УДК 621.397:004.076.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.24

В. М. ОРЕЛ
кандидат технічних наук,
докторант кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0002-8775-3253

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА В ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМАХ

У даній роботі наведено результати аналізу науково-літературних джерел та існуючих технологій механічної обробки деталей, виготовлених методом адитивного виробництва, зокрема моделювання плавленим осадженням (FDM). Недостатня якість поверхні та низька точність геометричних розмірів є одними з ключових проблем, що обмежують застосування 3D-друкованих компонентів у високотехнологічних галузях, Тому розробка ефективних методів постобробки є актуальним напрямом для інтеграції адитивного виробництва в інженерні системи. Механічна обробка (фрезерування, точіння, шліфування) розглядається як перспективний підхід для вирішення цієї проблеми, оскільки дозволяє значно підвищити точність розмірів, якість поверхні та покращити такі функціональні характеристики, як зносостійкість і втомна міцність. Встановлено, що процес механічної обробки FDM-виробів має суттєві особливості, пов'язані з їхньою шаруватою структурою та анізотропією механічних властивостей. На відміну від суцільних матеріалів, у 3D-друкованих деталях найслабшим місцем є міжшарові з'єднання, що створює ризик розшарування (деламінації) під дією ріжучого інструменту, особливо при обробці перпендикулярно до шарів. Іншими важливими факторами є концентрація напружень у вузлах контакту між волокнами та тепловий вплив, який може ослаблювати адгезійні зв'язки. Існуючі альтернативні методи, як-от хімічне згладжування, хоча й ефективні для покращення поверхні, можуть призводити до значного (32–35 %) зниження міцності деталей. Згідно з проведеним аналізом, для забезпечення прогнозованої якості обробки та збереження цілісності виробу запропоновано підхід, що базується на математичному моделюванні процесу лезового різання. Модель враховує шарувату структуру матеріалу, сили міжшарової адгезії, розподіл нормальних та зсувних напружень, а також температурну залежність міцності з'єднань. Вибір оптимальних параметрів обробки (подача, глибина різання, швидкість) має ґрунтуватися на умові, за якої напруження зрізу матеріалу не перевищуватимуть міцність міжшарових зв'язків, що дозволить уникнути дефектів та забезпечити надійність кінцевого продукту.

Ключові слова: *адитивне виробництво, FDM, механічна обробка, якість поверхні, шорсткість, міжшарова адгезія, концентрація напружень, розшарування.*

V. M. OREL
PhD of Technical Sciences,
Doctoral Student at the Department of Mechanical Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0002-8775-3253

ANALYSIS OF MECHANICAL PROCESSING TECHNOLOGIES FOR ADDITIVE MANUFACTURING PARTS IN ENGINEERING SYSTEMS

This paper presents the results of an analysis of scientific and literary sources and existing technologies for the mechanical processing of parts manufactured using additive manufacturing, in particular fused deposition modeling (FDM). Insufficient surface quality and low geometric accuracy are among the key problems limiting the use of 3D-printed components in high-tech industries. Therefore, the development of effective post-processing methods is a relevant direction for the integration of additive manufacturing into engineering systems. Mechanical processing (milling, turning, grinding) is considered a promising approach to solving this problem, as it allows for a significant increase in dimensional accuracy and surface quality, as well as improvements in functional characteristics such as wear resistance and fatigue strength. It has been established that the process of mechanical processing of FDM products has significant features related to their layered structure and anisotropy of mechanical properties. Unlike solid materials, the weakest point in 3D-printed parts is the interlayer connections, which creates a risk of delamination under the action of a cutting tool, especially when machining perpendicular to the layers. Other important factors are stress concentration at the contact points between fibers and thermal effects, which can weaken adhesive bonds. Existing alternative methods, such as chemical smoothing, although effective for improving the surface, can lead to a significant (32–35 %) reduction in the strength of parts. According to the analysis, an approach based on mathematical modeling of the blade cutting process

© Орел В. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

is proposed to ensure the predicted quality of processing and preserve the integrity of the product. The model takes into account the layered structure of the material, interlayer adhesion forces, the distribution of normal and shear stresses, as well as the temperature dependence of the strength of the joints. The selection of optimal processing parameters (feed, cutting depth, speed) should be based on the condition that the shear stress of the material does not exceed the strength of the interlayer bonds, which will avoid defects and ensure the reliability of the final product.

Key words: *additive manufacturing, FDM, machining, surface quality, roughness, interlayer adhesion, stress concentration, delamination.*

Постановка проблеми

Механічна обробка виробів інженерного призначення виготовлених методом моделювання плавленим осадженням (FDM) (Рис. 1) є необхідною частиною адитивного виробництва для забезпечення встановлених показників якості поверхні, точності геометричних розмірів 3D-надрукованих компонентів. FDM – це широко використовуваний метод адитивного виробництва; в ньому об’єкти створюються шляхом нанесення термопластичних матеріалів пошарово з екструдера – результатом цього можуть бути шарувата структура виробу. Одним з шляхів отримання виробу необхідної якості поверхонь є використання методів механічної обробки (фрезерування, точіння, шліфування або свердлування). Це сприяло зменшення розриву між адитивним виробництвом та традиційними методами виготовлення [1], [2].

