

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-67>

УДК 621.9.011

**ОРЕЛ ВАДИМ**

Державний університет «Житомирська політехніка»

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

e-mail: deoxis24@gmail.com

## ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ FDM ВИРОБІВ

У статті розглянуто проблему визначення ефективності лезової механічної постобробки виробів, виготовлених методом адитивного FDM-друку з термопластичних матеріалів. Показано, що структура таких виробів є неоднорідною та порожнистою, з вираженою анізотропією властивостей, що суттєво впливає на перебіг процесів різання та формування якості поверхневого шару. Проаналізовано роль постоброблення як завершального етапу формування експлуатаційних характеристик адитивних деталей, зокрема геометричної точності, шорсткості поверхні та цілісності міжшарових і міжвиткових з'єднань. Запропоновано підхід до оцінювання ефективності механічного оброблення на основі товщини модифікації поверхневого шару, яка узагальнює зміни напружено-деформованого стану та структурні перетворення матеріалу в зоні дії різального клина. Наведено аналітичні залежності для опису перерозподілу напружень у шаруватій структурі FDM-виробів та результати математичного моделювання процесу різання в середовищі SolidWorks для матеріалів PLA та ABS. Експериментально встановлено вплив режимів різання на виникнення дефектів, рівень залишкових напружень, точність форми та параметри шорсткості поверхні. Показано, що зменшення товщини зйому та подачі, а також використання гостро заточеного інструменту дозволяє знизити інтенсивність деструкції приповерхневого шару та забезпечити прийнятну якість оброблених поверхонь. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтованого вибору режимів механічної постобробки FDM-виробів з урахуванням їх структурних особливостей та вимог до кінцевих експлуатаційних характеристик.

**Ключові слова:** адитивне виробництво, FDM-друк, механічна постобробка, лезова обробка, поверхневий шар, шорсткість поверхні, напружено-деформований стан.

**OREL VADYM**

State University "Zhytomyr Polytechnic"

## ON THE ISSUE OF DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF FDM PRODUCT BLADE PROCESSING

The article discusses the problem of determining the effectiveness of blade mechanical post-processing of products manufactured by additive FDM printing from thermoplastic materials. It is shown that the structure of such products is heterogeneous and hollow, with pronounced anisotropy of properties, which significantly affects the course of cutting processes and the formation of the surface layer quality. The role of post-processing as the final stage in shaping the performance characteristics of additive parts, in particular geometric accuracy, surface roughness, and the integrity of interlayer and interturn connections, is analyzed. An approach to evaluating the effectiveness of mechanical processing based on the thickness of the surface layer modification is proposed, which generalizes the changes in the stress-strain state and structural transformations of the material in the cutting wedge action zone. Analytical dependencies are given to describe the redistribution of stresses in the layered structure of FDM products, and the results of mathematical modeling of the cutting process in SolidWorks for PLA and ABS materials are presented. The influence of cutting modes on the occurrence of defects, the level of residual stresses, shape accuracy, and surface roughness parameters has been experimentally established. It has been shown that reducing the thickness of removal and feed, as well as using a sharply sharpened tool, allows to reduce the intensity of destruction of the surface layer and ensure acceptable quality of the machined surfaces. The results obtained can be used for a reasonable choice of FDM product mechanical post-processing modes.

**Keywords:** additive manufacturing, FDM printing, mechanical post-processing, blade processing, surface layer, surface roughness, stress-strain state.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



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/)

© Орел Вадим

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Аддитивні технології, зокрема FDM-друк, набули широкого поширення у машинобудуванні, приладобудуванні та прототипуванні завдяки можливості швидкого виготовлення виробів складної форми з полімерних матеріалів. Водночас вироби, отримані цим методом, характеризуються шаруватою порожнистою структурою, наявністю міжшарових і міжвиткових порожнин, а також вираженою анізотропією фізико-механічних властивостей. Такі особливості обумовлюють підвищену чутливість адитивних заготовок до силових і теплових впливів на етапі постоброблення, що ускладнює забезпечення необхідної точності геометричних розмірів, якості поверхонь та стабільності експлуатаційних характеристик.

