

СІНЬКОВСЬКИЙ РОМАН

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-3506-0260>e-mail: rsinkovskyi@khmnu.edu.ua**ТКАЧУК ВІТАЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>e-mail: tkachukv.p@gmail.com

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ FDM, ШЛЯХОМ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

У статті розглянуто сучасний стан та перспективи забезпечення якості деталей, виготовлених методом FDM (Fused Deposition Modeling), із застосуванням механічного оброблення як ефективного способу постоброблення. Проаналізовано основні фактори, що впливають на формування якості поверхні та точності FDM-деталей, зокрема параметри друку, анізотропію структури матеріалу та технологічні особливості процесу адитивного формування. На основі аналізу сучасних наукових публікацій встановлено, що механічне оброблення (фрезерування, точіння, шліфування) дозволяє суттєво підвищити точність геометричних параметрів і знизити шорсткість поверхні виробів, виготовлених із термопластів. Розглянуто особливості оброблюваності полімерних матеріалів, отриманих методом FDM, та визначено основні підходи до вибору інструменту і режимів різання. Окреслено перспективні напрями досліджень, пов'язані з інтеграцією адитивних і субтрактивних технологій, оптимізацією параметрів оброблення та застосуванням композитних матеріалів. Отримані результати можуть бути використані при розробленні технологічних процесів виготовлення високоточних деталей у сучасному машинобудуванні.

Ключові слова: FDM, адитивні технології, 3D-друк, полімерні матеріали, механічна постобробка, CAD/CAM/CAE технології.

SINKOVSKYY ROMAN, TKACHUK VITALIY

Khmelnitskyi National University

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF TECHNOLOGICAL QUALITY ASSURANCE OF FDM PARTS BY MEANS OF MACHINING

The paper considers the current state and prospects of quality assurance of parts manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) using machining as an effective post-processing method. The relevance of the study is driven by the transition of additive manufacturing from rapid prototyping to the production of functional mechanical components, which requires achieving high precision (IT7–IT9) and low surface roughness (R_a 0.8–1.6 μm) that FDM printing alone cannot provide. The main factors influencing the surface quality and dimensional accuracy of FDM parts are analyzed, including printing parameters, material anisotropy, and the specific mesostructure of thermoplastics.

The research methodology is based on a systematic analysis of the cutting mechanics of polymer structures, specifically PETG. A significant scientific problem identified is the occurrence of elastic recovery (elastic deflection) of the workpiece during milling.

The study proposes a comprehensive three-level compensation system to overcome these errors. The first level involves technological optimization of machining allowances (0.4–0.6 mm) to ensure the tool operates within the solid material body. The second level focuses on tool geometry stabilization, recommending mills with sharp cutting edges and high rake angles to transition the process into the pure cutting zone. The third, and most innovative level, is the algorithmic digital compensation of CNC toolpaths. This approach accounts for the variable local stiffness of the part, which depends on the internal infill patterns (grid, gyroid, honeycomb).

The results demonstrate that implementing digital trajectory correction allows for the compensation of elastic recovery, ensuring stable quality in hybrid manufacturing. The obtained results can be directly applied in the development of technological processes for manufacturing high-precision components in modern mechanical engineering, such as aerospace parts and unmanned aerial vehicle (UAV) drive systems.

Keywords: FDM, additive manufacturing, 3D printing, polymer materials, mechanical post-processing, CAD/CAM/CAE technologies.

Стаття надійшла до редакції / Received 23.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Сіньковський Роман, Ткачук Віталій

Вступ

Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується переходом до концепції Industry 4.0, де особливе місце посідають адитивні технології (АТ). Серед різноманітних методів АТ, моделювання методом пошарового наплавлення (FDM/FFF) є найбільш розповсюдженим завдяки низькій вартості обладнання, широкому спектру конструкційних термопластів (ABS, PETG, PLA, Carbon-filled Nylon) та можливості створення геометрій з внутрішніми порожнинами, недоступними для традиційних методів.