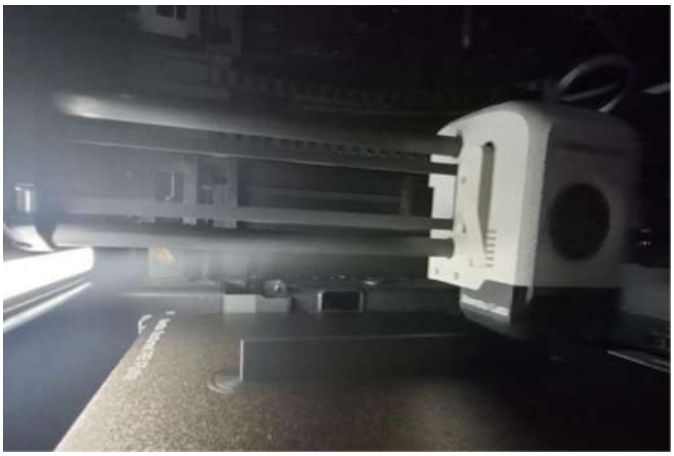

Рис. 1. Процес FDM друку

Значення механічного оброблення в технологіях FDM полягають у їх здатності вирішувати проблеми якості та розмірів поверхні, які можуть заважати використанню деталей 3D-друку у різних сферах промисловості. Галузі такі як аерокосмічна (рис. 2), автомобільна та медична індустрія все більше спираються на FDM-технологію для створення високоефективних компонентів для досягнення високих стандартів якості [3] [4].

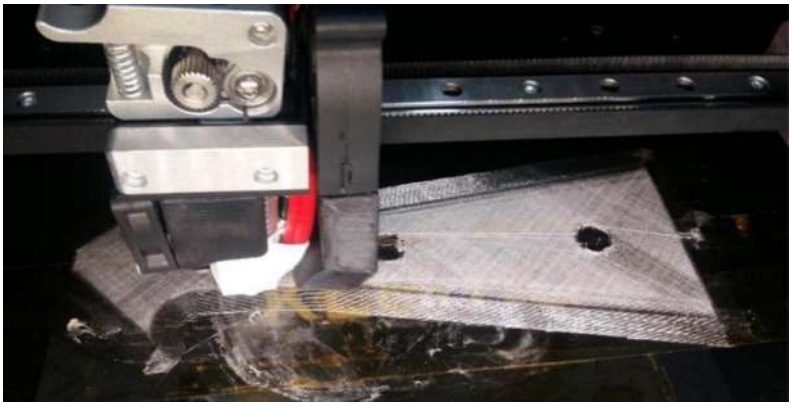

Рис. 2. Друк оснащення для аерокосмічного виробництва

Механічне оброблення не тільки підвищують поверхневу якість виробу, але й підвищують функціональні характеристики, такі як зносостійкість і втомна міцність, що робить оброблені FDM деталі придатними для складних застосувань [5].

Механічна обробка надає численні переваги, але водночас створює проблеми, з якими виробники повинні враховувати. Такі проблеми, як знос інструменту, складність програмування та витрати на технічне обслуговування, можуть ускладнити ефективність та результативність операцій обробки. Крім того, вибір матеріалів суттєво впливає на якість механічної обробки, що вимагає від виробників врахування цих факторів в технологічних процесах [6], [7].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз сучасних технологій обробки деталей виготовлених адитивних методів з урахуванням щільності структури та взаємодії між різними шарами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

FDM – одна з найпоширеніших технологій адитивного виробництва, визнана завдяки широкому вибору матеріалів, точності друку, повторюваності та довговічності. Процес включає екструзію термопластичних полімерів через нагріте сопло, де матеріал наноситься шар за шаром, створюючи тривимірний об'єкт. Ця технологія зробила революцію дозволивши виробляти деталі, які мають механічні властивості, подібні до тих, що виготовляються традиційними методами, такими як лиття під тиском, особливо з таких матеріалів, як ULTEM, Antero та Nylon 12 CF [8] [9]. Здатність виготовляти високопродуктивні деталі робить її придатною для застосування в широкому діапазоні – від компонентів інтер'єру літаків до промислових пристосувань і пристроїв. Універсальність матеріалів, що використовуються в FDM, дозволяє виробникам досягати бажаних механічних властивостей і адаптувати компоненти до конкретних потреб. Наприклад, компанія, що виробляє медичне обладнання, може використовувати FDM для створення індивідуальних протезів, оптимізованих для комфорту пацієнта [10] [11].

FDM має кілька переваг, які сприяють його популярності в сучасному виробництві, а саме.

Економічна ефективність: Використання відносно недорогих термопластичних ниток робить FDM варіантом для створення прототипів і дрібносерійного виробництва. Ця доступність поширюється як на початкові інвестиції, так і на матеріальні витрати [12].

Різноманітність матеріалів: широкий асортимент термопластів, включаючи акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полімолочну кислоту (PLA), поліетилентерефталатгліколь (PETG), а також матеріали інженерного класу, такі як нейлон і полікарбонат, розширює можливості застосування FDM. Спеціалізовані нитки, в тому числі композити, армовані вуглецевим волокном, ще більше розширюють можливості технології [13] [14].

Швидке створення прототипів: FDM дозволяє здійснювати швидкі та індивідуальні конструкції. Процес пошарового осадження зводить до мінімуму потребу в опорних конструкціях, зменшуючи відходи матеріалу і спрощуючи механічну обробку [15] [16].

Виготовлені деталі мають видимі лінії розшарування і потребують механічної обробки для досягнення бажаної якості поверхні. Такі методи, як шліфування та нанесення покриття, можуть покращити зовнішній вигляд, але можуть вимагати значного додаткового часу та ресурсів [17] [18]. Крім того, хоча міцність деталей, виготовлених методом FDM, може бути придатною для багатьох застосувань, вона може не відповідати характеристикам компонентів, виготовлених за допомогою традиційного лиття під тиском, через пористість, притаманну пошаровим структурам [19] [20].

Механічна обробка інженерних деталей, виготовлених методом FDM, необхідна для підвищення загальної продуктивності та якості деталей, які часто мають видимі лінії розшарування та шорсткуваті поверхні відразу після друку (рис. 3).