У практиці виготовлення FDM-виробів механічна лезова постобробка застосовується для усунення похибок форми, зниження шорсткості поверхні та формування функціональних поверхонь. Проте використання традиційних підходів і режимів різання, запозичених з обробки суцільних полімерних матеріалів, не завжди є ефективним і може призводити до виникнення додаткових дефектів у вигляді розшарувань, відшарувань, порушення щільності структури та зростання залишкових напружень у приповерхневих шарах. Відсутність узагальнених критеріїв оцінювання ефективності лезової обробки FDM-виробів обмежує можливості

раціонального вибору режимів постоброблення та знижує відтворюваність результатів.

У зв'язку з цим актуальною науково-практичною задачею є дослідження механізмів взаємодії різального клина з шаруватою структурою адитованих матеріалів та встановлення закономірностей формування стану поверхневого і приповерхневого шарів у процесі механічної обробки. Розв'язання цієї задачі дозволить створити науково обґрунтовані підходи до оцінювання ефективності постоброблення, підвищити якість і надійність FDM-виробів, а також розширити можливості їх практичного застосування в інженерних виробках відповідального призначення.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Ряд дослідників сходиться на думці, що ущільнення друку, зменшення товщини викладання шару, призводить до покращення щільності самого готового виробу, [1], хоча одночасно можливе погіршення бічних стінок зі зниженням точності виконання розмірів у площині викладання філаменту, оскільки починає проявлятися ефект витіснення пластику поза прогнозовану траєкторію, [2]. Достатньо глибоке дослідження типів дефектів, [3], їх виникнення особливо при друці тонких стінок (зокрема, стільникових проставок, [4]) доводить, що таке технічне протиріччя долається точним налагодженням обсягу екструзії та оптимізацією траєкторій руху; інколи також передбачається виконання кінцевого механічного оброблення з метою забезпечення точності розмірів та взаємного розташування поверхонь, [5].

В роботі [6] показано, що існує причинно-наслідкова зв'язок між умовами формування виробу та параметрами поверхневого шару і механічними властивостями.

Утворювані під час процесу дефекти умовно можна розділити на системні (регулярні) та випадкові; останні можуть виникати через такі фактори:

- 1) наявність сторонніх домішок у пластичі, які частково закупорюють канал сопла, що призводить до недостатньої подачі пластику;
- 2) утворення відкладень усередині сопла;
- 3) прослизання пластику в механізмі подачі (наприклад, PETG або PE);
- 4) тимчасові відхилення параметрів друку від початкових налаштувань (наприклад, перегрів сопла або зміна швидкості друку).

В [7] зроблено висновок, що такі дефекти можуть бути частково усунені постобробленням, внаслідок чого відбувається модифікація (зміна) поверхневого шару з його частковим видаленням або без такого.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідження ефективності лезової механічної постобробки виробів, виготовлених методом FDM-друку, шляхом аналізу напружено-деформованого стану та структурних змін поверхневого і приповерхневого шарів, встановлення впливу режимів різання на точність форми, шорсткість поверхні й виникнення дефектів, а також обґрунтування критеріїв оцінювання якості та раціональних режимів постоброблення для полімерних матеріалів.

#### Виклад основного матеріалу

При механічній обробці заготовки розмірами  $L \times B \times H$ , наприклад фрезою, рис. 1,а, що обертається з частотою  $\omega$  та контактуватиме при наданні поступової подачі  $s$  із заготовкою на ширині  $b$ , відбувається вилучення матеріалу на глибину  $h$ ; як правило при цьому вилучається поверхневий шар, забезпечується взаємне розташування поверхонь базування і сполучених, однак усунення дефектів не відбувається, оскільки під час різання матеріал, який володіє певною порожнистістю (від 1,5 до 3...5%) сприймає механічне навантаження, яке спроможне зруйнувати нещільні місця сполучень структури друкованого виробу, особливо у випадку, коли щільність останнього недостатня.

