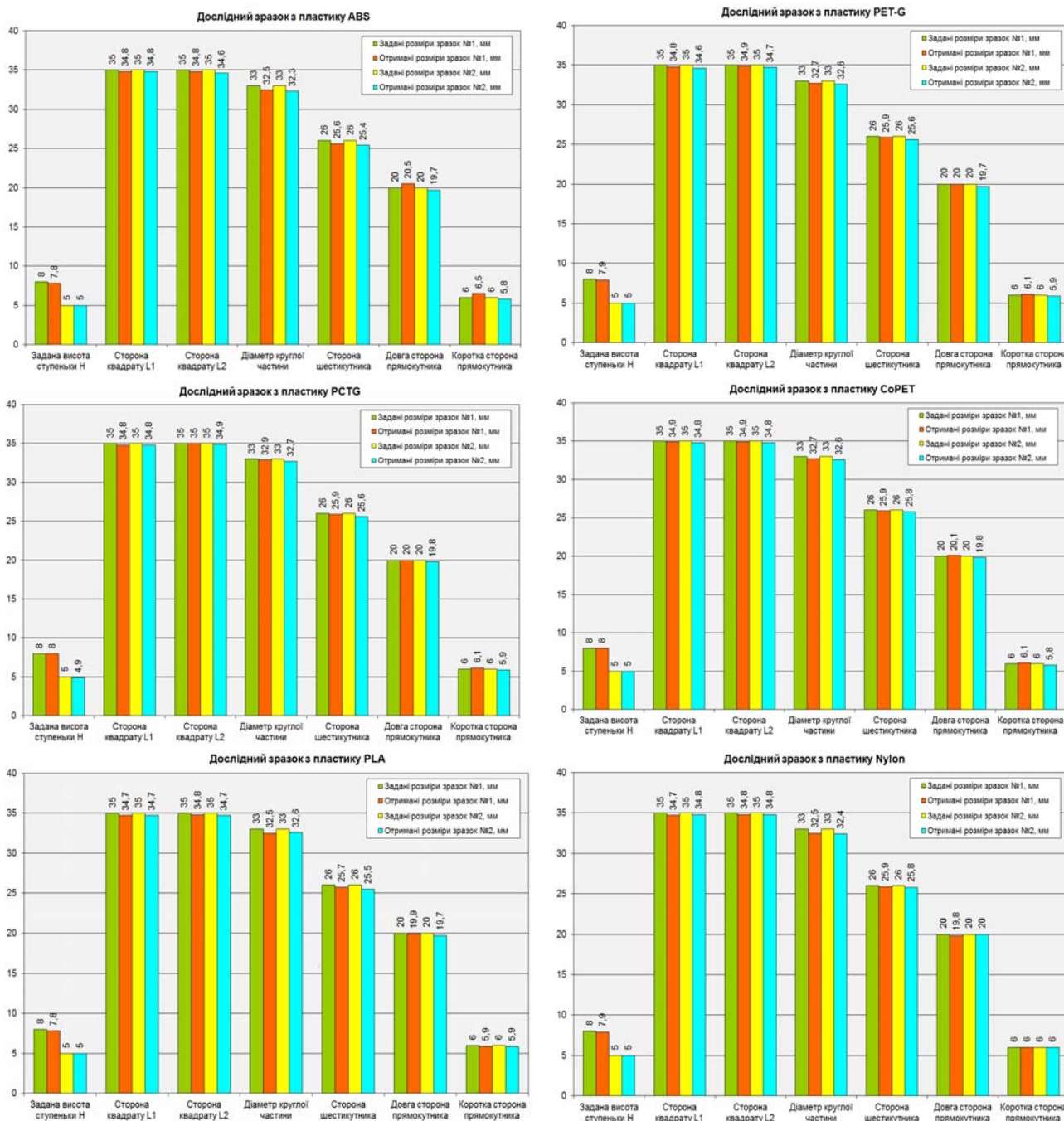


Рисунок 9 – Результати вимірювань дослідних зразків, виготовлених з пластиків ABS, PET-G, PCTG, CoPET, PLA та Nylon [6]