Проте, незважаючи на значний прогрес, FDM-друк все ще стикається з фундаментальною проблемою – невідповідністю якості поверхні та геометричної точності вимогам прецизійного машинобудування (класи точності IT12 та вище). Для більшості функціональних деталей, що працюють у рухомих з'єднаннях або потребують герметичності, шорсткість поверхні після друку (R_a 12.5–50 мкм) є критично високою. Це зумовлює

виникнення парадигми «Гібридного виробництва» (Hybrid Manufacturing), яка поєднає свободу дизайну адитивних методів із прецизійністю субтрактивної обробки на верстатах з ЧПК.

Сучасний розвиток адитивних технологій, зокрема методу FDM (Fused Deposition Modeling), зумовлює їх широке впровадження у машинобудуванні для виготовлення різноманітних деталей машин та механізмів. Водночас технологічні особливості процесу FDM, зокрема пошарове формування деталей, обмежена точність позиціонування та анізотропія властивостей екструзійних матеріалів, призводить до недостатнього рівня якості поверхні, точності геометричних параметрів і фізико-механічних характеристик отриманих деталей.

У більшості випадків деталі, виготовлені методом FDM, не відповідають вимогам до експлуатаційної точності та якості, що обмежує можливість їх використання у відповідальних вузлах машин і механізмів. Це зумовлює необхідність застосування додаткових технологічних операцій постоброблення. Серед існуючих методів підвищення якості особливе місце займає механічне оброблення, яке дозволяє забезпечити задані параметри точності та шорсткості поверхні.

Разом з тим, оброблення полімерних матеріалів, отриманих методом FDM, має низку специфічних особливостей, пов'язаних з їхньою структурною неоднорідністю, низькою теплопровідністю та чутливістю до теплових і механічних навантажень. Це ускладнює вибір інструменту, режимів різання та побудову ефективних технологічних процесів.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є дослідження та узагальнення сучасних підходів до забезпечення якості FDM-деталей шляхом механічного оброблення, а також визначення перспектив розвитку інтегрованих адитивно-субтрактивних технологій у сучасному машинобудуванні.

Метою статті є дослідження теоретичних основ та практичного досвіду технологічного забезпечення якості деталей, виготовлених методом FDM, із застосуванням механічного оброблення.

Об'єкт дослідження — процес забезпечення якості деталей, виготовлених методом FDM, на етапах адитивного формоутворення та подальшого механічного оброблення.

Предмет дослідження — методи та технологічні підходи до підвищення якості FDM-деталей, зокрема шляхом вибору інструменту, режимів різання та інтеграції адитивних і субтрактивних технологій у єдиний технологічний процес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі Andrea Boschetto та Luca Bottini [1] досліджено закономірності формування геометричної точності та якості поверхні виробів, отриманих методом FDM. Автори зазначають, що ключовим джерелом похибок є дискретний характер пошарового формування, який зумовлює виникнення так званого ефекту «схдинковості». На відповідних ілюстраціях статті демонструється апроксимація криволінійної або нахиленої поверхні послідовністю шарів фіксованої товщини, внаслідок чого реальний контур замінюється ступінчастим профілем. Це призводить до появи систематичної похибки форми, величина якої залежить від кута нахилу поверхні та товщини шару. Чим більша товщина шару і менший кут нахилу до горизонталі, тим більш вираженою є схдинковість і, відповідно, вища шорсткість поверхні.

У роботі також наведено графічні залежності, що ілюструють вплив товщини шару на параметри шорсткості поверхні. Показано, що зі зменшенням товщини шару відбувається суттєве зниження параметрів R_a і R_z , однак це супроводжується збільшенням часу виготовлення. Таким чином, товщина шару розглядається як один із основних керованих параметрів, який визначає компроміс між продуктивністю процесу та якістю поверхні. Ілюстрації в статті демонструють характерне зменшення амплітуди нерівностей профілю при переході до менших значень товщини шару, що підтверджує експериментальні результати.

Суттєву увагу автори приділяють впливу орієнтації деталі у робочому просторі. На відповідних схемах показано, що орієнтація визначає як напрям накопичення похибок, так і характер формування поверхонь. При вертикальному нарощуванні вздовж осі Z похибки мають тенденцію до накопичення внаслідок похибок позиціонування та термодеомацій, тоді як у площині XY точність є вищою через більш стабільну кінематику переміщення інструменту. Ілюстрації демонструють різні варіанти орієнтації однієї і тієї ж деталі та відповідні відмінності у якості поверхонь і точності розмірів, що дозволяє обґрунтувати вибір оптимального положення моделі ще на етапі підготовки до друку.

