

В.М. Орел, к.т.н.*Державний університет «Житомирська політехніка»***Т.Ф. Козловська, к.х.н., доц.***Кременчуцький льотний коледж**Харківського національного університету внутрішніх справ***О.Ф. Саленко, д.т.н., проф.***Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»***П.П. Мельничук, д.т.н., проф.***Державний університет «Житомирська політехніка»*

Постоброблення виробів інженерного призначення, отриманих методами адитивного поширового моделінгу

У статті досліджено вплив механічного постоброблення на геометричні та фізико-механічні характеристики виробів, виготовлених за допомогою адитивного поширового моделювання (зокрема, FDM). Розглянуто механізми формування дефектного шару, що виникає внаслідок порожнистості, анізотропної структури матеріалу, а також температурних і силових навантажень. Для випадку моделювання створеної адитивними процесами заготовки необхідно врахування порожнистості тіла заготовки, а також її шаруватість та компонентність. На основі чисельного моделювання визначено напружено-деформований стан заготовки під час різання, особливості розподілу деформацій та напружень між волокнами та шарами. Досліджено вплив геометрії різального інструменту, режимів різання та особливостей структури PLA-матеріалу на якість обробленої поверхні. Проведено експериментальні випробування різних способів постоброблення: точіння, фрезерування, свердління, шліфування. Отримані результати підтверджують необхідність обмеження зусиль різання та використання гострозаточених інструментів. Запропоновано практичні рекомендації щодо оптимізації постобробки виробів FDM-друку. Зазначено перспективи подальших досліджень, зокрема в напрямі врахування реологічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: адитивне виробництво; FDM; постоброблення; механічні властивості; напруження; моделювання; поверхневий шар.

Актуальність теми. Постоброблення виробів, отриманих адитивними процесами, зазвичай передбачається у випадку, коли виріб надалі сполучатиметься з іншими точними поверхнями (з параметрами шорсткості не гіршими за Ra 2,5 мкм, квалітетами не гіршими за IT7...IT9, а також товщиною дефектного шару не більшим за 50...100 мкм). Останній чинник намагаються максимально знизити, оскільки дефектний шар може мати залишкові напруження, концентратори напружень та осередки розвитку дефектів (зокрема, у вигляді мікротріщин), що при експлуатації можуть зливатися та обумовлювати виникнення макродефектів.

Зазвичай постоброблення виконують фрезеруванням, свердлуванням, шліфуванням; рідше використовують зеркери, спеціальний профільний різальний інструмент. Поверхні, що піддають постобробленню, традиційно є плоскими та циліндричними, наскрізними та глухими відносно основних площин базування та спряжень із відповідними поверхнями інших деталей.

При постобробленні зменшується не тільки дефектний шар, а й підвищується точність просторового розташування поверхонь, знижується шорсткість, підвищується точність виконуваних розмірів.

При цьому, відповідно до схеми обробки, призначають режими різання, виходячи з рекомендацій дослідників, які вивчали закономірності формування поверхонь при обробці нещільних матеріалів. Однак вони доцільні під час різання композитів; адитовані матеріали з цієї точки зору такими не являються: останнім властива порожнистість, анізотропія властивостей за основними ортами та невизначеність адгезійних сполучень у місцях контакту складових.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Питанням постоброблення виробів, отриманих адитивними процесами, присвячено значну кількість робіт. При цьому дослідники виходять із того, що задачі постоброблення направлені на виправлення похибок, які умовно можна звести до трьох груп (табл. 1).

З погляду загального машинобудування [1], переважними вимогами для більшості виробів будуть ознаки (р. 3 табл. 1), коли, коригуючи форму та формуючи відповідальні розміри за IT11 і нижче (зазвичай IT9...IT10), необхідно забезпечувати досягну шорсткість поверхні та відсутність інших дефектів структури, що в цілому визначатимуться технічними вимогами до виробу.

Зазвичай, окрім геометричної точності, [2–3], що обумовлюється сукупністю відхилень контрольованих розмірів δ_{fi} , форми δ_{fi} та взаємного розташування поверхонь δ_{fi} , до виробів висувають додаткові вимоги, [4–5], зокрема, допустима міцність на розрив за основними осями σ_x , σ_y , σ_z , модулі пружності першого $E_{x,y,z}$ та другого $G_{xx,yy,zz}$ роду, відносна подовження $\Delta_{x,y,z}$, щільність ρ (і, відповідно, газопроникність), а також ряд термомеханічних характеристик [6].