Джерело: розроблено авторами

Результати вимірювань надрукованих зразків з пластику ABS показали, що реальні розміри їх характерних поверхонь менші ніж задані на 1,5...2% (тобто надрукований зразок менший ніж 3D-модель). Це пояснюється тим, що пластик ABS при охолодженні стискується. В деяких випадках можливе відставання основи моделі від поверхні стола принтера (рис. 10). Це явище може мати місце, якщо під час 3D-друку температура основи із підігрівом буде недостатня, або присутнє погане зчеплення матеріалу основи (нею може бути термоскло або відполірована металева пластина) із розплавленою ниткою першого надрукованого шару ABS. Для уникнення цього

негативного явища температуру нагріву основи піднімають до 100...110°C, а її поверхню покривають тонким шаром матеріалу з високою адгезією.

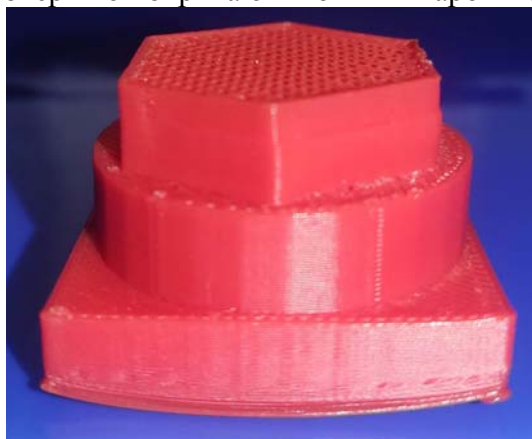


Рисунок 10 – Явище деформації прямокутної основи надрукованого зразка з ABS пластика
Джерело: розроблено авторами

Таким чином можна зробити висновок, що для забезпечення якомога більшого співпадіння розмірів надрукованої деталі з ABS пластику з її 3D-моделлю необхідно вводити поправочний коефіцієнт в сторону збільшення розмірів моделі, який підбирається дослідним шляхом.

У зразків, надрукованих з технічних пластиків марок PETG, PCTG та CoPET розміри характерних поверхонь відрізнялись від 3D-моделі в межах 0,5...1%, що є гарним результатом. Необхідно відмітити, що зовнішні поверхні деталей мають привабливий вигляд та майже не потребують додаткової обробки.

Ці пластики успішно застосовуються для виготовлення деталей де важливо мати гарний зовнішній вигляд одночасно з високою міцністю. При цьому на міцність деталей дуже великий вплив буде мати напрямок прикладення зусиль до деталі, так як під час застосування FDM-технології надруковані шари пластику мають обмежену адгезію поміж собою та можуть розшаруватись між собою під час великих механічних навантажень, прикладених вздовж них або якщо деталь працює на розрив.

Явище усадки надрукованих деталей пов'язане з фізичними-механічними властивостями пластику та швидкістю його застигання. У випадку, коли обдув друкованого зразка з PETG відбувається з двох сторін деталі ззовні, то процес застигання відбувається швидше, а усадка має меншу величину. Внутрішня сторона обдувається повітрям в меншому ступені, тому розпливання пластику буде вищим. Ступінь усадки деталей під час друку пластиком конкретної марки та партії/дати випуску необхідно встановити шляхом друку контрольного зразка та його ретельного вимірювання.

Для зразків 1-го типу усадка фіксується на всієї зовнішній поверхні, тобто реальні розміри на мм менші на величину 0,1...0,3, ніж задані у 3D-моделі. У випадку друку деталей, які будуть працювати з заданими зазорами або натягами не можна нехтувати цією погрішністю та обов'язково враховувати поправочний коефіцієнт при моделюванні деталі. Ще одним фактором, який потребує уваги є те, що шарувата структура деталей (рис. 11), яка утворюється під час друку буде завжди давати певну погрішність як під час вимірювань, так і в процесі прироблювання поверхонь деталей одна до одної. Для зразків 2-го типу з отворами різної форми усередині усадка назовні складає до 0,1...0,15 мм, а у середині зразків має величину 0,1...0,2 мм тому її також враховуємо під час корегування розмірів 3D-моделі. В цілому можна зробити висновок, що пластики марок PETG, PCTG та CoPET мають високий показник співпадіння розмірів моделі та надрукованих зразків.