Рис. 3. Видима шаруватість поверхні друкованого виробу

Механічне полірування – це широко застосовуваний метод обробки поверхні, який використовує абразивні інструменти, такі як полірувальні круги, стрічки або диски. Цей метод ефективно видаляє матеріал з поверхні 3D-друкованої деталі. Процес може виконуватися вручну або за допомогою автоматизованого обладнання, а вибір абразивних матеріалів і параметрів полірування має вирішальне значення для досягнення бажаної якості поверхні [21].

Шліфування – ще один поширений метод постобробки, який використовується для згладжування шорстких поверхонь на 3D-друкованих деталях. Цей метод передбачає використання абразивних матеріалів, для усунення ліній розшарування та дефектів поверхні. Зазвичай процес шліфування починається з грубозернистого інструменту для усунення великих дефектів і переходить до більш дрібної зернистості (рис. 4).

а) б)

Рис. 4. 3-D друкований виріб: а) до шліфування; б) після механічної обробки

Хімічне згладжування особливо корисне для деталей FDM, виготовлених з ABS-пластика. Цей процес передбачає вплив на надруковану деталь розчинника, наприклад, ацетону, який розчиняє зовнішній шар матеріалу, що призводить до більш гладкої поверхні (рис. 5) [22].

Рис. 5. Результат хімічного згладжування 3-D друкованого виробу

Шорсткість поверхні одним з параметрів, який визначає функціональні властивості готових виробів. Аналіз шорсткості розглядається у двох напрямках: уздовж шару та перпендикулярно до шару.

Уздовж шару шорсткість зумовлена нерівномірністю товщини нитки екструзії та її осіданням під час охолодження. Основні фактори, які впливають на цей тип шорсткості:

Товщина шару: Зменшення висоти шару покращує якість поверхні, але збільшує тривалість друку.

Рівність ниток: Неточності в накладанні ниток призводять до появи мікротріщин і проміжків між сусідніми нитками.

Температура екструзії: Оптимальна температура забезпечує краще зчеплення між нитками та мінімізує дефекти.

Швидкість друку: Висока швидкість може спричиняти хвилеподібні нерівності через недостатню стабілізацію матеріалу.

Шорсткість перпендикулярно до шару є результатом ступінчастої структури поверхні, яка виникає через дискретну природу формоутворення. Основні причини:

Висота шару: Чим більша висота шару, тим помітніший «ефект сходинок», особливо на похилих або криволінійних поверхнях.

Кут нахилу поверхні: На поверхнях, розташованих під кутом до осі друку, шорсткість значно вища через більшу відстань між рівнями шарів.

Адгезія між шарами: Недостатня адгезія може спричиняти нерівності та осипання верхніх шарів.

Параметри шорсткості приведені в таблиці.

Таблиця 1

Аналіз показників шорсткості

Напрямок	Висота шару, мм	Показник шорсткості, Ra мкм	Хімічна обробка, Ra мкм	Шліфування, Ra мкм	Різання, Ra мкм
Шорсткість перпендикулярно до шару	0,1	10–15	1–2	2–3,5	3–5
	0,2	20–30	1–2,5	4–6	5–7
	0,3	35–30	2–3	8–10	10–12
Шорсткість уздовж шару	0,1	20–25	1–2,5	2–3,5	3–5
	0,2	40–50	2–3	4–6	5–7
	0,3	60–10	3–5	8–10	10–12

Окрім параметрів шорскості необхідно враховувати значний вплив хімічної обробки на механічні властивості, при тривалому впливі понад 3 години зниження міцності складає 32–35 % від початкових значень.

Для 3D-друкованих деталей часто застосовується обробка з ЧПК для досягнення точної обробки поверхні та дотримання допусків на розміри. Зазвичай використовуються такі методи, як фрезерування, точіння та шліфування. Фрезерування з ЧПК є особливо вигідним для створення складних елементів, таких як отвори та кишені, тоді як токарні операції вдосконалюють циліндричні компоненти [23].

Гібридні виробничі процеси поєднують 3D-друк з обробкою з ЧПУ для підвищення гнучкості дизайну та ефективності виробництва. Цей метод починається з 3D-друку полімерного базового шару, за яким слідує механічна обробка з ЧПК для доопрацювання деталі. Такий підхід не лише прискорює виробництво, але й дозволяє створювати складні геометричні форми, яких важко досягти лише традиційними методами.

Механічні властивості матеріалу, що розрізається, відіграють важливу роль у якості процесу різання. Наприклад, товщина і деформаційні характеристики впливають на те, як вони реагують на техніку різання. Використання правильної висоти ріжучої кромки та підтримання оптимальної швидкості машини мають вирішальне значення для мінімізації утворення задирок і забезпечення чистоти різу [24]. Крім того, такі фактори, як орієнтація друку 3D-зразків, можуть впливати на їхню механічну цілісність, що, в свою чергу, впливає на якість різання [25].

Точність має вирішальне значення для деталей, спроектованих за технологією FDM, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до значних перекосів, що впливають на продуктивність і функціональність кінцевого продукту. Передові технології, такі як лазерне різання та обробка з ЧПК, застосовуються для того, щоб гарантувати, відповідність заданим розмірам з високою точністю [26]. Фінішна обробка – важливий етап, який суттєво впливає на кінцеву якість вирізаних деталей. Згладжування країв дрібнозернистим наждачним папером допомагає усунути будь-які шорсткості, які можуть призвести до проблем під час складання або монтажу. Регулярна перевірка зрізів також необхідна для того, щоб забезпечити своєчасне усунення будь-яких нерівностей, що підвищує загальну якість виготовлених деталей [27].

Механічна обробка має кілька значних переваг при застосуванні до інженерних деталей, виготовлених методом моделювання плавленим осадженням (FDM), підвищуючи їх продуктивність і придатність для різних застосувань.

Однією з основних переваг механічної обробки є підвищення точності розмірів деталей FDM. Під час процесу FDM-друку такі фактори, як усадка матеріалу та діаметр сопла, можуть призвести до розбіжностей у розмірах. Механічні методи подальшої обробки, такі як фрезерування або механічна обробка, можуть уточнити ці розміри, гарантуючи, що деталі точно прилягають до інших компонентів і відповідають суворим вимогам допуску [28].