Таблиця 1

Класифікація вимог щодо виконання постоброблення адитивних виробів

Група	Вимоги	Застосування	Точність та шорсткість
1	Надання виробам необхідної форми	Невідповідні вироби простої форми	IT14–IT17
2	Надання виробам необхідної форми та квалітету точності	Більш складна форма поверхні	IT11–IT13
3	Надання виробам необхідної форми, квалітету точності та якості поверхневого шару	Фіксовані параметри точності	Нижче IT11; 80 мкм

Типові технологічні процеси постоброблення є такими ж, як і при обробці компактних матеріалів та композитів (табл. 2), для виконання подібної обробки можливе застосування спеціального різального інструменту, подібного до того, який використовують для оброблення композиційних матеріалів [7]. Окремі виробники пропонують максимальну адаптацію інструменту під певний вид обробки [8]; цьому сприяє також і дослідження створення функціонального інструменту, що наведено в [9–10].

Останнім часом для адитивних виробів, сформованих із різних полімерів, додають також і хімічне оброблення, наприклад, обробку в кетонних ваннах для покращення якості поверхневого шару [11].

Таблиця 2

Типові процеси механічного постоброблення

Механічна операція	Застосування	Точність, квалітет	Шорсткість, мкм
Точіння	Проточування поверхні під різі, отримання складного фасонного профілю, формування робочої циліндричної поверхні, підрізання торців і формування канавок	9–11	80
Фрезерування	Обробка площин, скосів, вирізання вікон, прорізання пазів	10–12	10–20
Свердління	Отримання різних отворів під кріпильні елементи в контейнерах та оболонках, для наскрізних і глухих отворів під штифто-болтові з'єднання	10–12	40
Шліфування	Оздоблювальна операція для забезпечення високої якості поверхні	–	2,5

Останнім часом саме механічні характеристики та геометрична точність виробів, отриманих без додаткового постоброблення, є об'єктом досліджень [12–15]. В [12] автори досліджували FDM-процес і зосередили увагу на дослідженні параметрів міцності виробів залежно від трасології викладання філаменту, у [13] ці ж питання розглядалися крізь призму можливостей поліпшення характеристик міцності, праця [14] присвячена вивченню геометричної точності та досяжного рівня якості поверхневого шару, а [15] висвітлює результати точності форми тонких оболонок. В цілому роботи довели, що, зазвичай, навіть для найдешевших у реалізації процесів FDM досягнення вимог якості проблематичне; причина полягає у тому, що під час відтворення формується значна кількість дефектів [16], уточнення місць їх появи та розвитку дозволяє значно поліпшити параметри міцності шляхом покращення адгезивних властивостей міжшарового контакту [17].

Однак загальний висновок полягає у тому, що створення виключно адитивними методами готового виробу інженерного призначення складне і багатопланове [18]; у більшості випадків зростаюча собівартість може значно перевищувати економічно обґрунтовані альтернативні процеси виготовлення.

Ще однією проблемою є проблема формування перших та зовнішніх шарів [19], а також обмежена щільність деталі, внаслідок чого використовувати її як альтернативу деталі, виготовленої із компактного матеріалу субстративними процесами без додаткових технологічних прийомів неможливо [20].

Питання щільності структури адитованого виробу розглянуте в [21]; тут показано, що за певних обставин забезпечити газонепроникність можливо шляхом нанесення поверхневих плівок; такими плівками можуть бути як полімерні композиції (різного роду клеї), так і метали [22]. Останні, поряд з ущільненням поверхневих шарів, дозволяють підвищити спроможність виробу до термобаричних навантажень. Такі плівки можуть використовуватися у баках для зберігання різних технологічних рідин [23], захисних екранах та ін.

Подібні плівки лишаються достатньо тонкими [24], хоча і можуть створювати похибки при їх нанесенні після постоброблення.

