

Забезпечення параметрів якості поверхневого шару виробів, отриманих адитивними процесами, при торцевому фрезеруванні

У статті досліджено закономірності формування параметрів якості поверхневого шару виробів, отриманих адитивними процесами, зокрема методом FDM, при їх механічній постобробці торцевим фрезеруванням. Розглянуто вплив режимів різання (швидкість обертання, подача, глибина різання), а також технологічних параметрів друку (товщина шару, орієнтація побудови, щільність заповнення) на формування мікрорельєфу поверхні та значення шорсткості.

Проаналізовано особливості обробки полімерних матеріалів з анізотропною та пористою структурою, характерною для адитивного виробництва, з урахуванням ризиків розширення, термічного розм'якшення та утворення дефектів. На основі експериментальних досліджень отримано залежності параметрів шорсткості поверхні від режимів обробки та напрямку різання відносно шарів матеріалу.

Побудовано математичну модель формування шорсткості поверхні, що враховує основні технологічні фактори процесу фрезерування. Встановлено, що домінуюче на якість поверхні впливає подача, тоді як підвищення швидкості обертання у допустимому діапазоні сприяє стабілізації процесу різання. Показано, що обробка перпендикулярно шарам призводить до збільшення шорсткості через посилення міжшарових деформацій.

Запропоновано раціональні режими торцевого фрезерування, які забезпечують мінімальні значення шорсткості при збереженні структурної цілісності матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації процесів постобробки адитивних виробів та підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: адитивне виробництво; FDM; торцеве фрезерування; шорсткість поверхні; постоброблення; параметри різання; поверхневий шар.

Актуальність теми. Fused deposition modeling (FDM) є методом адитивного виробництва, який заснований на гарячому екструзійному полімерних матеріалів послідовними шарами з використанням комп'ютерного числового програмного управління. Завдяки економічній ефективності FDM знайшов широке застосування в виробництві [1]. Важливим параметром готового виробу є якість отриманих робочих поверхонь. Низькі показники шорсткості є характерними для FDM-виробів порівняно з процесами механічної обробки, це може призвести до підвищеного зносу, передчасного руйнування або навіть відбракування виробу [2], як наслідок виникає потреба у визначенні раціональних режимів постобробки.

Широка номенклатура використовуваних матеріалів для FDM, мономатеріали та композиційні з різними типами наповнювача (карбон, деревина, скловолокно, метали) [3] потребують детального дослідження для призначення режимів постоброблення. Оскільки матеріали мають низьку температуру розм'якшення (60–130 °C), існує велика вірогідність, що не коректно підібрані режими призведуть до термічного руйнування виробу.

Не даний момент немає систематичного підходу до постоброблення робочих поверхонь виробів, на практиці це призводить до експериментального підбору режимів постоброблення та проблем відтворення в подальшому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Параметри поверхневого шару виробів, отриманих FDM-друком, де процес формування поверхні супроводжується появою можливих дефектів [4], зумовлених дискретною природою процесу, є одним із ключових факторів, що визначає їх функціональну придатність, довговічність та точність спряження з іншими елементами конструкцій.

Зокрема, питання оптимізації параметрів адитивного виготовлення з метою зменшення шорсткості поверхні висвітлено в дослідженнях оптимізації параметрів процесу [5], де застосування методів Taguchi та статистичного аналізу дозволило встановити раціональні режими лазерної обробки для підвищення якості критичних поверхонь. Вплив термомеханічних параметрів процесу на формування текстури поверхні узагальнено у роботі [6], де доведено визначальну роль товщини шару, швидкості сканування та теплових градієнтів у формуванні мікрорельєфу.

Вагомий внесок у дослідження впливу параметрів FDM-друку на якість поверхні зроблено у працях, присвячених прогнозуванню характеристик процесу FDM, де встановлено залежність шорсткості від кута укладання нитки, товщини шару та щільності заповнення [7]. Методи багатofакторної оптимізації, демонструють ефективність раціонального вибору параметрів друку для мінімізації параметра Ra та покращення топографії поверхні полімерних виробів [8].

Разом з оптимізацією параметрів друку значна увага приділяється постобробці як ефективному способу покращення якості поверхневого шару. Дослідження впливу хімічного постоброблення показують істотне зниження шорсткості та покращення оптичних і механічних властивостей поверхні полімерних FDM-деталей [9].

Порівняльні дослідження хімічної та механічної обробки ABS-виробів демонструють, що комбіновані методи дозволяють досягти більш значного зменшення шорсткості, ніж застосування окремих технологій [10].

Узагальнюючі оглядові дослідження постпроцесів в адитивному виробництві підкреслюють, що термічні, механічні та хімічні методи постобробки є необхідними для усунення дефектів шаруватої структури та забезпечення функціональних характеристик деталей [11].

Особливий інтерес становлять дослідження гібридних технологічних підходів, у яких поєднуються адитивне виготовлення та механічна обробка різанням. Оглядові роботи, присвячені покращенню шорсткості FDM-деталей шляхом CNC-обробки, демонструють ефективність фрезерування у зменшенні шорсткості, усуненні ступінчастого ефекту та підвищенні точності поверхні [12]. При цьому встановлено, що режими різання, геометрія інструмента та орієнтація шарів істотно впливають на формування поверхневого шару та ризик деламінації матеріалу.

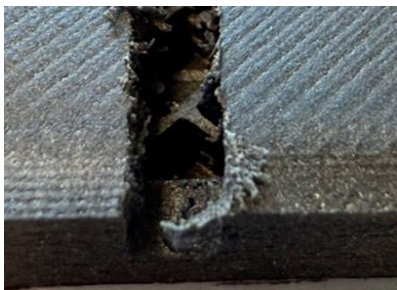
Водночас питання формування параметрів якості поверхневого шару полімерних виробів адитивного походження саме при торцевому фрезеруванні залишаються недостатньо дослідженими. Існуючі роботи здебільшого розглядають окремі аспекти механічної обробки або постобробки без урахування специфіки шаруватої анізотропної структури матеріалу та її впливу на механіку різання. Це обумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей формування поверхневого шару при торцевому фрезеруванні адитивних полімерних виробів та розроблення рекомендацій щодо забезпечення необхідних параметрів якості.