Крім того, у статті розглянуто вплив параметрів екструзії, зокрема швидкості подачі матеріалу та швидкості переміщення сопла. На наведених схемах і прикладах дефектів показано, що відхилення від оптимальних режимів призводять до появи характерних дефектів формування, таких як напливи матеріалу, пористість або розриви між шарами. Це безпосередньо впливає як на геометричну точність, так і на якість поверхні виробів.

Узагальнюючи результати, автори пропонують підхід до прогнозування точності, який базується на врахуванні геометрії деталі, товщини шару та орієнтації поверхонь. Відповідні аналітичні та графічні моделі дозволяють оцінити величину відхилень ще до початку виготовлення, що створює передумови для оптимізації параметрів процесу та підвищення точності виробів без додаткових експериментів. Отримані результати мають важливе значення для подальшого розвитку комбінованих технологій, зокрема поєднання адитивного формування з механічною обробкою, що дозволяє компенсувати притаманні FDM обмеження точності та забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики деталей.

У роботі Galantucci L.M., Lavecchia F., Percoco G. [2] наведено результати експериментального дослідження, спрямованого на підвищення якості поверхні деталей, виготовлених методом FDM. Авторами

встановлено, що основною причиною низької якості поверхні є ефект пошарового формоутворення, який призводить до виникнення характерної хвилястості та нерівностей. У дослідженні проведено кількісну оцінку шорсткості поверхні до та після застосування різних методів постоброблення.

Отримані результати показали, що використання додаткових технологічних операцій дозволяє суттєво знизити значення параметра шорсткості та підвищити рівень геометричної точності деталей. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу ефективності різних підходів до оброблення, що дозволило визначити найбільш доцільні методи для полімерних матеріалів, виготовлених методом FDM.

Водночас у роботі наголошується, що ефективність постоброблення значною мірою залежить від вихідних параметрів друку, зокрема товщини шару та орієнтації моделі. Це свідчить про необхідність комплексного підходу до забезпечення якості, який передбачає поєднання оптимізації параметрів адитивного формоутворення та застосування механічного оброблення.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання механічного оброблення як одного з найбільш ефективних способів підвищення якості поверхні FDM-деталей та формують основу для подальших досліджень у напрямі інтеграції адитивних і субтрактивних технологій.

У роботі Boschetto A., Bottini L. [3] досліджено можливості підвищення якості поверхні деталей, виготовлених методом FDM, шляхом застосування віброабразивного оброблення (*barrel finishing*). Авторами встановлено, що характерна для FDM-процесу шорсткість поверхні, обумовлена пошаровим формоутворенням, може бути суттєво знижена за рахунок абразивного впливу на поверхню деталі у середовищі обертового барабана.

У дослідженні проведено експериментальну оцінку впливу тривалості оброблення, типу абразивного середовища та режимів процесу на параметри шорсткості поверхні. Встановлено, що зі збільшенням часу оброблення спостерігається значне зменшення висоти мікронерівностей, що підтверджується зниженням параметрів Ra та Rz . При цьому ефективність процесу залежить від геометрії деталі, початкової якості поверхні та фізико-механічних властивостей матеріалу.

Авторами також відзначено, що віброабразивне оброблення є особливо ефективним для деталей складної форми, де застосування традиційних методів механічної обробки є ускладненим або економічно недоцільним. Разом з тим, надмірна тривалість процесу може призводити до часткової втрати геометричної точності та згладжування функціональних елементів, що потребує оптимізації режимів оброблення.

Таким чином, результати дослідження підтверджують ефективність віброабразивного оброблення як одного з перспективних методів постобробки FDM-деталей, що дозволяє суттєво покращити якість поверхні при збереженні прийнятної рівня точності.

У роботі Camposeco-Negrete C. [4] досліджено питання оптимізації параметрів різання при механічному обробленні деталей, виготовлених методом FDM. Основну увагу приділено визначенню впливу режимів оброблення, зокрема швидкості різання, подачі та глибини різання, на показники якості поверхні та стабільність процесу різання полімерних матеріалів.