Відповідні методи постоброблення так:  $D_m^i$  – механічне різання ( $D_m^1$  – точіння,  $D_m^2$  – фрезерування,  $D_m^3$  – свердління та інше). Тоді забезпечення сукупності властивостей готового виробу, що описується масивом  $\mathbf{G}$  відповідатиме перетворенню початкових параметрів деталі  $\mathbf{R}$  відповідними методами  $D_i$ , що мають прояв через відповідні компоненти  $P_k$ .

$$\mathbf{R} \cap D(P_k) \rightarrow \mathbf{G}. \quad (1)$$

Тут для кожного  $D_i$  набір компонентів  $P_k$  буде власним, визначатиметься механізмами та особливостями їх протікання при постобробленні. Так, наприклад,  $D_m^i$  визначатиметься так:

$$D_m^i \subset (P_1, P_3, P_4, P_9). \quad (2)$$

З наведених міркувань стає очевидно, що задача досягнення потрібної якості готового виробу як формування вихідних показників за (1) можлива кількома варіантами постоброблення; так,  $D_m^i$  направлене переважно на виправлення форми, тоді як  $D_f, D_h$  - на зміну стану й властивостей поверхні. Таким чином повний комплекс показників якості забезпечується умовою

$$\mathbf{G} \subset \sum_{i=1}^4 \mathbf{R} \cap D_i(P_k), \quad (6)$$

що достатньо дорого з економічної точки зору та потребує наявності значної кількості допоміжного обладнання.

Підвищення ефективності постоброблення полягає у пошуку таких прийомів, при яких виключається дублювання дій, що призводять до зміни стану або параметрів поверхневого та приповерхневого шарів.

Механізми зміни стану поверхонь та структури адитованої заготовки та закономірності формування компонентів  $P_k$  частково розглядалися в [8] та [9].

Неоднорідна порожниста структура адитованого матеріалу, рис. 1, та наявність порожнини між витками обумовлює перерозподіл навантажень під час силового впливу. Перпендикулярна дія різального клина на поверхню умовного призматичного тіла дасть змогу записати компоненти тензору напружень так:

$$\sigma_{xx} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div}U + \frac{1}{2\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( \frac{x}{R^3} - \frac{3x^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left( -\frac{3x}{R(R+z)^2} - \frac{x^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \\ &+ S_y \left( -\frac{y}{R^3} - \frac{3x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left( \frac{y}{R(R+z)^2} - \frac{x^2y(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + \\ &+ S_z \left( \frac{z}{R^3} - \frac{3x^2z}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left( \frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \end{aligned} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div}U + \frac{1}{2\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( \frac{x}{R^3} - \frac{3y^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left( \frac{x}{R^2(R+z)} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + \\ &+ S_y \left( \frac{y}{R^3} - \frac{3y^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left( -\frac{3y}{R(R+z)^2} + \frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \\ &+ S_z \left( \frac{z}{R^3} - \frac{3zy^2}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left( \frac{1}{R(R+z)} + \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \end{aligned} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div}U + \frac{1}{2\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( \frac{x}{R^3} - \frac{3z^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{x}{R^3} \right) + S_y \left( \frac{y}{R^3} - \frac{3z^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{y}{R^3} \right) + \\ &+ S_z \left( -\frac{2(m-1)z}{m} \frac{z}{R^3} + \frac{2z}{R^3} - \frac{3z^3}{R^5} \right) \end{aligned} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{4\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( -\frac{6x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + S_y \left( \frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + \\ &+ 2S_z \left( -\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \end{aligned} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{1}{2\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( -\frac{3y^2x}{R^5} - \frac{3xyz}{R^5} \right) + S_y \left( \frac{m-2}{m} \left( \frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + \\ &+ S_z \left( -\frac{6z^2y}{R^5} + \left( 1 + \frac{3(m-2)}{m} \right) \frac{y}{R^3} \right) \end{aligned} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{zx} = \frac{1}{4\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( -\frac{3zx^2}{R^5} - \frac{3z^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left( \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) - S_y \frac{6xyz}{R^5} \\ &+ S_z \left( \left( 1 + \frac{m-2}{m} \right) \frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \end{aligned} \right) \quad (12)$$

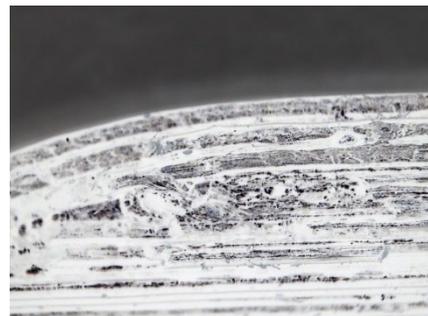
де R – одиничний вектор напрямку; m – число Пуассона; S<sub>x</sub>, S<sub>y</sub>, S<sub>z</sub> – проєкції зосередженої сили на осі XYZ, що діє усередину напівпростору.