Метою статті є дослідження підвищення якості поверхневого шару виробів, виготовлених адитивними технологіями, шляхом встановлення закономірностей його формування та обґрунтування раціональних режимів торцевого фрезерування, що забезпечують зниження шорсткості, стабільність структури поверхні та відсутність дефектів шаруватої будови матеріалу.

Об'єктом дослідження є процес формування параметрів якості поверхневого шару виробів із полімерних матеріалів адитивного походження під час їх механічної обробки торцевим фрезеруванням.

Викладення основного матеріалу. Завданням постобробки є підвищення якості поверхні (усунення дефектів виготовлення) та точності розмірів виробів, надрукованих за технологією FDM. Ці поліпшення є особливо актуальними з огляду на властиві процесу FDM обмеження, такі як об'ємні похибки, відхилення форми та шорсткість поверхні, які можна ефективно зменшити за допомогою механічної постобробки на верстатах.

Порівняно з традиційною обробкою термопластів, постобробка виробів, виготовлених за технологією FDM, за допомогою ЧПУ-обробки створює унікальні виклики, головним чином через слабе міжшарове зчеплення, властиву анізотропію та пористість деталей [13]. На відміну від виробів, виготовлених методом лиття під тиском або екструзії, вироби, надруковані за технологією FDM, мають спрямовані механічні властивості, залишкові напруження та нерівності поверхні, спричинені ефектом шаруватості [14]. Ці характеристики роблять вироби, надруковані за технологією FDM, дуже вразливими до розшарування, неточностей розмірів та непередбачуваної поведінки під час обробки. Така обробка виробів, виготовлених за технологією FDM, на верстатах з ЧПУ вимагає адаптивного підходу, в якому параметри процесу (що включають швидкість різання, подачу, глибину та вибір інструменту) повинні бути оптимізовані, щоб запобігти надмірному нагріванню, розриву матеріалу або розшаруванню між шарами [15] (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Типові дефекти постобробки виробів FDM на верстатах з ЧПК: а) надмірна глибина різання; б) розшарування шарів

Згідно з [16], фрезерування вниз, забезпечує кращу обробку поверхні (нижче Ra), ніж фрезерування вгору, оскільки різальна дія інструменту тиснула на нитки, зменшуючи розшарування. Воно також показало більшу стабільність у згладжуванні поверхневих виступів. Фрезерування вгору іноді давало нижчі значення Ra, але це було значущим лише для висот шарів (0,15 мм); при більших висотах (0,25 мм) результати були більш мінливими, ймовірно, через дефекти осадження волокон.

Швидкість обертання шпинделя, яка безпосередньо пов'язана зі швидкістю різання, повинна бути ретельно відкалібрована для збалансування теплоутворення та ефективності різання. Надмірна швидкість може спричинити термічне розм'якшення термопластів [17], що призведе до деформації. З іншого боку, недостатня швидкість може прискорити знос інструменту і одночасно збільшити сили різання.

Аналогічно, вибір правильної швидкості подачі є компромісом між продуктивністю та якістю поверхні. Вищі швидкості подачі скорочують час циклу, але створюють ризик більшої шорсткості поверхні через нерівномірне видалення матеріалу, що стає особливо проблематичним при обробці виробів FDM з невідповідною адгезією шарів. І навпаки, нижчі швидкості подачі відповідають кращій обробці поверхні, але це збільшує час обробки і сприяє локальному накопиченню тепла, що створює проблеми для полімерів з низькою температурою плавлення. Глибина різання (t) вносить додаткові проблеми в цей баланс, оскільки агресивні глибини різання створюють ризик розшарування слабкоз'язаних шарів FDM, особливо тих, що мають низьку щільність заповнення або неправильну орієнтацію побудови. Тому для усунення цього недоліку та одночасного зменшення концентрації напружень зазвичай віддають перевагу неглибоким багатопрохідним стратегіям, навіть якщо вони вимагають точного планування траєкторії інструменту для збереження ефективності обробки [18].

Параметри друку FDM безпосередньо впливають на ефективність фрезерування з ЧПУ в поліпшенні якості поверхні та оброблюваності. Наприклад, орієнтація побудови сильно впливає як на шорсткість поверхні після друку, так і після механічної обробки [19]. При збереженні постійних параметрів ЧПУ найнижча шорсткість досягається при горизонтальному друку виробів (0°), тоді як вертикально надруковані зразки (90°), навіть якщо вони покращені, все одно мають високу залишкову шорсткість порівняно з горизонтальною орієнтацією.

Товщина шару також впливає на вимоги до постобробки. Фактично зі збільшенням товщини шару (понад 0,3 мм) збільшується кількість і ступінь вираженості нерівностей поверхні. Як результат, доводиться застосовувати більш глибокі різання, навіть якщо це може призвести до зносу інструменту та погіршення якості кінцевої обробки поверхні. І навпаки, тонші шари (наприклад, 0,1 мм) дають більш гладкі поверхні, а отже, вимагають мінімального зняття матеріалу під час обробки. Автори [20] продемонстрували, що поєднання FDM з абразивним фрезеруванням на одній платформі значно покращило точність розмірів (на 71–99 %) і якість поверхні (зменшення шорсткості до 91,3 %). Їхнє дослідження підтвердило, що товщина шару друку значно впливала на кінцеву шорсткість, причому значення шорсткості зменшувалися пропорційно до зменшення товщини шару.

На рисунку 2 показано вплив товщини шару (h) на шорсткість поверхні (Ra) для оброблених і необроблених виробів, проаналізованих за трьома орієнтаціями побудови: плоскою, на ребро і вертикальною. Оброблені зразки демонструють стабільно нижчі значення Ra для всіх значень h та орієнтацій побудови, що свідчить про ефективність процесу постобробки в поліпшенні якості поверхні. Однак для зразків з вищим Lt (особливо 0,20–0,25 мм) периферійні фрезерні операції призвели до збільшення шорсткості, особливо в CF-армованому PETG.