Під час друку зразків з нейлону цей матеріал показав себе таким, що потребує ретельної підготовки та додаткових налаштувань принтера. Схильність нейлону до абсорбування вологи вимагає його зберігання в сухих приміщеннях та застосування закритої камери друку. Робочий стіл принтера необхідно нагрівати до високих температур та уникати протягів у приміщенні. Вироби із нейлону мають підвищену здатність до розшарування надрукованого матеріалу, тому їх ціна буде вищою у порівнянні з іншими видами пластику за рахунок більшої собівартості друку.

Результати вимірювань розмірів характерних поверхонь зразку з пластика PLA показали, що він практично не дає усадки під час друку.

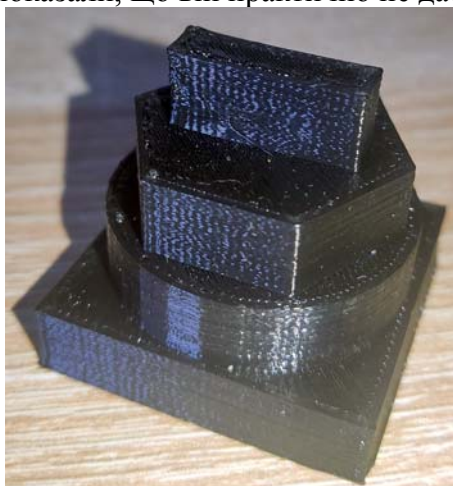


Рисунок 11 – Шарувата структура надрукованого зразка

Джерело: розроблено авторами

Також він не потребує підігріву робочого стола принтера та не боїться протягів під час друку, що значно зменшує вимоги до обладнання. Матеріал PLA менш токсичний, ніж ABS, тому вимоги з техніки безпеки під час друку цим матеріалом не такі суворі. Вироби з PLA мають тверду, міцну та «слизьку» поверхню, що дозволяє виготовляти з нього широку гамму моделей.

Однак, з часом цей біорозкладний матеріал під впливом навколишнього середовища (вітер, опади, ультрафіолетове випромінювання) починає руйнуватись, тому вироби з PLA не можуть застосовуватись там, де будуть великі фізичні навантаження на них або для довгострокового використання поза приміщень без спеціального захисного покриття.

Серед інших недоліків пластику PLA треба також відмітити, що він «пливе» під дією високих температур. Через високу твердість PLA його механічна обробка більш утруднена, тому якщо, наприклад, у надрукованій деталі буде потрібно просвердлити отвори та нарізати у них різьбу то буде кращім обрати інший технічний пластик.

Після аналізу переваги та недоліків пластику PLA, можливо рекомендувати його застосування для друку великогабаритних деталей з точними розмірами, а також фізичних моделей для прототипування, елементів декору та сувенірів, де не потрібен тривалий життєвий цикл виробу.

Через відносно невелику вартість сировини ABS є одним із самих розповсюджених технічних пластиків. Цей матеріал вдало поєднує у собі міцність та пружність, що дозволяє широко застосовувати ABS для виготовлення різноманітних виробів з тривалим строком служби. Успішність застосування цього пластику як на холоді так й в умовах високих температур дозволяє працювати виробам з нього ABS як у побутових, так й промислових пристроях та машинах. Пластик ABS гарно піддається різноманітній механічній обробці, що разом з можливістю хімічного згладжування поверхні надрукованої деталі у парах ацетону дозволяють робити з цього матеріалу як декоративні вироби складної форми так й корпуси, кронштейни та інші деталі з високою якістю поверхні.

Однак, ультрафіолетове випромінювання погано впливає на стійкість ABS (так, під дією сонячних променів пластик жовтіє), що обмежує застосування нефарбованих виробів на вулиці. ABS не любить протягів під час друку, а під час нагріву він виділяє у повітря токсичні речовини. Це значно обмежує застосування цього пластику в дешевих принтерах з відкритим корпусом без організації якісної вентиляції приміщень, де вони встановлені.