Механічна обробка також може оптимізувати механічні властивості компонентів FDM. Застосовуючи такі методи, як шліфування та хімічне згладжування, користувачі можуть підвищити твердість, зносостійкість та втомну міцність. Така оптимізація особливо корисна для деталей, призначених для високопродуктивного застосування в таких галузях, як аерокосмічна та автомобільна промисловість, де механічна цілісність має першорядне значення [29].

Інтеграція механічної обробки в робочий процес FDM полегшує швидку індивідуалізацію конструкцій. З'являється можливість змінювати та вдосконалювати деталі після друку, що дозволяє їм швидко адаптуватися до мінливих вимог або підвищити ефективність проектування. Така адаптивність має важливе значення в галузях, де пріоритетом є швидке створення прототипів і розробка продуктів [30].

Механічна обробка може сприяти зменшенню відходів матеріалів, пов'язаних з деталями FDM. Наприклад, методи, які дозволяють видаляти надлишки матеріалу з опорних конструкцій, можуть призвести до більш ефективного використання матеріалів. Крім того, точність, яку забезпечує механічна обробка, зводить до мінімуму необхідність повторного друку через помилки в розмірах, що ще більше економить ресурси.

Ще однією важливою проблемою є обмеження, пов'язані зі спеціалізованими матеріалами. Наприклад, хоча такі матеріали, як ABS, пропонують підвищену довговічність і механічну міцність, їхні виробничі процеси є енергоємними і залежать від ресурсів на нафтовій основі. Ця залежність збільшує їхній вплив на навколишнє середовище і ускладнює бюджетні міркування, що робить ABS більш придатним для проектів, де його міцність виправдовує екологічні та фінансові компроміси [31].

На противагу цьому, PLA є більш екологічною альтернативою, але може не мати такого ж рівня механічної міцності, який необхідний для певних застосувань, що підкреслює необхідність ретельного вибору матеріалу на основі вимог проекту [32].

Однією з важливих проблем, пов'язаних з обробкою FDM, є складність програмування, необхідного для обробки з ЧПК. Помилки в програмуванні можуть призвести до дорогих помилок, марних витрат матеріалів і затримок у виробництві, що додає ще один рівень складності до процесу.

Знос інструменту є серйозною проблемою при обробці деталей FDM. Такі фактори, як невідповідна швидкість подачі, твердість матеріалу та недостатнє охолодження, можуть призвести до надмірного зносу інструменту, що впливає на тривалість циклу та якість деталі. Регулярні перевірки та коригування швидкості подачі необхідні для мінімізації цих проблем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Враховуючи існуючі проблеми виникає необхідність формування методики механічного обробнуння обєктів виготовлених методом пошарового наплавлення, які дозволять забезпечити якість та прогнозованість оброблюваної поверхні зі збереженням механічних властивостей (на відміну від хімічної обробки). Основою такої методики є математична модель, що дозволяє провести опис процесу з урахуванням параметрів (подачі, глибини різання, швидкості обертання шпинделя). В основу такої моделі необхідно покласти шаруватий матеріал, окремий шар якого складають з окремих волокон (рис. 6).

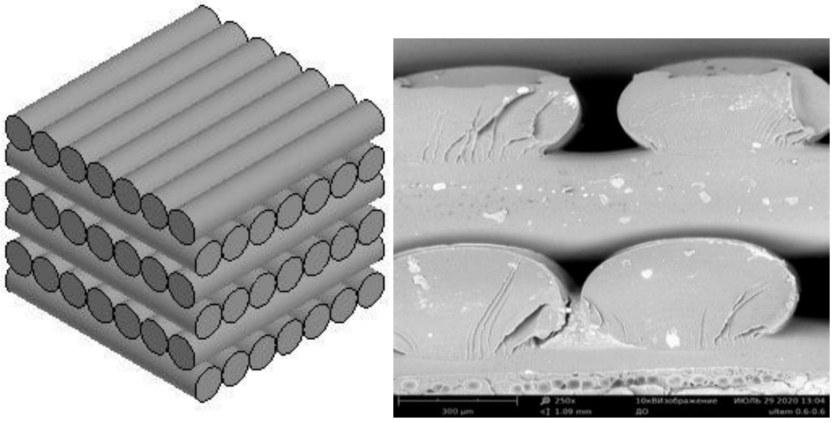

Рис. 6. Структура для аналізу

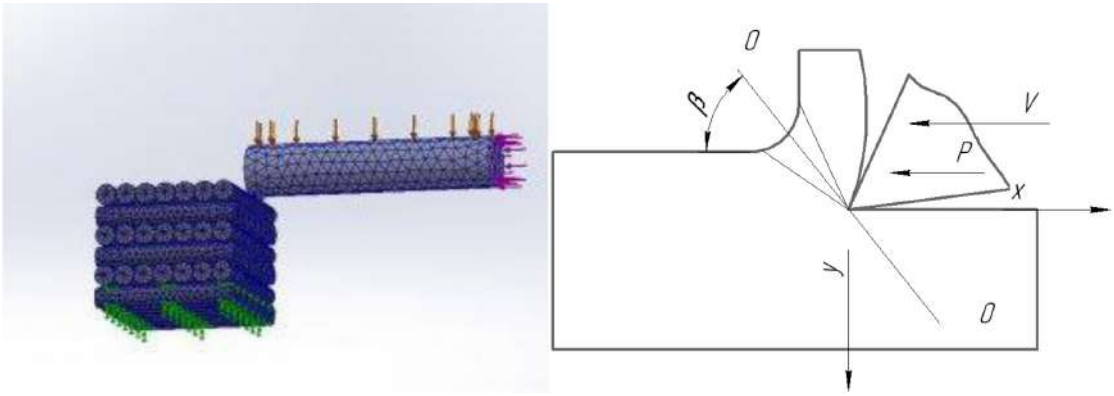

Рис. 7. Схема взаємодій лезійного інструменту з FDM-виробом

Процес лезвійного різання виробів, виготовлених методом FDM, має свої особливості через шарувату структуру матеріалу, анізотропність його механічних властивостей та наявність міжшарових з'єднань, які можуть бути слабшим місцем (рис. 7). Для адекватного опису цього процесу необхідно враховувати механічні та теплові характеристики матеріалу, властивості ріжучого інструменту та умови різання.