Для умовно симетричної структури композиту:

$$\sigma_{yx} = \frac{1}{4\pi} \times \left( \begin{aligned} &S_x \left( \frac{6x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + \\ &- S_y \left( \frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + \\ &+ 2S_z \left( \frac{3xyz}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \end{aligned} \right) \quad (13)$$



а)



б)

Рис.1. Фото торця заготовки: а) – перед механічним впливом; б) – мікрофото частини зрізаної поверхні

$$\sigma_{zy} = \frac{1}{2\pi} \times \left( S_x \left( \frac{3y^2x}{R^5} + \frac{3xyz}{R^5} \right) - S_y \left( \frac{m-2}{m} \left( \frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + S_z \left( \frac{6z^2y}{R^5} - \left( 1 + \frac{3(m-2)}{m} \right) \frac{y}{R^3} \right) \right) \quad (14)$$

$$\sigma_{xz} = \frac{1}{4\pi} \times \left( S_x \left( \frac{3zx^2}{R^5} + \frac{3z^2x}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left( -\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + S_y \frac{6xyz}{R^5} - S_z \left( \left( 1 + \frac{m-2}{m} \right) \frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \right) \quad (15)$$

При цьому картини перерозподілу напружень між шарами, нитками та іншими складовими структури оброблюваної деталі можна отримати, визначивши дію різального клина відповідно до рис. 2.

Наведені вище аналітичні міркування було перевірено математичним моделюванням процесів і явищ, що відбуваються при обробці адитованої заготовки. При цьому брали до уваги результати [10]-[12].

Припущення для моделювання були такими:

- 1) заготовка має регулярну структуру, складається із викладених симетрично правильної форми волокон, сполучених поміж собою та пошарово;
- 2) міцність сполучень відповідає максимально допустимим напруженням, що можуть виникати на межі контакту даного матеріалу;
- 3) усі ділянки сполучень мають однакову міцність, а внутрішні дефекти відсутні;
- 4) матеріал нещільний, просочування газів або рідини можливе в міжволоконному та міжшаровому зазорах; площа просочення однакова для основних ортів та стабільна за перетином.

Моделювання виконували у середовищі Solid Works із відповідними розрахунковими модулями. Аналіз виконували для низько-температурних пластиків типу PLA та ABS. На основі моделювання встановлювали розподіл напружень, переміщень, оцінювали також ділянки, на яких зміна стану поверхневого шару залишалася істотною. Узагальненою характеристикою обрали товщину модифікації (зміни) поверхневого шару  $T_d^m$  – для механічного різання.

Умови закріплення заготовки та прикладання сили різання при постобробленні  $D_m^i$  – механічному впливі – разом із результатами моделювання відповідали розташуванню заготовки на жорсткій основі.

Ілюстрації до моделювання етапів розвитку борозенки різа під час механічного впливу наведено на рис. 3.