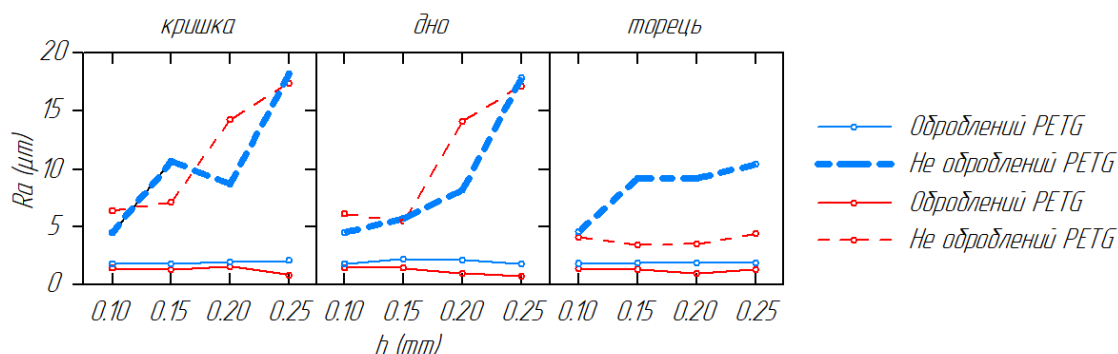


Рис. 2. Шорсткість поверхні (Ra) як функція товщини шару (h) для зразків PETG і CF-PETG у трьох орієнтаціях побудови

Іншим важливим фактором, що впливає на продуктивність ЧПУ, є щільність і структура заповнення [21]. Низький відсоток заповнення (зазвичай $< 50\%$) створює внутрішні порожнини, що робить деталь більш схильною до вібрації та деформації під дією сил обробки, що може призвести до

неточностей розмірів. Навпаки, висока щільність заповнення забезпечує міцну основу, що дозволяє виконувати більш точні обробні проходи та зменшує вібрацію під час різання, що призводить до підвищення стабільності обробки та якості поверхні.

Температура сопла під час друку впливає на міцність з'єднання матеріалу, що своєю чергою впливає на оброблюваність на верстатах з ЧПУ. Автори [22] оцінили вплив температури сопла на деталі, надруковані за технологією PLA FDM, підкресливши, що нижчі температури сопла (180–200 °C) забезпечують слабшу міжшарову адгезію, збільшуючи ризик розшарування та відколювання під час обробки, тоді як вищі температури (210–220 °C) забезпечують кращу адгезію, що призводить до більш однорідної та стабільної структури матеріалу, яка полегшує фрезерування з ЧПУ.

Серед критичних параметрів обробки швидкість різання безпосередньо впливає на швидкість зняття матеріалу, теплові ефекти та якість поверхні. Швидкість різання можна виразити як функцію швидкості обертання за формулою (1):

$$V_t = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (1)$$

де D позначає діаметр різального інструменту (в мм). При обробці однорідних термопластів більш високі швидкості шпинделя, як правило, забезпечують кращу якість поверхні, дрібнішу стружку та зменшують сліди від інструменту. Однак через свою шарувату структуру, анізотропію та властиву пористість матеріали, надруковані за технологією FDM, демонструють значно іншу реакцію. Насправді надмірні швидкості можуть спричинити локальне нагрівання, що призведе до ослаблення міжшарових зв'язків, розшарування та геометричних деформацій. З цієї точки зору, опубліковані дослідження надають дещо суперечливі дані щодо оптимальної швидкості різання. Наприклад, [23] виявили, що при сухому фрезеруванні деталей з поліаміду 12 (PA12), надрукованих за технологією FDM, мінімальна шорсткість поверхні деталей досягалася при середніх швидкостях різання (тобто 100–300 м/хв). Однак [24] дослідили вплив швидкості різання на кілька полімерів і повідомили про інші результати: приблизно 5500 об/хв (середній діапазон 3000–8000 об/хв з використанням інструменту 6 мм) дало найкращі результати для PLA і CF-PETG, тоді як PETG вимагав вищих швидкостей (8000 об/хв) для оптимальної обробки. З іншого боку, [25] не виявили значних змін шорсткості в досліджуваному діапазоні швидкості різання для PEEK і CF-PEEK. Більше того, при високих швидкостях різання тертя і теплоутворення збільшуються, що призводить до появи специфічних поверхневих особливостей, таких як локальні дефекти, порожнини і нерівності поверхні, якщо розглядати композити CF/PEEK. Фактично включення армування волоком призводить до підвищення крихкості матеріалу і одночасно сприяє утворенню порожнин і пустот. Ці два ефекти погіршують якість поверхні, особливо коли параметри обробки відхиляються від оптимальних значень.

Швидкість подачі визначається як лінійна швидкість, з якою різальний інструмент просувається по матеріалу. Вона визначає швидкість зняття матеріалу і, таким чином, значно впливає на ефективність обробки. Добре оптимізована швидкість подачі забезпечує точність розмірів і одночасно може запобігти виникненню дефектів поверхні, спричинених обробкою. Зокрема, нижчі швидкості подачі (0,01 мм/зуб) призводять до найнижчої шорсткості, тоді як вищі швидкості подачі (0,07 мм/зуб) скорочують час обробки, але призводять до збільшення шорсткості та вищих зусиль різання, оптимальні швидкості подачі залежать від матеріалу та умов змащення.

Під час обробки термопластичних матеріалів перевищення температури склування може значно вплинути на якість поверхні, точність розмірів та термін служби інструменту. Фактично, якщо температура перевищує цей пороговий рівень, жорсткість полімеру зменшується і виникає деформація, що призводить до розмазування, яке погіршує якість поверхні. Наприклад, PLA, температура склування якого є відносно низькою (~60 °C), є дуже чутливим до розм'якшення та плавлення, що призводить до злипання різального інструменту з поверхнею виробу і, таким чином, до погіршення її шорсткості.