При різанні лезо взаємодіє з шаруватим матеріалом, створюючи три зони:

Зона пружної деформації, де матеріал піддається напруженням без порушення зв'язків.

Зона пластичної деформації, у якій відбувається локальна деформація полімерного матеріалу перед руйнуванням.

Зона руйнування, де матеріал відділяється у вигляді стружки або частково розшаровується через недостатню міжшарову адгезію.

Критичним фактором є напрямок укладання шарів FDM-деталі відносно руху леза:

Різання вздовж шарів спричиняє утворення довгої стружки та рівномірний зріз.

Різання перпендикулярно до шарів призводить до розшарування через слабку адгезію між ними.

В процесі різання лезо взаємодіє з матеріалом, створюючи зону контакту, яка характеризується:

– товщиною шарів, сформованих під час 3D-друку;
– напрямком укладання шарів та їх орієнтацією відносно ріжучої кромки;
– величиною зазору між шарами, що впливає на зчеплення між ними.

Кут нахилу ріжучої кромки відносно орієнтації шарів визначає механізм руйнування матеріалу: при невеликому куті домінує зріз шарів, а при більшому – розшарування виробу через недостатню адгезію між шарами.

Модель, повина враховувати:

– Анізотропну будову шаруватих виробів та нерівномірний розподіл механічних властивостей,
– Механізми руйнування як самого матеріалу, так і міжшарових зв'язків,
– Вплив тертя та нагрівання на міцність адгезії.

Анізотропія та шарова структура:

FDM-вироби характеризуються анізотропією, тобто їх механічні властивості залежать від напрямку навантаження, де кожен шар може мати різну міцність, а міжшарові зв'язки є критичними для загальної міцності виробу. Модель враховує цю анізотропію через введення площі контакту між шарами A_s та відповідних напружень.

Механізми руйнування:

Включають механічний розрив матриці та зсувне руйнування між компонентами. У запропонованій моделі це відображено через два основних компоненти: сила, необхідна для зрізу матеріалу та сила, необхідна для подолання міжшарової адгезії. Розшарування відбувається, коли зсувне напруження перевищує критичне значення, що узгоджується з аналізом механізмів руйнування в обробці композитів.

Тепловий вплив:

Виділення тепла під час різання є ще одним важливим фактором. Нагрівання може вплинути на адгезійні властивості, знижуючи коефіцієнт адгезії і тим самим полегшуючи розшарування. Включення температурної залежності дозволяє моделювати цей ефект і оптимізувати параметри різання для зменшення небажаного руйнування міжшарових зв'язків.

При різанні шаруватого матеріалу виникають напруження у зоні контакту ріжучої кромки з матеріалом, які можна розділити на:

- нормальні напруження (σ), що виникають при проникненні леза в матеріал,
- зсувні напруження (τ), що визначають процес відокремлення матеріалу та можливість руйнування міжшарових з'єднань.

Загальний розподіл напружень у матеріалі описується співвідношеннями:

$$\sigma_x = \frac{F_{c,x}}{A_c}, \quad \sigma_y = \frac{F_{c,y}}{A_c}, \quad \sigma_z = \frac{F_{c,z}}{A_c},$$

де A_c – площа контакту ріжучої кромки з матеріалом, а F_c – сила різання.

Окрім основного матеріалу, особливу увагу слід приділити міжшаровій адгезії, яка визначає міцність зчеплення між шарами. Для цього вводиться сила адгезії:

$$F_{adh} = k_{adh} \cdot A_s \cdot \left(1 - \frac{T_{crit} - T_{bond}}{T_{crit} - T_{\min}}\right),$$

де k_{adh} – коефіцієнт адгезії, A_s – площа контакту між шарами.

Якщо зсувні напруження між шарами перевищують межу адгезії, відбувається розшарування виробу:

$$\tau \le \tau_{adh}.$$

Таким чином, якщо лезо діє в напрямку, перпендикулярному до шарів, можливе розривання міжшарових зв'язків ще до механічного руйнування самого матеріалу.

Процес різання супроводжується виділенням тепла через тертя між лезом та матеріалом. Це тепло може призводити до зміни механічних властивостей матеріалу та ослаблення адгезійних зв'язків. Тепловий вплив можна описати рівнянням:

$$Q = W_c \cdot \eta.$$

Де W_c – робота різання, η – коефіцієнт перетворення механічної енергії в тепло.

Залежність міжшарової адгезії від температури можна виразити у вигляді експоненційної залежності:

$$k_{adh}(T) = k_{adh_0} \cdot \exp\left(-\frac{T - T_{bond}}{T_{char}}\right),$$

де T_{char} – характеристична температура розпаду адгезійних зв'язків.

При перевищенні критичної температури T_{crit} можливе плавлення або термічне руйнування адгезії, що значно полегшує процес розшарування.

Щоб оцінити ефективність різання та можливість розшарування виробу, необхідно виконання двох основних умов:

1. Міцність матеріалу $\sigma + \tau \leq \sigma_{ult}$

σ_{ult} – граничне напруження, при якому руйнується сам матеріал.

2. Міцність міжшарових зв'язків $\tau \leq \tau_{adh}$.