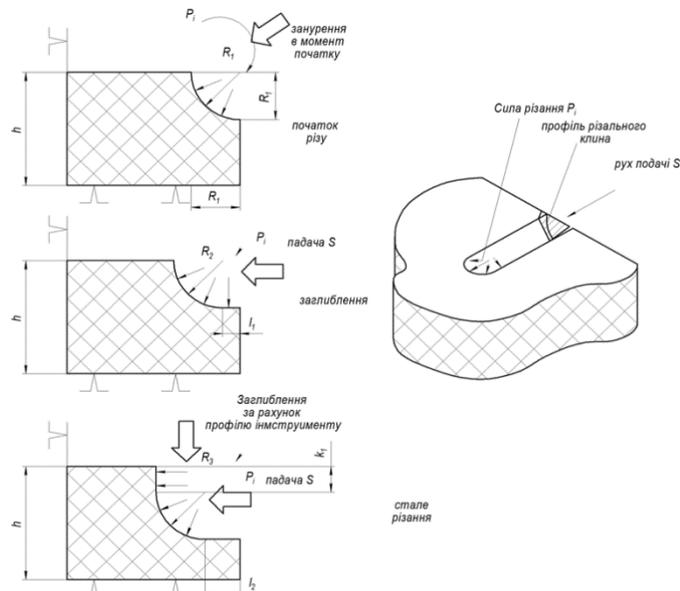
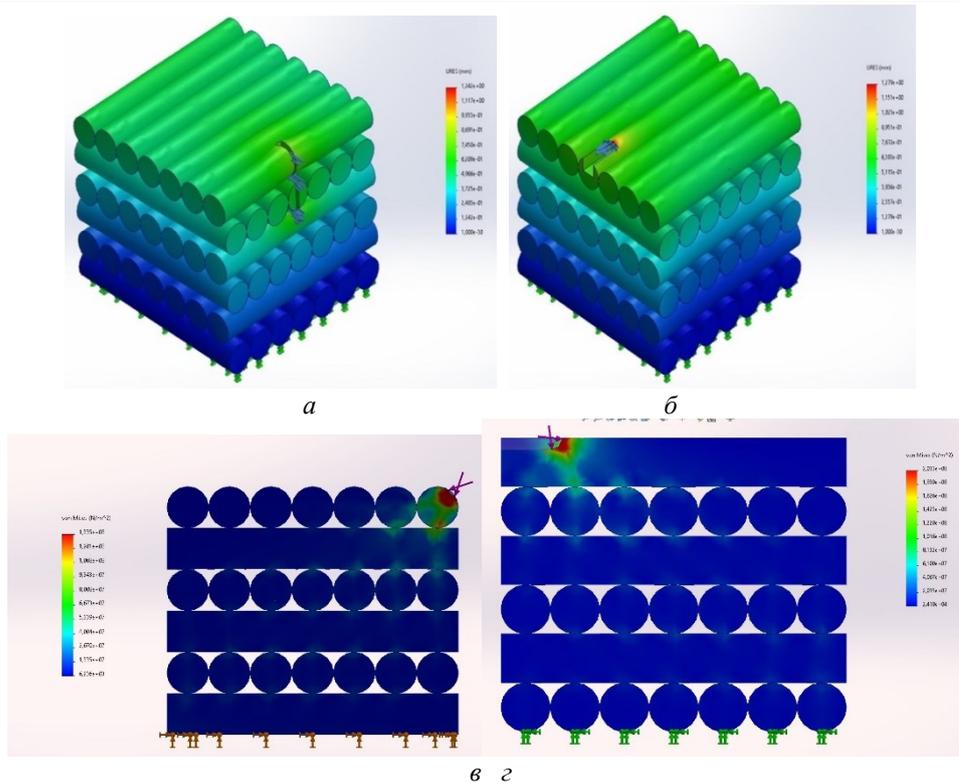


Рис.2. Модель дії різального клина на оброблену деталь

Тестові вироби, які було залучено до моделювання відповідних явищ, виконували на принтері CREALITY K1C. Під час друку використовували сопло  $\varnothing 0,4$  мм, температуру викладання –  $T_e=220$  °C, товщина шару 0,12 мм. Це дозволяло отримувати досить щільну структуру, яка достатньо точно визначається (1). зразки виконували із філаментів Creality PLA та Creality ABS з режимами, що забезпечували оптимальну продуктивність процесу. Для постоброблення користувалися настільним обладнанням з ЧПК фірми Procraft: токарний з ЧПК Procraft VMM800; фрезерно-свердловальний Procraft VMM1100; шліфувальний Sturmmax BGM6055DB. Лазерну обробку виконували на універсальному лазерному комплексі ЛСК-400-5, оснащеному Ni:Yag лазером; частота слідування імпульсів – до 250 Гц, енергія імпульсу –640 Дж (макс).

Використовувані інструменти з робочою крайкою P6M5, T15K6.



**Рис.3. Моделювання постоброблення: а) – силове навантаження від різального клина впоперек волокон; б) – силове навантаження від різального клина уздовж; в) – силове навантаження від різального клина на початку занурення; г – силове навантаження від різального клина під час сталого різання**

Точність форми оцінювали на координатно-вимірвальній машині MITUTOYO A-1, а характеристики профілю – на профілометрі-профілографі серії SURFCOM виробництва ACCRETECH (Японія) типу HANDISURF.