Окрім проблем із якістю поверхні, обробка при температурах, що перевищують температуру склування, може спричинити неточність розмірів. Фактично, із підвищенням температури виріб зазнає деформації та термічного викривлення, що призводить до втрати допусків і викривлення. Аналогічно, через надмірне нагрівання може відбуватися розмазування, що призводить до розм'якшення полімерів і їх прилипання до інструменту або оброблюваної поверхні, замість утворення чистих стружок. Через низьку теплопровідність термопластичні матеріали легко досягають температури склування, що призводить до погіршення якості поверхні та зниження точності розмірів. Крім того, надмірне нагрівання може призвести до утворення наростів на кромках, коли розм'якшений матеріал прилипає до інструменту, знижуючи ефективність різання, прискорюючи знос інструменту та засмічуючи канавки інструменту, що збільшує тертя та сили різання. Щоб запобігти цим проблемам, необхідно застосовувати правильні методи обробки. По-перше, методи охолодження допомагають видалити стружку і збільшувати тепловідвід, підтримуючи температуру нижче температури склування. По-друге, оптимізація параметрів різання є важливою для зменшення шорсткості. Якщо змащення недоступне, вищі швидкості подачі можуть допомогти мінімізувати накопичення тепла і, таким чином, поліпшити шорсткість поверхні. Нарешті, вибір

інструменту і покриття відіграють важливу роль у контролі теплоутворення; зокрема, гострі карбідні інструменти зменшують нагрівання від тертя.

Глибина різання є важливим фактором, що впливає на швидкість видалення матеріалу, сили різання та розподіл напруги. На відміну від твердих термопластів, як уже згадувалося, матеріали, надруковані за технологією FDM, містять структурні дефекти, порожнини та нерівномірність міжшарової адгезії, що робить їх дуже вразливими до розшарування та геометричного викривлення, особливо при великій глибині різання. З цієї точки зору, для візерунків з низьким заповненням глибина різання повинна бути встановлена нижче, ніж товщина стінки, хоча низька глибина різання може бути недостатньою для усунення ефекту сходів. Тому глибина різання повинна бути обрана в межах вузького діапазону, щоб забезпечити ефективне видалення поверхневих дефектів без оголення внутрішніх дефектів [26]. Фактично вона має перевищувати початкову загальну шорсткість, щоб видалити оригінальну морфологію поверхні, створену в процесі 3D-друку. З іншого боку, вона не повинна перевищувати верхню межу, визначену порожнинами та внутрішніми дефектами в матеріалі.

Використовуючи різні глибини різання для чорнової та чистової обробки з метою поліпшення якості поверхні, виявлено, що відносно мала глибина різання (0,2 мм) зменшує шорсткість поверхні, тоді як більша глибина різання, як правило, мінімізує утворення задирок. Однак занадто мала глибина різання, як правило, не дозволяє усунути шаруватість [27], тоді як надмірно велика глибина різання збільшує зусилля різання, що може знизити якість поверхні через відносно низьку жорсткість полімерів. Аналогічно, [28] виявили, що для неармованих зразків PEEK оптимальна глибина різання (t) становила 0,1 мм, за межами якого шорсткість збільшувалася. На відміну від цього, для CF-PEEK було визначено оптимальне значення ar приблизно 0,2 мм, при якому шорсткість поверхні збільшувалася як при меншій, так і при більшій глибині різання. Для полімеру PA12 [29] найнижча шорсткість була виявлена на найнижчому рівні досліджуваного діапазону (від 0,6 до 1,0 мм).

Геометрія інструменту та вибір матеріалу мають вирішальне значення для управління зусиллями різання, мінімізації зносу інструменту та оптимізації якості поверхні. Притаманна мікроструктурна неоднорідність виробів, надрукованих за технологією FDM, впливає на утворення стружки, а також на взаємодію інструменту з матеріалом.

При обробці виробів, надрукованих за технологією FDM, відбувається знос інструменту, хоча його прогресування та інтенсивність залежать від властивостей матеріалу, умов різання. Абразивний знос відбувається вздовж різальних крайок через постійне тертя між інструментом та матеріалом заготовки. Зокрема, при обробці карбоновмісних матеріалів переважає знос боків, оскільки абразивні карбонові волокна роз'їдають покриття інструменту, оголюючи основу з карбиду вольфраму. Однак наявність вуглецевого волокна, як правило, зменшує як енергоспоживання процесу, так і зусилля різання під час обробки [30].

Адгезійний знос є результатом відносного руху між двома поверхнями, що ковзають (тобто заготовкою та поверхнею інструменту). Фактично, через тиск між двома поверхнями, що контактують, виникають високі температури та пластична деформація, що утворюють адгезійні зв'язки. Тому відбувається перенесення матеріалу з більш м'якої (тобто поверхні виробу) на більш тверду поверхню (тобто інструмент). Відносне ковзання між контактуючими поверхнями призводить до руйнування цих висококаліброваних адгезійних з'єднань, в результаті чого матеріал видаляється з інструменту. Відколи виникають через механічну нестабільність і вібрації, що виникають або в верстаті, або в виробі. Таким чином, високі швидкості подачі сприяють виникненню відколів, оскільки під час обробки збільшуються сили удару, що діють на інструмент. Відколи спостерігалися переважно на кінчику інструмента і різальних кромках.

Окрім поліпшення шорсткості поверхні, постобробка на верстатах також підвищує точність розмірів, що робить деталі, надруковані за технологією FDM, придатними для застосувань, що вимагають жорстких допусків.