Якщо виконуються обидві умови, різання відбувається без розшарування, в іншому випадку – спостерігається розрив зв'язків між шарами та порушення структури виробу.

Лезвійне різання може викликати як механічне руйнування, так і міжшарове розшарування через слабку адгезію.

Необхідно враховувати розподіл сил та їхню взаємодію з напрямком друку.

Вплив температури може суттєво змінювати механізм різання через зміну адгезійних властивостей матеріалу.

Під час механічної обробки адитивно виготовлених деталей, значну увагу слід приділяти аналізу розподілу напружень у зоні контакту між шарами або волокнами. У цих вузлах контакту відбувається концентрація напружень.

Шарована структура виробу призводить до неоднорідного розподілу матеріалу, що спричинює локальні нерівності в товщині шару, наявність мікродефектів або пустот. Такі неоднорідності створюють умови для локального підвищення напружень.

Зв'язок між шарами (або волокнами) недостатньо міцний, при діях зовнішніх навантажень напруження концентруються в місцях контакту, де виникає перевантаження і починається розшарування матеріалу.

Під час механічної обробки діють додаткові зсувні та нормальні сили, що можуть призводити до утворення локальних зон з високими значеннями напружень. Ці зони можуть стати початковими точками для ініціації мікротріщин або локальних руйнувань.

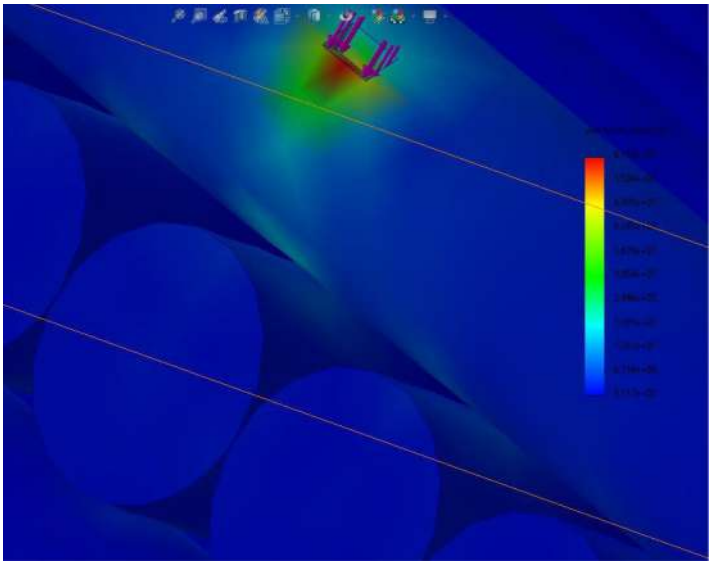

Рис. 8. Концентрація напружень в вузлах контакту між шарами (волокнами)

З урахуванням цих факторів можливо оптимізувати параметри різання для забезпечення якісної обробки FDM-компонентів.

Висновки

Оскільки виробники прагнуть масштабувати свої операції, адаптивність систем різання стає все більш важливою. Обладнання, яке відповідає сьогоднішнім потребам, також повинно бути здатним пристосовуватися до майбутніх типів матеріалів і виробничих потреб. Оцінка загальної вартості володіння, включаючи технічне обслуговування і масштабованість, має важливе значення для виробників, які прагнуть узгодити свої інвестиції з довгостроковими стратегіями зростання.

Сучасні технології адитивного виробництва, зокрема методи 3D-друку, активно застосовуються в авіаційній, автомобільній та інших високотехнологічних галузях. Особливості шарової будови виготовлених виробів створюють додаткові виклики під час їх механічної обробки, адже локальна концентрація напружень у зонах контакту між шарами або волокнами може призводити до дефектів, мікротріщин та зниження експлуатаційної надійності. Це робить дослідження розподілу напружень та механізмів руйнування в таких виробах надзвичайно важливими як з точки зору оптимізації процесів обробки, так і для забезпечення якості кінцевої продукції. Врахування сучасних підходів, зокрема чисельного моделювання методом кінцевих елементів та аналізу міжшарової адгезії, дозволяє глибше зрозуміти вплив технологічних параметрів на механічну поведінку виробів, що є критично важливим для інженерних систем.

Цілями спрямованими на підвищення ефективності та якості виробничих процесів, забезпечення надійності інженерних систем і розширення застосування адитивного виробництва в промисловості:

– Розробити та впровадити нові методики механічної обробки, які мінімізують локальне накопичення напружень у виробах з адитивною структурою.

– Визначити оптимальні параметри різання для збереження міжшарової адгезії.

– Розширити застосування методів для більш точного прогнозування розподілу напружень у різних режимах обробки.

– Розробити мультифізичні моделі, що враховують взаємодію механічних, термічних та хімічних процесів під час обробки адитивного виготовлених виробів.

– Провести серію експериментальних досліджень для визначення критичних параметрів міжшарової адгезії та локальних напружень.

Список використаної літератури

1. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13(13), 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

2. Bekas, D. G., Hou, Y., Liu, Y., & Panesar, A. J. C. P. B. E. (2019). 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 179, 107540.

3. Chen, T. C. T., & Lin, Y. C. (2019). A three-dimensional-printing-based agile and ubiquitous additive manufacturing system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 88–95., https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.008

4. Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. J. M. T. P. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596

5. Орел В. М., Козловська Т. Ф., Саленко О. Ф., Мельничук П. П. Постооброблення виробів інженерного призначення, отриманих методами адитивного пошарового моделінгу. *Технічна інженерія*. 2025 №1(95). С. 76–93. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93

6. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13, 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

7. Bruni, C., Gianangeli, C., Mancia, T., Greco, L., & Pieralisi, M. (2020, April). Improving dimensional and surface quality of additive manufactured parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1507, No. 4, p. 042003). IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/1507/4/042003

8. Salenko, A. F., Derevianko, I. I., Samusenko, A. A., Avramov, K. V., Lithot, A. V., & Rogulin, V. V. (2021). Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic. *Mechanics and Advanced Technologies*. No. 3. 282–293.