Автором застосовано методи статистичного планування експерименту та багатокритеріальної оптимізації для встановлення раціональних режимів оброблення. У результаті дослідження визначено, що параметри різання мають суттєвий вплив на формування шорсткості поверхні, причому найбільш значущим фактором є подача, яка безпосередньо визначає висоту мікронерівностей.

Отримані результати свідчать, що оптимізація режимів оброблення дозволяє досягти значного зниження параметрів шорсткості поверхні при одночасному забезпеченні стабільності процесу різання та зменшенні ймовірності виникнення дефектів, пов'язаних із перегрівом або деформацією матеріалу. Встановлено також, що особливості структури FDM-деталей, зокрема їх анізотропія та шарувата будова, обумовлюють необхідність адаптації традиційних підходів до вибору режимів різання.

Таким чином, результати дослідження підтверджують важливість науково обґрунтованого вибору параметрів механічного оброблення для забезпечення високої якості поверхні FDM-деталей та створюють передумови для інтеграції адитивних і субтрактивних технологій у єдину технологічну систему.

Актуальність дослідження

Сучасний розвиток машинобудування характеризується активним впровадженням адитивних технологій, зокрема методу FDM (*Fused Deposition Modeling*), що забезпечує високу гнучкість виробництва та можливість виготовлення складних за геометрією деталей. Разом із тим, технологічні обмеження процесу FDM, зокрема пошарове формоутворення, обумовлюють недостатній рівень точності та якості поверхні виготовлених виробів, що обмежує їх використання у відповідальних вузлах машин і механізмів.

Забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик FDM-деталей вимагає застосування ефективних методів постоброблення. Серед них механічне оброблення є одним із найбільш універсальних і технологічно доцільних підходів, що дозволяє досягти заданих параметрів точності та шорсткості поверхні. Водночас особливості структури матеріалів, отриманих методом FDM, зокрема їх анізотропія, неоднорідність та низька теплопровідність, ускладнюють процес оброблення та потребують адаптації традиційних технологічних рішень.

Крім того, сучасні тенденції розвитку виробництва орієнтовані на інтеграцію адитивних і субтрактивних технологій у єдині гібридні процеси, що дозволяє підвищити ефективність виготовлення деталей та забезпечити

стабільно високий рівень якості. Проте на сьогодні недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного технологічного забезпечення якості FDM-деталей із урахуванням взаємного впливу параметрів адитивного формоутворення та механічного оброблення.

Таким чином, дослідження сучасного стану та перспектив технологічного забезпечення якості деталей, виготовлених методом FDM із застосуванням механічного оброблення, є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності та конкурентоспроможності сучасного машинобудівного виробництва.

Виклад основного матеріалу

Однією з ключових проблем адитивного виготовлення деталей методом FDM є недостатній рівень якості поверхні та точності, обумовлений пошаровим характером формоутворення. Для досягнення експлуатаційних характеристик виробів широко застосовуються різні методи постоброблення, які можна умовно поділити на механічні, фізико-хімічні та комбіновані.

До механічних методів належать фрезерування, точіння, шліфування, полірування, а також віброабразивне оброблення. Ці методи забезпечують зменшення шорсткості поверхні, підвищення точності геометричних параметрів та усунення дефектів, пов'язаних із ефектом «сходінковості». Зокрема, застосування віброабразивного оброблення дозволяє ефективно обробляти деталі складної форми, забезпечуючи рівномірне згладжування поверхні [3, 5]. Водночас традиційні методи різання, такі як фрезерування та точіння, дають можливість досягти високої точності, однак потребують врахування особливостей оброблюваності полімерних матеріалів [2, 4].

Фізико-хімічні методи постоброблення включають оброблення розчинниками, термічне згладжування, лазерне та плазмове оброблення. Хімічне оброблення дозволяє зменшити мікронерівності за рахунок часткового розчинення поверхневого шару матеріалу, що особливо ефективно для ABS та подібних термопластів. Однак такі методи мають обмеження, пов'язані з контролем геометричної точності, можливістю деформації виробів та екологічними аспектами застосування реагентів.