Загалом у літературі досліджувалися лише прості геометрії. Щоб забезпечити виготовлення складних геометрій у подвійних композитних структурах FDM, необхідно врахувати кілька аспектів обробки. Неоднорідність матеріалів з різними коефіцієнтами жорсткості та теплового розширення вимагає ретельного підбору параметрів різання, щоб уникнути таких проблем, як розшарування, відколи або нерівна поверхня. Параметри різання повинні бути оптимізовані, щоб уникнути дефектів, таких як розшарування та нерівні поверхні. Висока абразивність вуглецевих композитних матеріалів вимагає зносостійких інструментів та вдосконалених методів охолодження. Тонкостінні решіткові елементи вимагають стратегій з низьким зусиллям та спеціальних кріплень для запобігання деформації. Термічний та механічний контроль є необхідним для збереження стабільності розмірів та функціональності деталі.

Хоча обробка на верстатах з ЧПУ покращує якість поверхні та точність розмірів, вона також створює проблеми, пов'язані з утворенням задирок. Утворення задирок є серйозною проблемою, оскільки негативно впливає як на точність розмірів, так і на якість поверхні. Задирки – це небажані виступи матеріалу, які залишаються на обробленій поверхні після різання. На їх утворення впливають швидкість



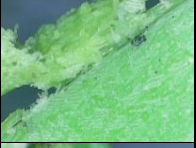





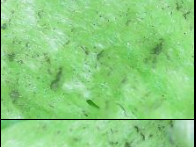







різання, швидкість подачі, геометрія інструменту, властивості матеріалу та умови охолодження / змащення.

Хоча кожен матеріал має свої особливості, вони виявили, що для досягнення оптимальної шорсткості та мінімальної висоти задирок необхідні різні параметри обробки. Зокрема, найкраща шорсткість поверхні (R_a) була досягнута при низькій швидкості подачі та малій глибині різання, тоді як найменша висота задирок була отримана при високій швидкості подачі в поєднанні з великою глибиною різання в досліджуваному діапазоні. Це свідчить про компроміс між поліпшенням шорсткості поверхні та утворенням задирок, що вимагає ретельного вибору параметрів процесу.

Поряд із дослідженням механізмів утворення задирок доцільним є кількісне оцінювання впливу режимів обробки на параметри шорсткості поверхні. Для цього було виконано математичне моделювання процесу торцевого фрезерування виробів адитивного походження з використанням експериментальних даних (табл. 1).

Таблиця 1

Експериментальні дані

Режими обробки			Напрямок обробки	Якість поверхні		Мікрофотографія	
Глибина різання t , мм	Подача S , мм/с	Кількість обертів ω , об/хв		R_a	R_z	поверхні	стружки
0,5	100	200	По шару	1,2	6,0		
0,5	100	200	Перпендикулярно	1,8	9,0		
1	100	350	По шару	0,48	2,4		
1	100	350	Перпендикулярно	0,72	3,6		
0,5	150	350	По шару	0,90	4,5		
0,5	150	350	Перпендикулярно	1,35	6,8		
0,5	100	350	По шару	0,40	2,0		
0,5	100	350	Перпендикулярно	0,60	3,0		

Як показано на схемі процесу (рис. 3), формування мікрорельєфу поверхні визначається просторовим розподілом сил різання P_x, P_y, P_z та мікродеформацій у зоні контакту інструмента з шаруватою структурою матеріалу. На відміну від ізотропних термопластів, у виробках FDM характер руйнування суттєво залежить від орієнтації шарів відносно напрямку подачі.

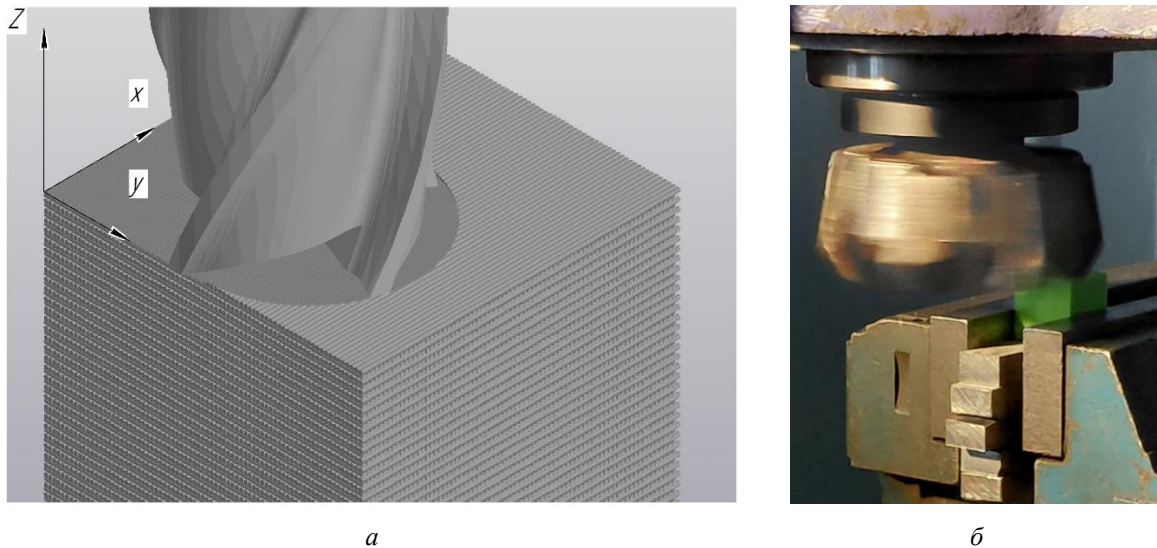


Рис. 3. Процес торцевого фрезерування адитивного виробу:
а – схема; б – експериментальне дослідження

Схематичне

Рівнодійна сила різання може бути представлена як:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2},$$

де збільшення складової P_z при різанні перпендикулярно шарам спричиняє зростання міжшарових мікропереміщень Δ , що безпосередньо впливає на параметри шорсткості Ra та Rz .

На основі експериментальних результатів встановлено функціональну залежність:

$$Ra = f(S, \omega, t, \varphi),$$

де S – подача; ω – частота обертання шпинделя; t – глибина різання; φ – напрямок різання (0 – по шару, 1 – перпендикулярно).