9. Salenko, O., Zagirnyak, M., Orel, V., Shlyk, S., & Kulynych, V. (2022, October). FDM products strength increasing using the algorithmic means of 3-D printers working. *In 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 01–05). IEEE. doi:10.1109/MEES58014.2022.10005667

10. Borthakur, P. P. (2025). The Role and Future Directions of 3D Printing in Custom Prosthetic Design. *Engineering Proceedings*, 81(1), 10. https://doi.org/10.3390/engproc2024081010

11. Górski, F., Wichniarek, R., Kuczko, W., & Żukowska, M. (2021). Study on properties of automatically designed 3d-printed customized prosthetic sockets. *Materials*, 14(18), 5240. https://doi.org/10.3390/ma14185240

12. Darwish, L. R., El-Wakad, M. T., & Farag, M. M. (2021). Towards sustainable industry 4.0: A green real-time IIoT multitask scheduling architecture for distributed 3D printing services. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 196–209., https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.004

13. Gómez-Ortega, A., Piedra, S., Mondragón-Rodríguez, G. C., & Camacho, N. (2024). Dependence of the mechanical properties of nylon-carbon fiber composite on the FDM printing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 186, 108419. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108419

14. Patel, K. S., Shah, D. B., Joshi, S. J., Aldawood, F. K., & Kchaou, M. (2024). Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8006-8018. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.184

15. Fazzini, G., Paolini, P., Paolucci, R., Chiulli, D., Barile, G., Leoni, A.,... & Ferri, G. (2019, June). Print on air: Fdm 3d printing without supports. *In 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)* (pp. 350–354). IEEE. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792846

16. Wall, L. W., Schneider, O., & Vogel, D. (2023, October). Substiports: User-Inserted Ad Hoc Objects as Reusable Structural Support for Unmodified FDM 3D Printers. *In Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 1–20). https://doi.org/10.1145/3586183.3606718

17. Gao, T., Li, C., Yang, M., Zhang, Y., Jia, D., Ding, W.,... & Wang, J. (2021). Mechanics analysis and predictive force models for the single-diamond grain grinding of carbon fiber reinforced polymers using CNT nano-lubricant. *Journal of Materials Processing Technology*, 290, 116976. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116976

18. Aman, B. (2020). Generative design for performance enhancement, weight reduction, and its industrial implications. *arXiv preprint arXiv*:2007.14138., https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001

19. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019–2038. https://doi.org/10.1007/s11223-021-00281-3

20. Kechagias, J., & Zaoutsos, S. (2024). Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: Outlook and trends. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(6), 804–814

21. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019–2038. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0136

22. Karimi, N., Bozorgnia Tabary, S. A. A., & Fayazfar, H. (2024). In-depth investigation and industry plan for enhancing surface finishing of 3D printed polymer composite components: A critical review. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(24), e55494.. https://doi.org/10.1002/app.55494

23. Комісаров О. О., Пухальська Г. В., Дядя С. І. Пост-обробка деталей фрезеруванням на верстаті з ЧПК після 3D друку методом наплавлення. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 1. С. 31–40.

24. Dilberoglu, U. M., Yaman, U., & Dolen, M. (2024). A comprehensive guide to milling techniques for smoothing the surfaces of 3D-printed thermoplastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 30(8), 1648–1662. https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2023-0277

25. Nabavi-Kivi, A., Ayatollahi, M. R., Schmauder, S., & Khosravani, M. R. (2023). Fracture analysis of a 3D-printed ABS specimen: effects of raster angle and layer orientation. *Physical Mesomechanics*, 26(1), 19-32. https://doi.org/10.1134/S1029959923010034

26. Wang, L., Han, J., Tang, Z., Zhang, Y., Wang, D., & Li, X. (2025). Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(1), 87.https://doi.org/10.1186/s10033-025-01258-y

27. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2023). Customized quality inspection cycles for achieving sustainable manufacturing in the era of Zero Defect Manufacturing. *Procedia CIRP*, 120, 141–146., https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.026

28. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2024). Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 764–779. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551

29. Carta, M., Loi, G., El Mehtedi, M., Buonadonna, P., & Aymerich, F. (2025). Improving Surface Roughness of FDM-Printed Parts Through CNC Machining: A Brief Review. *Journal of Composites Science*, 9(6), 296. https://doi.org/10.3390/jcs9060296

30. Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F. I. T., Ungureanu, L. M., & Munteanu, I. S. (2024). Post-production finishing processes utilized in 3D printing technologies. *Processes*, 12(3), 595.. https://doi.org/10.3390/pr12030595

31. Arunprasand, T. R., & Nallasamy, P. (2024). Advancements in optimizing mechanical performance of 3D printed polymer matrix composites via microstructural refinement and processing enhancements: A comprehensive review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–19. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2426776

32. Orel, V. M., Kashuba, S., Yatsina, M. M., & Mazur, V. H. (2024). To the Question of Design and Manufacturing of Special Equipment for Mechanism of Pneumatic Power Receiving Mechanism. *In Applications of Synthetic High Dimensional Data* (pp. 222–237). IGI Global Scientific Publishing.

References

1. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13(13), 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

2. Bekas, D. G., Hou, Y., Liu, Y., & Panesar, A. J. C. P. B. E. (2019). 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 179, 107540.