Внаслідок відносно високої усадки матеріал ABS схильний до розшарування надрукованого виробу та вимагає наявності робочого стола принтера з підігрівом до температур 100-110°C. Якщо цього не зробити, то у більшості випадків на початку 3D-друку можуть виникнути проблеми із прилипанням до поверхні стола перших шарів розігрітої пластикової нитки, внаслідок чого виріб відривається від стола й все потрібно буде починати заново.

Все вищенаведене обумовлює застосування пластику ABS для друку декоративних виробів із додатковою хімічною обробкою зовнішніх поверхонь,

виготовлення деталей типу різноманітних валів, втулок, тяг та кронштейнів з невеликою кількістю гострих кутів та граней. Пластик ABS дуже гарно показав себе для одиничного або дрібносерійного друку корпусів та інших подібних комплектуючих.

За асортиментом доступних кольорів та по іншим споживчим якостям технічні пластики PETG, PCTG та CoPET практично не поступаються ABS. Також важливо є те, що ці популярні матеріали набагато менш токсичні, ніж ABS, тому безпекові заходи для них менш суворі. Невелика величина усадки дозволяє створювати деталі із високим ступенем точності геометричних розмірів, а збалансовані фізико-механічні характеристики дозволяють друкувати з філаменту PETG, PCTG та CoPET такі відповідальні деталі, як вали та корпуси механічних редукторів, що працюють з невеликими навантаженнями, зубчасті колеса та шестерні, опори, кришки, кронштейни та тяги. Завдяки гарній адгезії між друкованими шарами пластику матеріали PETG, PCTG та CoPET дуже добре піддаються свердлінню, точінню, фрезеруванню, нарізанню різьби та ін. Завдяки гарному ковзанню та високій міцності на удар ці пластики є дуже перспективними матеріалами для виробництва найрізноманітніших одиничних та дрібносерійних виробів.

Ще однією важливою перевагою пластиків PETG, PCTG та CoPET є їх висока стійкість до ультрафіолетового випромінювання, тому вироби із них успішно працюють поза приміщеннями без додаткових захисних покриттів. Недоліком цих матеріалів є досить висока плинність під час друку. Це вимагає ретельного налаштування 3D-принтера та контролю його параметрів під час друку деталей. Висока температура друку може вивести із ладу плавкі фторопластові вставки в друкуючій голівці, та вимагає застосування спеціальних металевих термічних бар'єрів, із суцільного металу, які коштують доволі коштовні у порівнянні з традиційними друкуючими голівками. Температура розм'якшення і механічна міцність PETG, PCTG та CoPET нижче у порівнянні з ABS.

Враховуючи все вищенаведене, можливо рекомендувати пластики PETG, PCTG та CoPET в якості перспективного матеріалу для створення прототипів перспективних технічних виробів складної форми. Наприклад, з цього філаменту можливо виготовляти прототипи корпусів редукторів електропідсилювачів рульового керування, помірно навантажені кінематичні пари, елементи декору, а також вироби, що експлуатуються поза приміщеннями.

Завдяки високій стійкості нейлону до стирання та високих температур, його міцності, пружності, термостійкості, хімічній стабільності, низькому коефіцієнту ковзання цей матеріал є незамінним для друку різного типу шестерень та навантажених конструкційних деталей. Однак, незважаючи на низку переваг, нейлон має дуже високу усадку, потребує використання закритих камер для друку та складний для створення великих за розмірами виробів. Окрім необхідності застосування принтера, який потребує ретельного налаштування саме для друку нейлоном, потрібно ще дуже правильно зберігати та підготовлювати філамент (нейлонову нитку). Потрібно враховувати високу ступінь усадки нейлону та при створенні віртуальної моделі обов'язково корегувати її розміри з урахуванням коефіцієнту усадки. Найчастіше нейлон використовується для 3D-друку опорних підшипників, вкладишів, втулок ковзання та напрямних елементів деталей, які працюють в умовах високих температур та під впливом агресивних хімічних речовин.