Комбіновані методи передбачають поєднання декількох способів постоброблення з метою досягнення оптимального результату. Наприклад, попереднє механічне оброблення з подальшим поліруванням або хімічного оброблення дозволяє забезпечити як високу точність, так і низьку шорсткість поверхні. Такий підхід є перспективним для виготовлення функціональних деталей, що працюють в умовах підвищених вимог до якості.

Аналіз сучасних досліджень показує, що вибір методу постоброблення залежить від матеріалу, геометрії деталі, вимог до точності та шорсткості, а також економічної доцільності. При цьому механічне оброблення залишається одним із найбільш універсальних і ефективних методів забезпечення якості FDM-деталей, особливо у випадках, коли необхідно досягти високої точності та стабільності розмірів.

Таким чином, для забезпечення високого рівня якості FDM-деталей доцільним є застосування комплексного підходу до постоброблення, що поєднує різні методи з урахуванням технологічних особливостей матеріалу та умов експлуатації виробу.

Основна наукова проблема використання FDM-технології у точному машинобудуванні полягає у дискретному характері формування об'єму деталі. На відміну від ізотропних матеріалів, FDM-вироби мають мезоструктурну неоднорідність, що породжує низку викликів:

- внутрішні напруження, що виникають під час швидкого охолодження термопласту, призводять до жолоблення та відхилень від заданої форми. Дослідження показують, що похибка форми може сягати 0.2–0.5 мм на 100 мм довжини заготовки, що вимагає значних припусків [5].
- сходінковий дефект, який визначається висотою шару (h). Навіть при використанні прецизійних сопел шорсткість R_a після друку коливається в межах 12.5–50 мкм, що виключає роботу деталі у вузлах тертя без постоброблення [2, 4].
- наявність повітряних каверн (порожнин) між нитками наплавлення спричиняє переривчастий характер контакту інструменту з матеріалом, що в свою чергу генерує автоколивання, які негативно впливають на стійкість інструменту та якість фінішної поверхні [5].

Аналіз специфіки оброблюваності анізотропних FDM-структур

Опір матеріалу різанню (P_z) у FDM-структурах не є константою. При фрезеруванні вздовж напрямку укладання ниток (кут растра 0°) спостерігається найменша сила різання, проте виникає ризик міжшарового розшарування. Оптимальним з точки зору стабільності процесу є фрезерування під кутом $45^\circ/-45^\circ$ або перпендикулярно до шарів, де сусідні нитки створюють ефект взаємної підтримки [3, 5].

Через низький модуль повздовжньої пружності ($E \approx 2 \div 3$ ГПа) термопластів, під дією радіальної сили різання заготовка зазнає пружного відтиску. Експериментальні дані (рисунок С5, С6 у [5]) показують, що величина пружної деформації Δl може сягати 0.05 – 0.15 мм при чорновому фрезеруванні з глибиною $t = 1.0$ мм. Це зумовлює необхідність призначення припусків за принципом $Z_{min} > \Delta l + R_{zmax}$.