Після постоброблення отримані вироби піддані метрологічному аналізу та визначено шорсткість поверхні за параметрами  $Rz$ ,  $Ra$ , мкм. Окремо визначено наявність дефектів на контрольованих поверхнях, а також стан шарів сполучень.

Призначення режимів різання (швидкості головного руху  $v_r$ , подачі  $s$ , глибини різання  $t_p$ ; швидкості ковзання абразиву поверхню  $v_a$  виконували виходячи із рекомендацій [13], а також особливостей поведінки ущільнених матеріалів на полімерній основі [14] так, щоб умови моделювання були релевантними до умов реального оброблення.

Обробку виконано різальним інструментом із загостреними кутами клина  $\gamma=5...12^\circ$ ,  $\alpha=10...15^\circ$ ,  $\varphi=30...45^\circ$ , забезпечуючи мінімально можливу температуру в зоні формування нових поверхонь поділу. Режими різання призначено за рекомендаціями, аналогічно обробці полімерних матеріалів, у тому числі, шаруватих полімерних композитів, з обмеженням силового впливу та врахуванням певної анізотропії властивостей.

Глибину модифікації поверхневих шарів  $T_d^m$ ,  $T_d^l$  та  $T_d^h$  встановлювали на основі мікроелектронного дослідження зрізів дослідних зразків, виконаних на «Мікротом MR 3000».

Під час моделювання механічної взаємодії було звернуто увагу на те, що механічне різання задовільно видаляє поверхневий шар, але можуть виявлятися нові дефекти у вигляді порожнин, розшарувань та відшарувань; вироби виявилися досить чутливими до точності призначення режиму різання.

Так, встановлено, що при точінні збільшенні швидкості різання  $v_r > 45$  м/хв із товщиною зняття понад  $t_p = 1,0...1,5$  мм та подачею  $s = 0,5...0,6$  мм/об спостерігається зростання напружень на міжшарових та міжшарових площинках, які зростають до  $\sigma = 32...48$  МПа; такі напруження вже порівняні із межею міцності на розтяг у цих точках, тож можна очікувати порушення щільності готового виробу та різке зростання товщини деструкції.

Зменшення товщини зйому до  $t_p = 0,3...0,7$  мм сприяє зменшенню цього чинника; окрім того, різання з меншою товщиною зйому, як і з меншою подачею (меншою за  $s = 0,15...0,2$  мм) веде до покращення якості оброки та зниженню товщини приповерхневого шару, який може бути деструктований внаслідок дії різального клина.

Було встановлено, що для жорстких виробів із лінійними розмірами 50...150 мм похибки форми для пластику PLA не перевищують 0,5...0,9 мм; для ABS такі похибки становлять вже 1,2...1,8 мм і проявляються у відшаруваннях, розпученні та ін.; для менш жорстких виробів похибки форми можуть сягати 1,5...2,5 мм.

Використання гостро заточених інструментів дозволяє отримати досить якісний поверхневий шар на матеріалі PLA:  $Ra = 3,0...3,6$  мкм,  $Rz = 20...40$  мкм при точінні, фрезеруванні та свердлінні; на матеріалів ABS – відповідно  $Ra = 1,2...1,6$  мкм,  $Rz = 5...8$  мкм; швидкість різання – 35...50 м/хв.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Постоброблення виробів отриманих адитивними процесами, включає не тільки видалення підтримок та «жертвних» елементів, а і створення нових поверхонь, поліпшення форми, зміни стану поверхневого шару.

Показано, що товщина модифікації (зміни) поверхневого шару:  $T_d^m$ , який визначатиме комплекс вихідних властивостей готового виробу, оскільки зміни, які як правило відбуваються у цьому шарі, ведуть до зниження кількості дефектів або сприяють зменшенню інтенсивності розвитку пошкоджень виробу під час експлуатації.

Механічне постоброблення переважно направлене на поліпшення форми та забезпечення геометричних розмірів виробу в цілому; інколи за рахунок різання вдається знизити також високі залишкові напруження у поверхневому шарі.