Після апроксимації експериментальних даних отримано узагальнену степеневу модель:

$$Ra = 0.0028 \cdot S^{1.08} \cdot \omega^{-0.62} \cdot t^{-0.15} \cdot (1 + 0.45\varphi).$$

Отримані коефіцієнти свідчать про таке:

- показник степені при подачі 1.08 підтверджує домінуючий вплив кінематичних параметрів на формування мікронерівностей;
- від’ємний показник при частоті обертання -0.62 вказує на стабілізуючу роль підвищених швидкостей у межах допустимого теплового режиму;
- незначний вплив глибини різання пояснюється тим, що при $t \geq 1$ мм відбувається повне видалення дефектного поверхневого шару;
- множник $(1+0.45\varphi)$ відображає збільшення шорсткості приблизно на 45 % при обробці перпендикулярно шарам.

Збільшення подачі зі 100 до 150 мм/с призводить до підвищення Ra на 40–80 %. Це пояснюється:

- зростанням товщини зрізаного шару,
- збільшенням амплітуди кінематичних слідів,
- посиленням мікрівібрацій у зоні міжшарової адгезії.

Таким чином:

$$Ra \sim S^{1.05-1.1},$$

що узгоджується з класичною теорією формування шорсткості, адаптованою до анізотропної структури FDM. Вплив швидкості обертання має обернений характер:

$$Ra \sim \omega^{-0.6}.$$

Підвищення швидкості обертання зменшує товщину зрізу на зуб і стабілізує процес руйнування, проте надмірні значення можуть призвести до перевищення температури склування T_g , що викликає розм’якшення полімеру.

Для досліджуваного матеріалу встановлено, що оптимальна глибина різання становить близько 1 мм. Менші значення не забезпечують повного усунення «ступінчастості» друку, тоді як надмірне збільшення глибини спричиняє зростання сил різання та ризик розшарування.

З метою визначення раціональних режимів запропоновано інтегральний критерій якості:

$$K = \alpha Ra + \beta P + \gamma T,$$

де коефіцієнти α, β, γ визначають вагомість якості поверхні, стабільності процесу та теплової безпеки.

Мінімізація функції K показала, що оптимальні режими обробки відповідають:

$$t = 1 \text{ мм}, S = 100 \text{ мм/с}, \omega = 350 \text{ об/хв}, \varphi = 0.$$

За цих умов експериментально отримано:

$$Ra = 0.48 \text{ мкм}, Rz = 2.4 \text{ мкм},$$

що забезпечує стабільну структуру поверхневого шару без ознак деламінації

За результатами опрацювання експериментальних досліджень було отримано ряд графіків залежності (рис. 4–5).

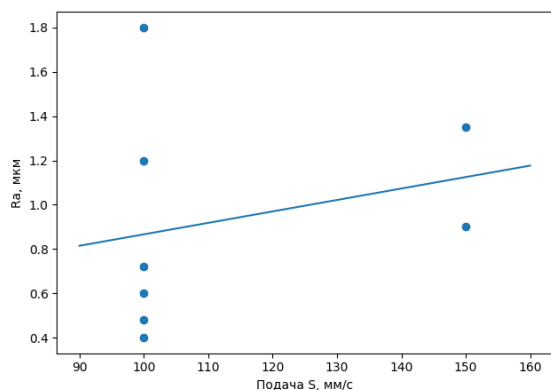


Рис. 4. Залежність Ra від подачі

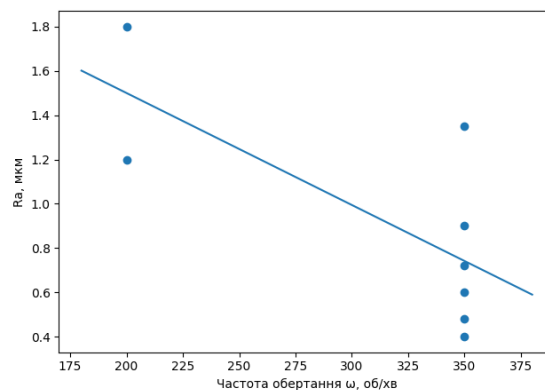


Рис. 5. Залежність Ra від частоти обертання

Аналіз показує статистично значуще зростання шорсткості при фрезеруванні перпендикулярно шарам, що пов'язано зі збільшенням складової сили Rz та міжшарових деформацій.

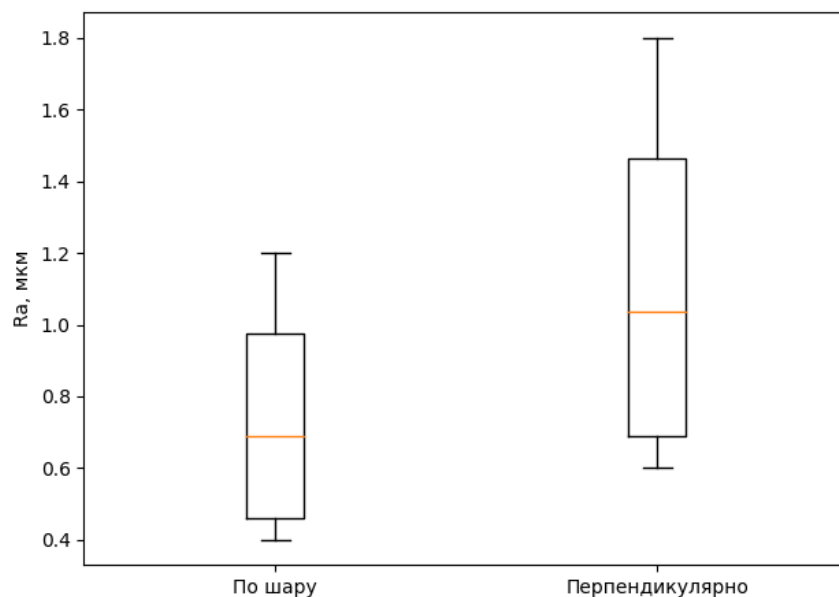


Рис. 6. Вплив напрямку різання

Висновки та перспективи подальших досліджень. Обробка на верстатах з ЧПУ продемонструвала значний потенціал як методика постобробки для поліпшення якості поверхні та точності розмірів деталей, надрукованих за технологією FDM. На відміну від традиційної металообробки, де обробка на верстатах є основним засобом виробництва деталей, в контексті деталей, надрукованих за технологією FDM (а також у виробництві металевих добавок), обробка на верстатах виконує функцію корегувального процесу. Її роль