За результатами проведених досліджень точності розмірів деталей, отриманих за допомогою FDM-технології було розроблено вдосконалений алгоритм 3D-друку з використанням технічних пластиків для одиничного та дрібносерійного виробництва, який представлено на рис. 12.

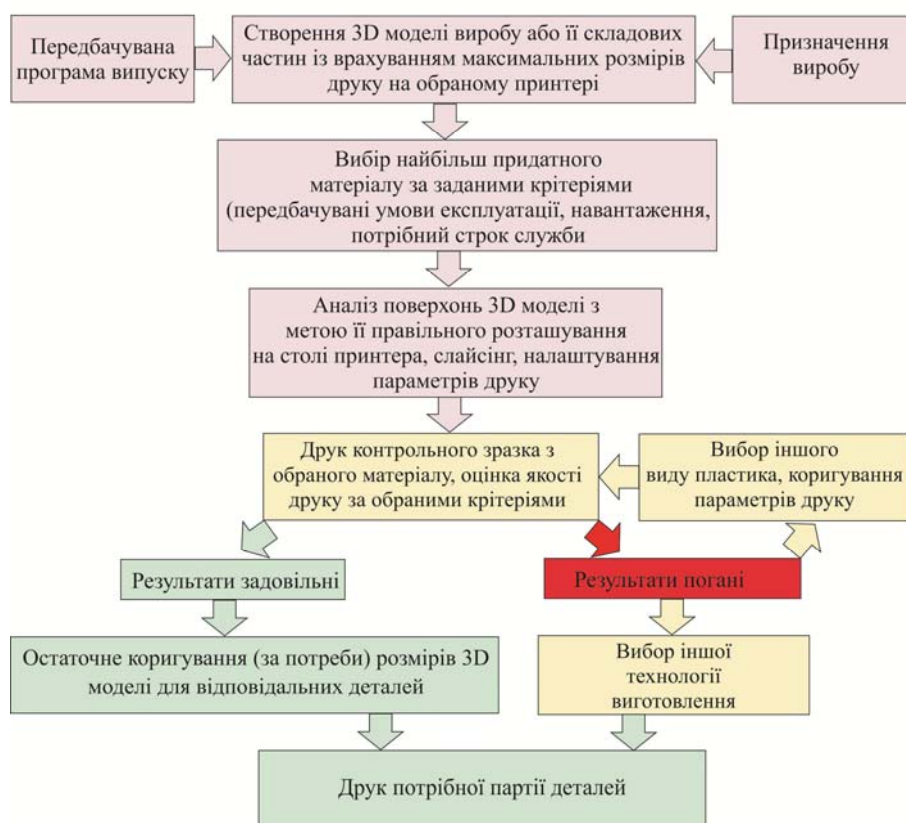


Рисунок 12 – Вдосконалений алгоритм 3D-друку деталей з використанням технічних пластиків
Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. 3D-друк за FDM-технологією є одним із найбільш економічних способів створення унікальних та малосерійних деталей або прототипів із технічних пластиків.

2. Час 3D-друку деталей за цією технологією цілком прийнятний в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, а існуючі технології доступні та відпрацьовані.

3. Наявний широкий асортимент технічних пластиків підходить як для створення фізичних моделей прототипів, так і для комерційного застосування.

4. Особливості 3D-друку за FDM-технологією обумовлюють нижчу розмірну точність та роздільну здатність у порівнянні з іншими технологіями, тому цей спосіб не рекомендується для друку моделей складної форми та з дрібними деталями.

5. Готовий виріб внаслідок особливостей FDM-технології після друку має видимі шари матеріалу, тому в разі потреби гарного зовнішнього вигляду деталі буде необхідна додаткова обробка.

6. Адгезія надрукованих шарів пластику поміж собою робить деталі, отримані за допомогою FDM-технології анізотропними. Саме тому не бажане використання таких деталей у відповідальних вузлах, які працюють на розтяг.