Способи і методи механічного оброблення аналогічні обробці полімерних матеріалів, у тому числі, шаруватих полімерних композитів, з обмеженням силового впливу та врахуванням певної анізотропії властивостей. Обробку рекомендується виконувати різальним інструментом із загостреними кутами клина  $\gamma=5...12^\circ$ ,  $\alpha=10...15^\circ$ ,  $\varphi=30...45^\circ$ , забезпечуючи мінімально можливу температуру в зоні формування нових поверхонь поділу.

Використання гостро заточених інструментів дозволяє отримати досить якісний поверхневий шар на матеріалі PLA:  $Ra=3,0...3,6$  мкм,  $Rz=20...40$  мкм при точінні, фрезеруванні та свердлінні; на матеріалів ABS – відповідно  $Ra=1,2...1,6$  мкм,  $Rz=5...8$  мкм; швидкість різання – 35...50 м/хв; при шліфуванні – до 25 м/с (нетривало); при лазерному опроміненні – енергія імпульсу – до 250 Дж; з формуванням нагрітої ділянки, яка знаходиться поза фокусом на глибину до 0,1...0,5 мм; хімічне оброблення – у парах кетонів (для ABS-пластику) не менше ніж 60...80 хв.

### Література

1. Abbas, T. F., Mansor, K. K., & Ali, H. B. (2022). The Effect of FDM Process Parameters on the Compressive Property of ABS Prints. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(7). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.7.17>
2. Baechle-Clayton, M., Loos, E., Taheri, M., & Taheri, H. (2022). Failures and flaws in fused deposition modeling (FDM) additively manufactured polymers and composites. *Journal of Composites Science*, 6(7), 202. <https://doi.org/10.3390/jcs6070202>.
3. Bobyr, M. I., Kryshchuk, M. G., Salenko, O. F., Onyshchenko, E. E., Tsurkan, D. O., Kostenko, A. O., ... & Lopata, L. A. (2024). Damage Development in a Cellular Axisymmetric Tank Additive-Manufactured from Plastic Filament. Part 2. Experimental Studies of Damage to Cellular Shell Systems and the Dependence of Strength Characteristics on Process Parameters. *Strength of Materials*, 56(4), 702-712. <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00664-2>
4. Salenko, O., Strutinsky, V., Avramov, K., Orel, V., Dzhulii, D., Havrushkevych, A., & Kostenko, A. (2025). Providing technical and algorithmical support to the predictable properties of honeycomb filler obtained by additive processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 135(1). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329745>
5. Orel, V., Kozlovs'ka, T., Salenko, O., & Melnychuk, P. (2025). Post-processing of engineering products obtained by additive layer modelling. *Technical Engineering*, (1(95)), 76–93. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93)
6. Saifuddin Khan, Ketan Joshi, Samadhan Deshmukh, A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts, *Materials Today: Proceedings*, Volume 50, Part 5, 2022, Pages 2119-2127, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.433>.
7. Alnusirat, W., Hann, S., Salenko, O., Orel, V., Kozlovskaya, T., Kostenko, A., Tsurkan, D., Mel'nychuk, P., & Kovalenko, Y. (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*, 6(1 (138)), 23–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.347457>
8. Orel, V., Salenko, O., & Melnychuk, P. (2024). Innovative additive technologies in the creation of structural elements of aircraft and spacecraft. *Technical Engineering*, (1(93)), 64–69. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-64-69](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-64-69)
9. Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A. et al. (2021), «Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts – A Critical Review», *Polymers*, Vol. 13, No. 10, doi: 10.3390/polym13101587.
10. D.A. Sawant, B.M. Shinde, S.J. Raykar, Post processing techniques used to improve the quality of 3D printed parts using FDM: State of art review and experimental work, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.202>.
11. Ray Tahir Mushtaq, Yanen Wang, Aqib Mashood Khan, Mudassar Rehman, Xinpei Li, Shubham Sharma, A post-processing laser polishing method to improve process performance of 3D printed new Industrial Nylon-6 polymer, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 101, 2023, Pages 546-560, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.06.019>.