полягає не в створенні геометрії з сировини, а в уточненні допусків розмірів, виправленні нерівностей поверхні та забезпеченні функціональної ефективності. Ця корекційна функція є особливо важливою для забезпечення придатності деталей, виготовлених методом адитивного виробництва, для кінцевого використання, особливо в високопродуктивних або прецизійних застосуваннях. Однак для досягнення оптимальних результатів необхідне ретельне налаштування параметрів процесу з метою збалансування таких конкуруючих факторів, як шорсткість поверхні, допуски розмірів, знос інструменту та утворення задирок. Вибір швидкості різання, швидкості подачі, глибини різання та стратегії охолодження повинен бути адаптований як до друкованого матеріалу, так і до його властивих мікроструктурних характеристик, включаючи анізотропію, пористість та армування волокнами.

Порівняно з необробленими деталями FDM, постобробка на ЧПУ дозволяє зменшити шорсткість поверхні (Ra), усунути шаруватість та покращити допуски на розміри, особливо при застосуванні неглибоких різань та відповідних стратегій охолодження. На якість поверхні після обробки суттєво впливають параметри FDM, такі як товщина шару, орієнтація побудови та щільність заповнення. Наприклад, горизонтально надруковані деталі та менша товщина шару зазвичай дають більш гладкі оброблені поверхні навіть у армованому матеріалі з CF. Параметри, такі як швидкість різання, швидкість подачі та глибина різання, повинні бути відрегульовані відповідно до матеріалу та структури. Вищі швидкості та агресивні різання можуть призвести до розшарування або задирок.

Хоча було досягнуто значного прогресу в розумінні ролі обробки з ЧПУ в поліпшенні якості деталей, надрукованих за технологією FDM, важливо визнати, що ця галузь досліджень все ще перебуває на початковій стадії. Цей короткий огляд підкреслює значні прогалини в знаннях, що залишаються, особливо в таких областях, як стандартизація процесів, оптимізація траєкторії інструменту та стратегії обробки конкретних матеріалів. Ще багато роботи потрібно зробити, щоб повністю зрозуміти та використати потенціал постобробки для адитивного виробництва FDM. Одне з основних обмежень розглянутих досліджень полягає в тому, що вони переважно зосереджуються на простих геометріях та компонентах з одного матеріалу, що не повністю відображає складність реальних застосувань. Для досягнення значних успіхів у цій галузі майбутні дослідження повинні розширюватися в напрямку вивчення складних геометрій та багатоматеріальних структур, надрукованих за технологією FDM, які становлять унікальні виклики для постобробки з ЧПУ. Крім того, збільшення доступності експериментальних наборів даних з відкритим доступом значно сприятиме валідації та порівняльному аналізу майбутніх досліджень, особливо тих, що стосуються нових або вдосконалених матеріалів.

References:

1. Abbasi, M., Váz, P., Silva, J. and Martins, P. (2025), «Head-to-head evaluation of FDM and SLA in additive manufacturing», *Applied Sciences*, Vol. 15, Issue 4.
2. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M.K.A. and Ismail, M.I.S. (2020), «Effects of CNC machining on surface roughness in fused deposition modelling (FDM) products», *Materials*, Vol. 13, Issue 11.
3. Kantaros, A., Soulis, E., Petrescu, F.I.T. and Ganetsos, T. (2023), «Advanced composite materials utilized in FDM/FFF 3D printing manufacturing processes: the case of filled filaments», *Materials*, Vol. 16, Issue 18.
4. Alnusirat, W., Hann, S., Salenko, O. et al. (2025), «Forming the properties of parts obtained by FDM by modifying the surface layer using mechanical and physical-technical treatment», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6.
5. Mondal, P., Das, A., Wazeer, A. and Karmakar, A. (2022), «Biomedical porous scaffold fabrication using additive manufacturing technique: porosity, surface roughness and process parameters optimization», *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 5, No. 3, pp. 384–396.
6. Kechagias, J.D. (2024), «Effects of thermomechanical parameters on surface texture in filament materials extrusion: outlook and trends», *F1000Research*, Vol. 13.
7. Tran, N.H. and Phan, N.D.M. (2025), «Analyzing the impact of process parameters on surface roughness and mechanical properties in FDM 3D printing using machine learning», *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Vol. 19, Issue 12, pp. 8709–8728.
8. Efa, D.A. and Ifa, D.A. (2025), «Optimization of design parameters and 3D-printing orientation to enhance the efficiency of topology-optimized components in additive manufacturing», *Results in Materials*, Vol. 26.
9. Valerga, A.P., Batista, M., Fernandez-Vidal, S.R. and Gamez, A.J. (2019), «Impact of chemical post-processing in fused deposition modelling (FDM) on polylactic acid (PLA) surface quality and structure», *Polymers*, Vol. 11, Issue 3.
10. Jayanth, N., Senthil, P. and Prakash, C. (2018), «Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3D-printed ABS using the FDM process», *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 13 (3), pp. 155–163.
11. Gómez-Gras, G. and Pérez, M.A. (2024), «Post-Processing of Additive Manufacturing Functional Polymeric Parts: Influence on Surface, Dimensional Quality and Mechanical Performance», *Post-Processing of Parts and Components Fabricated by Fused Deposition Modeling*, pp. 43–80.
12. Carta, M., Loi, G., El Mehtedi, M. et al. (2025), «Improving surface roughness of FDM-printed parts through CNC machining: A brief review», *Journal of Composites Science*, Vol. 9 (6).
13. Gao, J., Huang, S., Zhang, T. et al. (2025), «FDM 3D printing surface quality optimisation: multi-objective parameter control based on hybrid machine learning and response surface methodology», *Nondestructive Testing and Evaluation*, pp. 1–38.