3. Chen, T. C. T., & Lin, Y. C. (2019). A three-dimensional-printing-based agile and ubiquitous additive manufacturing system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 88–95., https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.008

4. Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. J. M. T. P. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596

5. Orel V. M., Kozlovska T. F., Salenko O. F., Melnychuk P. P. (2025) Postoobroblennya virobiv inzhenernogo priznachennya, otrimanikh metodami aditivnogo posharovogo modelingu. [Post-processing of engineering products obtained by additive layer modelling] *Technical Engineering*, vol. 1(95), pp. 76–93. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93

6. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13, 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

7. Bruni, C., Gianangeli, C., Mancia, T., Greco, L., & Pieralisi, M. (2020, April). Improving dimensional and surface quality of additive manufactured parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1507, No. 4, p. 042003). IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/1507/4/042003

8. Salenko, A. F., Derevianko, I. I., Samusenko, A. A., Avramov, K. V., Lithot, A. V., & Rogulin, V. V. (2021). Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic. *Mechanics and Advanced Technologies*. No. 3. 282–293.

9. Salenko, O., Zagirnyak, M., Orel, V., Shlyk, S., & Kulynych, V. (2022, October). FDM products strength increasing using the algorithmic means of 3-D printers working. *In 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 01–05). IEEE. doi:10.1109/MEES58014.2022.10005667

10. Borthakur, P. P. (2025). The Role and Future Directions of 3D Printing in Custom Prosthetic Design. *Engineering Proceedings*, 81(1), 10. https://doi.org/10.3390/engproc2024081010

11. Górski, F., Wichniarek, R., Kuczko, W., & Żukowska, M. (2021). Study on properties of automatically designed 3d-printed customized prosthetic sockets. *Materials*, 14(18), 5240. https://doi.org/10.3390/ma14185240

12. Darwish, L. R., El-Wakad, M. T., & Farag, M. M. (2021). Towards sustainable industry 4.0: A green real-time IIoT multitask scheduling architecture for distributed 3D printing services. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 196–209., https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.004

13. Gómez-Ortega, A., Piedra, S., Mondragón-Rodríguez, G. C., & Camacho, N. (2024). Dependence of the mechanical properties of nylon-carbon fiber composite on the FDM printing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 186, 108419. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108419

14. Patel, K. S., Shah, D. B., Joshi, S. J., Aldawood, F. K., & Kchaou, M. (2024). Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8006-8018. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.184

15. Fazzini, G., Paolini, P., Paolucci, R., Chiulli, D., Barile, G., Leoni, A.,... & Ferri, G. (2019, June). Print on air: Fdm 3d printing without supports. *In 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)* (pp. 350–354). IEEE. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792846

16. Wall, L. W., Schneider, O., & Vogel, D. (2023, October). Substiports: User-Inserted Ad Hoc Objects as Reusable Structural Support for Unmodified FDM 3D Printers. *In Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 1–20). https://doi.org/10.1145/3586183.3606718

17. Gao, T., Li, C., Yang, M., Zhang, Y., Jia, D., Ding, W.,... & Wang, J. (2021). Mechanics analysis and predictive force models for the single-diamond grain grinding of carbon fiber reinforced polymers using CNT nano-lubricant. *Journal of Materials Processing Technology*, 290, 116976. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116976

18. Aman, B. (2020). Generative design for performance enhancement, weight reduction, and its industrial implications. *arXiv preprint arXiv*:2007.14138., https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001

19. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019–2038. https://doi.org/10.1007/s11223-021-00281-3

20. Kechagias, J., & Zaoutsos, S. (2024). Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: Outlook and trends. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(6), 804–814.

21. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019-2038. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0136

22. Karimi, N., Bozorgnia Tabary, S. A. A., & Fayazfar, H. (2024). In-depth investigation and industry plan for enhancing surface finishing of 3D printed polymer composite components: A critical review. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(24), e55494.. https://doi.org/10.1002/app.55494

23. Komisarov O. O., Pukhalskaya G. V., Dyadya S. I. (2024) Post-obrobka detalei frezeruvannyam na verstati z ChPK pislya 3D druku metodom naplavlennya. [Post-processing of details by milling on a CNC machine after 3D printing by the solution method] *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. vol 1. pp. 31–40.

24. Dilberoglu, U. M., Yaman, U., & Dolen, M. (2024). A comprehensive guide to milling techniques for smoothing the surfaces of 3D-printed thermoplastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 30(8), 1648-1662. https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2023-0277

25. Nabavi-Kivi, A., Ayatollahi, M. R., Schmauder, S., & Khosravani, M. R. (2023). Fracture analysis of a 3D-printed ABS specimen: effects of raster angle and layer orientation. *Physical Mesomechanics*, 26(1), 19–32. https://doi.org/10.1134/S1029959923010034

26. Wang, L., Han, J., Tang, Z., Zhang, Y., Wang, D., & Li, X. (2025). Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(1), 87.https://doi.org/10.1186/s10033-025-01258-y

27. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2023). Customized quality inspection cycles for achieving sustainable manufacturing in the era of Zero Defect Manufacturing. *Procedia CIRP*, 120, 141–146., https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.026

28. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2024). Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 764–779. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551

29. Carta, M., Loi, G., El Mehtedi, M., Buonadonna, P., & Aymerich, F. (2025). Improving Surface Roughness of FDM-Printed Parts Through CNC Machining: A Brief Review. *Journal of Composites Science*, 9(6), 296. https://doi.org/10.3390/jcs9060296

30. Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F. I. T., Ungureanu, L. M., & Munteanu, I. S. (2024). Post-production finishing processes utilized in 3D printing technologies. *Processes*, 12(3), 595. https://doi.org/10.3390/pr12030595

31. Arunprasand, T. R., & Nallasamy, P. (2024). Advancements in optimizing mechanical performance of 3D printed polymer matrix composites via microstructural refinement and processing enhancements: A comprehensive review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–19. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2426776

32. Orel, V. M., Kashuba, S., Yatsina, M. M., & Mazur, V. H. (2024). To the Question of Design and Manufacturing of Special Equipment for Mechanism of Pneumatic Power Receiving Mechanism. *In Applications of Synthetic High Dimensional Data* (pp. 222–237). IGI Global Scientific Publishing.

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025