12. Adin, M. Ş., & Kam, M. (2024). An overview of post-processing of fused deposition modelling 3D printed products. Post-Processing of Parts and Components Fabricated by Fused Deposition Modeling, 1-10.
13. Bahrami, B., Talebi, H., Momeni, M.M. et al. Experimental and theoretical investigation of the influence of post-curing on mixed mode fracture properties of 3d-printed polymer samples. *Sci Rep* 14, 13216 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64136-y>
14. Guangzhou Wang, Linjie Zhao, Qi Liu, Yazhou Sun, Mingjun Chen, Investigating micro-cutting mechanism of glow discharge polymer based on material properties and removal behaviors analysis, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 50, 2024, Pages 238-248, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.03.006>.

### References

1. Abbas, T. F., Mansor, K. K., & Ali, H. B. (2022). The Effect of FDM Process Parameters on the Compressive Property of ABS Prints. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(7). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.7.17>
2. Baechle-Clayton, M., Loos, E., Taheri, M., & Taheri, H. (2022). Failures and flaws in fused deposition modeling (FDM) additively manufactured polymers and composites. *Journal of Composites Science*, 6(7), 202. <https://doi.org/10.3390/jcs6070202>.
3. Bobyr, M. I., Kryshchuk, M. G., Salenko, O. F., Onyshchenko, E. E., Tsurkan, D. O., Kostenko, A. O., ... & Lopata, L. A. (2024). Damage Development in a Cellular Axisymmetric Tank Additive-Manufactured from Plastic Filament. Part 2. Experimental Studies of Damage to Cellular Shell Systems and the Dependence of Strength Characteristics on Process Parameters. *Strength of Materials*, 56(4), 702-712. <https://doi.org/10.1007/s11223-024-00664-2>
4. Salenko, O., Strutinsky, V., Avramov, K., Orel, V., Dzhulii, D., Havrushkevych, A., & Kostenko, A. (2025). Providing technical and algorithmical support to the predictable properties of honeycomb filler obtained by additive processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 135(1). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329745>
5. Orel, V., Kozlovs'ka, T., Salenko, O., & Melnychuk, P. (2025). Post-processing of engineering products obtained by additive layer modelling. *Technical Engineering*, (1(95)), 76–93. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-76-93](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93)
6. Saifuddin Khan, Ketan Joshi, Samadhan Deshmukh, A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts, *Materials Today: Proceedings*, Volume 50, Part 5, 2022, Pages 2119-2127, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.433>.
7. Alnusirat, W., Hann, S., Salenko, O., Orel, V., Kozlovskaya, T., Kostenko, A., Tsurkan, D., Mel'nychuk, P., & Kovalenko, Y. (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*, 6(1 (138)), 23–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.347457>
8. Orel, V., Salenko, O., & Melnychuk, P. (2024). Innovative additive technologies in the creation of structural elements of aircraft and spacecraft. *Technical Engineering*, (1(93)), 64–69. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-64-69](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-64-69)
9. Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A. et al. (2021), «Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts – A Critical Review», *Polymers*, Vol. 13, No. 10, doi: 10.3390/polym13101587.
10. D.A. Sawant, B.M. Shinde, S.J. Raykar, Post processing techniques used to improve the quality of 3D printed parts using FDM: State of art review and experimental work, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.202>.
11. Ray Tahir Mushtaq, Yanen Wang, Aqib Mashood Khan, Mudassar Rehman, Xinpei Li, Shubham Sharma, A post-processing laser polishing method to improve process performance of 3D printed new Industrial Nylon-6 polymer, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 101, 2023, Pages 546-560, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.06.019>.
12. Adin, M. Ş., & Kam, M. (2024). An overview of post-processing of fused deposition modelling 3D printed products. Post-Processing of Parts and Components Fabricated by Fused Deposition Modeling, 1-10.
13. Bahrami, B., Talebi, H., Momeni, M.M. et al. Experimental and theoretical investigation of the influence of post-curing on mixed mode fracture properties of 3d-printed polymer samples. *Sci Rep* 14, 13216 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64136-y>
14. Guangzhou Wang, Linjie Zhao, Qi Liu, Yazhou Sun, Mingjun Chen, Investigating micro-cutting mechanism of glow discharge polymer based on material properties and removal behaviors analysis, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 50, 2024, Pages 238-248, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.03.006>.