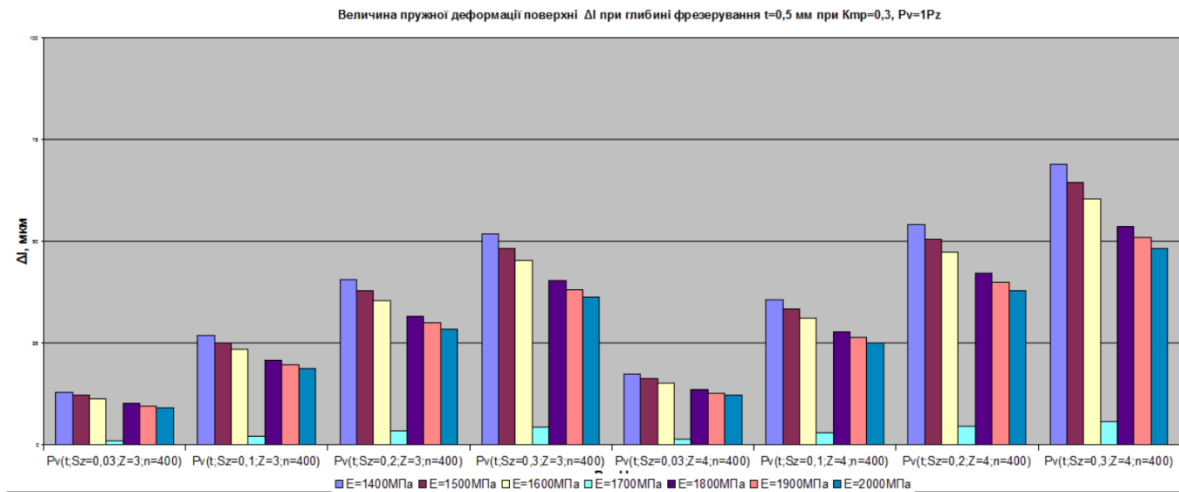


Рисунок 1 - Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки Δl при чорновому фрезеруванні при $t = 0.5$ мм з різними подачами S_z та обертами фрези n при змінному модулі поздовжньої пружності E при кількості зібців фрези $Z = 3$ та $Z = 4$ ($K_{mp} = 0,3$; $P_v = P_z$) [5]

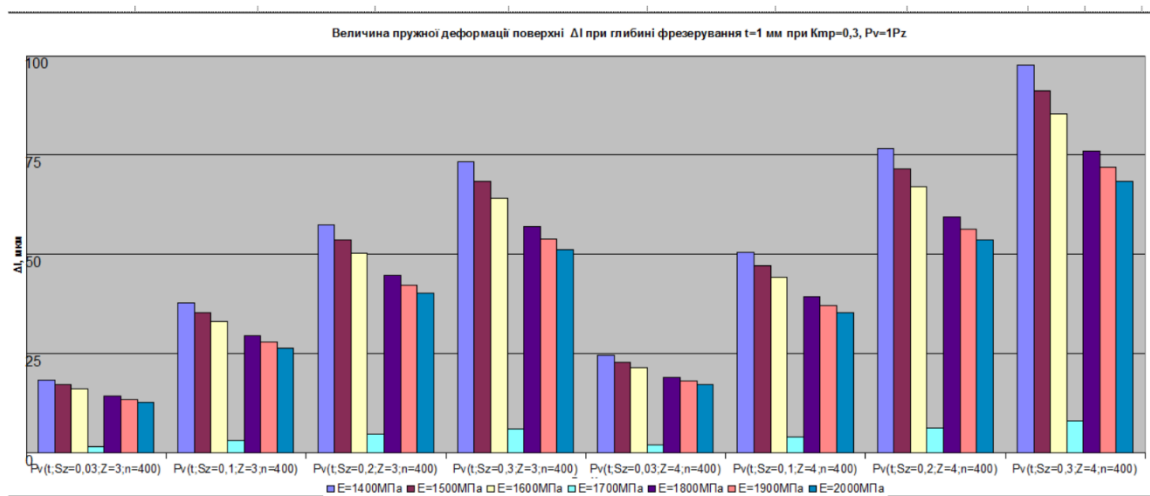


Рисунок 2 - Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки Δl при чорновому фрезеруванні при $t = 1$ мм з різними подачами S_z та обертами фрези n при змінному модулі поздовжньої пружності E при кількості зібців фрези $Z = 3$ та $Z = 4$ ($K_{mp} = 0,3$; $P_v = P_z$) [5]

Таблиця 1

Режими різання та досяжна якість (узагальнено за [5, 6])

Стан поверхні	Режими (n , об/хв; s , мм/хв)	Шорсткість R_a , мкм	Квалітет точності
Після FDM-друку	-	15.0 – 40.0	IT12 – IT14
Після чорнового фрезерування	$n = 1600$; $s = 400$	3.2 – 6.3	IT10 – IT11
Після чистового фрезерування	$n = 2240$; $s = 125$	0.8 – 1.6	IT7 – IT9

Фізико-хімічні та технологічні особливості PETG у контексті різання

PETG є аморфним полімером з температурою склування $T_g \approx 75 - 80^\circ\text{C}$. Через низьку теплопровідність ($0.2 - 0.3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) теплота різання акумулюється в зоні контакту. Перевищення порогу T_g призводить до переходу матеріалу у високоеластичний стан, що викликає "намазування" пластику на фрезу [5]. Тепловізійні дослідження підтверджують, що при $n = 2240$ об/хв температура становить $\sim 71^\circ\text{C}$, що є критично близьким до межі деформації [5].