14. Salenko, O., Strutinsky, V., Avramov, K. et al. (2025), «Providing technical and algorithmical support to the predictable properties of honeycomb filler obtained by additive processes», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 135, No. 1.
15. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M.K.A. and Hatami, S. (2021), «An overview of fused deposition modelling (FDM): research, development and process optimization», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 27 (3), pp. 562–582.
16. Del Sol, I. et al. (2019), «Study of the FDM parameters of the ABS parts in the surface quality after machining operations», *Key Engineering Materials*, Vol. 813, pp. 203–208.
17. El Mehtedi, M., Buonadonna, P., El Mohtadi, R. et al. (2024), «Surface Quality Related to Machining Parameters in 3D-Printed PETG Components», *Procedia Comput. Sci.*, Vol. 232, pp. 1212–1221.
18. El Mehtedi, M., Buonadonna, P., Loi, G. et al. (2024), «Surface Quality Related to Face Milling Parameters in 3D Printed Carbon Fiber-Reinforced PETG», *J. Compos. Sci.*, Vol. 8.
19. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M.K.A. and Ismail, M.I.S. (2020), «Effects of CNC Machining on Surface Roughness in Fused Deposition Modelling (FDM) Products», *Materials*, Vol. 13.
20. Tomal, A.N.M.A., Saleh, T. and Khan, M.R. (2018), «Combination of Fused Deposition Modelling with Abrasive Milling for Attaining Higher Dimensional Accuracy and Better Surface Finish», *IJUM Eng. J.*, Vol. 19, pp. 221–231.
21. Kadhum, A.H., Al-Zubaidi, S. and Abdulkareem, S.S. (2023), «Effect of the Infill Patterns on the Mechanical and Surface Characteristics of 3D Printing of PLA, PLA+ and PETG Materials», *ChemEngineering*, Vol. 7.
22. Mani, M., Karthikeyan, A.G., Kalaiselvan, K. et al. (2022), «Optimization of FDM 3-D Printer Process Parameters for Surface Roughness and Mechanical Properties Using PLA Material», *Mater. Today Proc.*, Vol. 66, pp. 1926–1931.
23. Ferreira, I., Madureira, R., Villa, S. et al. (2020), «Machinability of PA12 and Short Fibre-Reinforced PA12 Materials Produced by Fused Filament Fabrication», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 107, pp. 885–903.
24. El Mehtedi, M., Buonadonna, P., El Mohtadi, R. et al. (2024), «Optimizing Milling Parameters for Enhanced Machinability of 3D-Printed Materials: An Analysis of PLA, PETG, and Carbon-Fiber-Reinforced PETG», *JMMP*, Vol. 8.
25. Guo, C., Liu, X. and Liu, G. (2021), «Surface Finishing of FDM-Fabricated Amorphous Polyetheretherketone and Its Carbon-Fiber-Reinforced Composite by Dry Milling», *Polymers*, Vol. 13.
26. Boschetto, A., Bottini, L. and Veniali, F. (2016), «Finishing of Fused Deposition Modeling Parts by CNC Machining», *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, Vol. 41, pp. 92–101.
27. Jiang, G., Yang, T., Xu, J. et al. (2020), «Investigation into Hydroxypropyl-Methylcellulose-Reinforced Polylactide Composites for Fused Deposition Modelling», *Ind. Crops Prod.*, Vol. 146.
28. Kamer, M.S. and Uzay, Ç. (2024), «Investigation of The Effect of CNC Milling Cutting Process on The Tensile Test of PLA Samples Produced Using Two Different 3D Printers with The FDM Method», *Derg. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Derg.*, Vol. 39, pp. 599–608.
29. Chen, Y., Ye, L., Kinloch, A.J. and Zhang, Y.X. (2023), «D Printed Carbon-Fibre Reinforced Composite Lattice Structures with Good Thermal-Dimensional Stability», *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 227.
30. El Mehtedi, M., Buonadonna, P., Carta, M. et al. (2023), «Effects of Milling Parameters on Roughness and Burr Formation in 3D-Printed PLA Components», *Procedia Comput. Sci.*, Vol. 217, pp. 1560–1569.

Орел Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, докторант Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8775-3253>.

Наукові інтереси:

- адитивні технології;
- обробка композиційних матеріалів.

Orel V.M.

Ensuring the surface quality parameters of products manufactured using additive processes during face milling

This article investigates the patterns governing the formation of surface layer quality parameters in products manufactured using additive processes, specifically the FDM method, during their mechanical post-processing by face milling. The influence of cutting conditions (rotational speed, feed rate, cutting depth), as well as printing parameters (layer thickness, build orientation, fill density) on the formation of surface micro-relief and roughness values is examined. The peculiarities of machining polymeric materials with an anisotropic and porous structure, characteristic of additive manufacturing, are analysed, taking into account the risks of delamination, thermal softening and defect formation. Based on experimental studies, dependencies of surface roughness parameters on machining conditions and the cutting direction relative to the material layers have been obtained. A mathematical model of surface roughness formation has been developed, taking into account the main technological factors of the milling process. It has been established that feed rate has the dominant influence on surface quality, whilst increasing the rotational speed within the permissible range contributes to the stabilisation of the cutting process. It is shown that machining perpendicular to the layers leads to increased roughness due to the intensification of interlayer deformations. Rational face milling parameters are proposed, which ensure minimum roughness values whilst preserving the structural integrity of the material. The results obtained can be used to optimise the post-processing of additive-manufactured products and improve their performance characteristics.

Keywords: additive manufacturing; FDM; face milling; surface roughness; post-processing; cutting parameters; surface layer.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026.