7. З метою запобігання деформації деталі у вигляді загинання кутів плоскої основи на пластиках типу ABS, що мають значний відсоток усадки, необхідно уникати розташування великих плоских ділянок у горизонтальній площині, а в разі потреби передбачувати підтримки в місцях розташування гострих кутів ($>45^\circ$) на моделі.

8. Під час друку деталей з отворами, їх розміри завжди будуть дещо меншими. Це пояснюється характером розподілу напружень у деталі, причому характер усадки по осях не лінійний. Так, по осі OZ усадка менша ніж по осях OX и OY. Це пояснюється

тим, що шари пластику по осі OZ накладаються на робочу поверхню стола принтера поза залежністю від усадки. Під час друку технічними пластиками у закритій камері при температурі стола в межах 100...110°C усадка по всіх осях майже не відрізняється. В такому випадку можливо використовувати один коефіцієнт об'ємної усадки для всіх осей.

Реальний досвід 3D-друку показує, що відсоток усадки для одного й того ж виду пластика, але з різних партій може відрізнитись. Саме тому для забезпечення високої точності та якості надрукованих виробів необхідно підбирати цей коефіцієнт шляхом друку контрольних зразків та вимірюванням отриманих моделей. В основному усадка деталей залежить від температури екструзії. Чим вище температура, тим більша буде усадка. В такому випадку необхідно знайти «золоту середину» поміж адгезією накладених шарів пластику та його усадкою. Також на усадку можуть впливати товщина накладеного шару пластику, діаметр використаного сопла, характер та відсоток заповнення об'єму деталі, товщина її стінок, габарити, швидкість друку, напрямок потоку повітря під час обдуву деталі додатковими вентиляторами тощо.

Список літератури

1. A. El Omari, A. Oubalouch, M. Nassraoui. Optimising surface roughness, dimensional accuracy and printing time of FDM PETG parts using statistical methods and artificial neural network, Archives of Materials Science and Engineering. 133/1. (2025). 5-17. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2924>
2. Azhar Eqball, Ramesh Murmu, Veenit Kumar, Md. Asif Eqbal. A recent review on advancements in dimensional accuracy in fused deposition modeling (FDM) 3D printing. AIMS Materials Science, 11(5): 950–990. Published: 17 October 2024. DOI: 10.3934/matserci.2024046
3. F. R. Ramli, M. S. M. Faudzie, M. A. Nazan1, M. R. Alkahari, M. N. Sudin, S. Mat and S. N. Khalil. DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE ROUGHNESS OF PART FEATURES MANUFACTURED BY OPEN SOURCE 3D PRINTER. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. VOL. 13, NO. 3, FEBRUARY 2018
4. Turek, P.; Bazan, A.; Bulicz, M. Effect of 3D Printing Orientation on the Accuracy and Surface Roughness of Polycarbonate Samples. *Machines* 2025, 13, 9. <https://doi.org/10.3390/machines13010009>
5. Кириченко А.М. Досвід створення та експлуатації технологічного обладнання паралельної структури, "Сучасні технології промислового комплексу", ХНТУ, Херсон, Україна, 2016. С. 54-55
6. Саят Мкртчян, Павло Єрьомін «Підвищення точності розмірів пластикових деталей, виготовлених методом 3D друку». Збірник тез LVIII науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти, присвяченої до дня науки-2024. С. 133-135.