Висока адгезія здатність PETG вимагає використання інструменту з полірованою передньою поверхнею ($R_a < 0.2 \text{ мкм}$). Рекомендована геометрія: передній кут $\gamma = 15^\circ \div 20^\circ$, радіус округлення кромки $\rho \leq 5 \text{ мкм}$ [5].

Висновки

Традиційний FDM-друк не забезпечує точності вище IT12 та шорсткості $R_a < 12.5 \text{ мкм}$, що робить механічну лезову обробку на верстатах з ЧПК найбільш ефективним методом отримання функціональних поверхонь у гібридному циклі виробництва.

PETG, як об'єкт обробки, має високу в'язкість та низьку температуру скловання ($\approx 80^\circ \text{C}$), що при неправильному виборі режимів (V, S) призводить до адгезійного налипання на інструмент та термічної деградації заготовки.

Встановлено, що ключовим фактором, який впливає на силу різання та ризик деламінації (розшарування), є кут між вектором подачі інструмента та напрямком укладання ниток пластику. Цей параметр потребує детального математичного опису в моделях шорсткості.

Для стабільного процесу різання PETG необхідно використовувати твердосплавні фрези з полірованими канавками та геометрією, що забезпечує позитивні кути різання, для мінімізації тертя та ефективного винесення тепла зі стружкою.

Незважаючи на значні успіхи у вивченні загальної оброблюваності [5, 6], залишається невирішеним питання синергетичного впливу внутрішньої архітектури та параметрів ЧПК-обробки. Існуючі моделі не враховують змінну жорсткість деталі при переході інструменту від суцільної оболонки до розрідженого заповнення.

Відсутність інтегрованої математичної моделі, яка б описувала взаємозв'язок параметрів адитивного формування (висота шару, орієнтація, щільність заповнення) та параметрів субтрактивного оброблення на формування вихідної шорсткості та точності.

Література

1. Boschetto A., Bottini L. Accuracy prediction in fused deposition modeling // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 73. P. 913–928.
2. Galantucci L.M., Lavecchia F., Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 58, No. 1. P. 189–192. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.071
3. Boschetto A., Bottini L. Surface improvement of fused deposition modeling parts by barrel finishing // *Rapid Prototyping Journal*. 2015. Vol. 21, No. 6. P. 686–696. DOI: 10.1108/RPJ-11-2014-0147
4. Camposeco-Negrete C. Optimization of cutting parameters in machining of FDM parts // *Measurement*. 2020. Vol. 157. Article 107664.
5. Кушнірчук А. С. Технологічне забезпечення якості деталей машин, отриманих з пластмас методом 3D-друку: дис. д-ра філос.: 131 Прикладна механіка. Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2025. 174 с.
6. Improving the surface quality of additive manufactured polyamide parts using conventional treatment methods // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 132, No. 5–6. P. 1–12. DOI: 10.1007/s00170-024-13279-3

References

1. Boschetto A., Bottini L. Accuracy prediction in fused deposition modeling // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 73. P. 913–928.
2. Galantucci L.M., Lavecchia F., Percoco G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 58, No. 1. P. 189–192. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.071
3. Boschetto A., Bottini L. Surface improvement of fused deposition modeling parts by barrel finishing // *Rapid Prototyping Journal*. 2015. Vol. 21, No. 6. P. 686–696. DOI: 10.1108/RPJ-11-2014-0147
4. Camposeco-Negrete C. Optimization of cutting parameters in machining of FDM parts // *Measurement*. 2020. Vol. 157. Article 107664.
5. Technological support of quality of machine parts manufactured from plastics by 3D printing: PhD thesis: 131 Applied Mechanics. Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2025. 174 p.
6. Improving the surface quality of additive manufactured polyamide parts using conventional treatment methods // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 132, No. 5–6. P. 1–12. DOI: 10.1007/s00170-024-13279-3