References

1. El Omari, A., Oubalouch, A., & Nassraoui, M. (2025). Optimising surface roughness, dimensional accuracy and printing time of FDM PETG parts using statistical methods and artificial neural network, Archives of Materials Science and Engineering, 133/15-17. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2924>
2. Azhar, Eqball, Ramesh, Murmu, Veenit, Kumar, & Md. Asif, Eqbal. (2024). A recent review on advancements in dimensional accuracy in fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *AIMS Materials Science*, 11(5): 950–990. Published: 17 October 2024. DOI: <https://doi.org/10.3934/matserci.2024046>
3. Ramli, F. R., Faudzie, M. S. M., Nazan1, M. A., Alkahari, M. R., Sudin, M. N., Mat, S. & Khalil, S. N. (2018). DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE ROUGHNESS OF PART FEATURES MANUFACTURED BY OPEN SOURCE 3D PRINTER. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. VOL. 13, NO. 3, FEBRUARY 2018.
4. Turek, P., Bazan, A., & Bulicz, M. (2025). Effect of 3D Printing Orientation on the Accuracy and Surface Roughness of Polycarbonate Samples. *Machines* 2025, 13, 9. <https://doi.org/10.3390/machines13010009>
5. Kyrychenko, A. M. (2016). Experience in the Design and Operation of Parallel Structure Process Equipment. *Modern Technologies of the Industrial Complex* (pp. 54-55). Kherson National Technical University (KNTU), Kherson, Ukraine. [in Ukrainian].
6. Mkrтчian, S., & Yeromin, P. (2024). Improving the Dimensional Accuracy of Plastic Parts Manufactured by 3D Printing. Collection of Abstracts of the LVIII Scientific and Technical Conference of Higher Education Students Dedicated to Science Day 2024 (pp. 133-135). [in Ukrainian].

Pavlo Yeromin, PhD tech. sci, **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Andrii Hrechka**, PhD tech. sci, Associate Professor, **Sviatskyi Volodymyr**, PhD tech. sci, Associate Professor.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Dimensional Accuracy of Engineering Plastic Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing

The current state of the use of additive FDM 3D printing technologies in the manufacturing of mating (interfacing) components made of engineering plastics has been investigated. The possibility of improving the geometric accuracy of plastic parts through the application of an enhanced 3D printing process has been substantiated. An improved methodology for evaluating the quality of manufactured parts is proposed, in particular with regard to the compliance of their actual geometric parameters with those specified in a specially developed 3D model. Additionally, recommendations have been developed for the selection of 3D printing parameters and for the adaptation of technological approaches to the fabrication of components from various grades of engineering plastics.

FDM technology, dimensional accuracy, engineering plastics, 3D printing

Одержано (Received) 01.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 01.04.2026

Прийнято до друку (Approved) 09.04.2026

УДК 656.338.12

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).52-65](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).52-65)

А. М. Красота, І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, **М. В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Р. А. Осін**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: krasotamy@ukr.net

Визначення оптимальних параметрів ФАБО кулачків розподільних валів

У статті представлені результати дослідження, спрямованого на покращення якості отримання антифрикційних покриттів під час використання фінішної антифрикційної безабразивної обробки кулачків розподільних валів автомобільних та тракторних двигунів. За критерії оптимізації було обрано умови якості антифрикційного покриття (суцільність, відносна шорсткість поверхні) та експлуатаційний показник – інтенсивність зношування зразка. Функціями відгуку були обрані режими ФАБО за визначеною схемою нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню кулачків розподільних валів. Після проведення багатофакторного експерименту, на основі результатів, було отримано серію математичних моделей у вигляді рівнянь регресії. Аналіз математичних моделей дозволив визначити оптимальні змінні значення режимних параметрів ФАБО.

Результати наданого дослідження дозволили визначити оптимальні режими ФАБО, а саме: тиск інструменту, швидкість ковзання інструменту та подача інструменту.

При заданих оптимальних параметрах було отримано прогнозовані значення вихідних змінних: суцільності покриттів, інтенсивності зношування та відносної шорсткості.

Встановлено, що зі збільшенням тиску до 60 МПа спостерігається зменшення інтенсивності зношування, проте подальше збільшення тиску має тенденцію до її зростання. При заданих швидкостях приблизно 2,0 м/с спостерігається збільшення суцільності покриття до досягнення максимальних значень, подальше збільшення швидкості ковзання негативно впливає на суцільність покриття через недостатнє заповнення мікрорельєфу та погане формування антифрикційного покриття. Збільшення подачі у всьому діапазоні негативно впливає на відносну шорсткість, тому під час обробки слід підтримувати мінімальні значення подачі.

антифрикційне покриття, розподільний вал, довговічність, багатокритеріальна оптимізація, технологічний параметр, зносостійкість

© А. М. Красота, І. В. Шепеленко, М. В. Красота, Р. А. Осін, 2026