Таким чином, врахування особливостей структури та механіки адитованого матеріалу та їхнього впливу на явища механічного постоброблення (різанням або мікрорізанням) дозволить розробити теоретичні засади прогнозування параметрів готового виробу, оцінювати якість поверхневого шару та рівень точності, а також визначати інші фізико-механічні властивості готового виробу.

Метою роботи є виявлення закономірностей напружено-деформованого стану заготовки, отриманої адитивним відтворенням, в процесі взаємодії різального клина з поверхнею з розробкою відповідних рекомендацій щодо механічного постоброблення.

Об'єкт досліджень – процес взаємодії різального клину інструмента з порожнистим та анізотропним тілом із полімерного матеріалу, предмет досліджень – вплив постоброблення на геометричні характеристики поверхневого шару та фізико-механічні характеристики виробу.

Викладення основного матеріалу. Адитивні технології, на відміну від технологій субстративних, передбачають поелементне (пошарове) сполучення компонентів у вигляді безперервного розплаву полімерної нитки [25] або дискретного розплаву полімерного порошку [26] і знаходять все більше застосування в інженерній практиці, оскільки володіють беззаперечними перевагами [27]:

- 1) можливістю створення складних просторових форм деталей;
- 2) необмеженістю сполучених між собою поверхонь з утворенням граней потрібного профілю;
- 3) широкими технологічними можливостями;
- 4) спроможністю створення тонких оболонкових виробів;
- 5) можливістю створення градієнтних структур;
- 6) формуванням складних порожнистих структур та конструктивних елементів.

Саме тому останнім часом спостерігається підвищення інтересу до адитивних процесів, зокрема, технологій FDM, SLS, SLA, про що свідчать роботи [28–29].

Водночас адитивні вироби також мають і певні недоліки, пов'язані насамперед із тим, що матеріал виробу перестає бути компактним; на якість та міцність сполучення окремих частинок, волокон та шарів істотно впливає режим термоконтакту, схеми силової взаємодії, як зазначається про це у [30].

Внаслідок цього готові вироби відрізняються певною анізотропією властивостей (така анізотропія особливо значна для процесів FDM, хоча наразі це є найдоступніші і низьковартісні технології [27]), а також похибками форми та геометричних розмірів, які переважно визначаються умовами відтворення виробу [31].

Окрім того, в [32] показано, що порівняно із механічними властивостями використовуваного матеріалу (пластику) для FDM виробів властива менша міцність на розрив та на згин, яка, за твердженням [33] залежить від щільності викладання матеріалу. Зазвичай така щільність залишається на рівні 0,75...0,95, і за цим параметром можна прогнозувати зниження механічних властивостей порівняно з властивостями використовуваного матеріалу.

FDM-принтинг передбачає екструзію у стані, коли соплом формується високоеластична нитка пластику, яка під дією сил підтиснення, пружно-пластичного опору, гравітаційних та сил тертя притискається до поверхні викладання (рис. 1), зберігаючи певну температуру T_e протягом часу застигання. Внаслідок силової дії нитка з перерізом діаметром D_y змінює переріз на умовно еліптичний із півсями $A/2$ та $B/2$, а на опорній площині утворюється смуга контакту шириною p_{12} . Зміщення екструдера на крок T_k та рух на еквідистанті до попередньої траєкторії дозволяє отримати бічну смугу контакту, яка формується «втисненням» матеріалу до кута між поверхнею попередньої нитки та поверхнею основи. Так формується структура, поперечний переріз якої наведений на рисунку 2.

Згідно з [28], порожнистість визначиться за співвідношенням площі теоретичного заповнення проміжку шару $h_s k D_c$ з площею перетину екструдованого філамента $\pi AB/4$:

$$\rho = \frac{\pi AB}{4 h_s k D_c}, \quad (1)$$

де h_s – товщина шару, мм; D_c – діаметр сопла екструдера, мм; k – коефіцієнт, що враховує відмінність ширини екструдованої смужки від діаметра сопла D_c .

Параметри визначаються із реологічного рівняння для розплаву філамента (полімерної нитки), яка за [34] виглядає так:

$$\tau = K_1 e^{-\beta \frac{T-T_1}{T_1-273}} \cdot \gamma^n, \quad (2)$$

де β – температурний коефіцієнт; K_1 – коефіцієнт консистенції (ефективної в'язкості); τ – дотичні напруження.

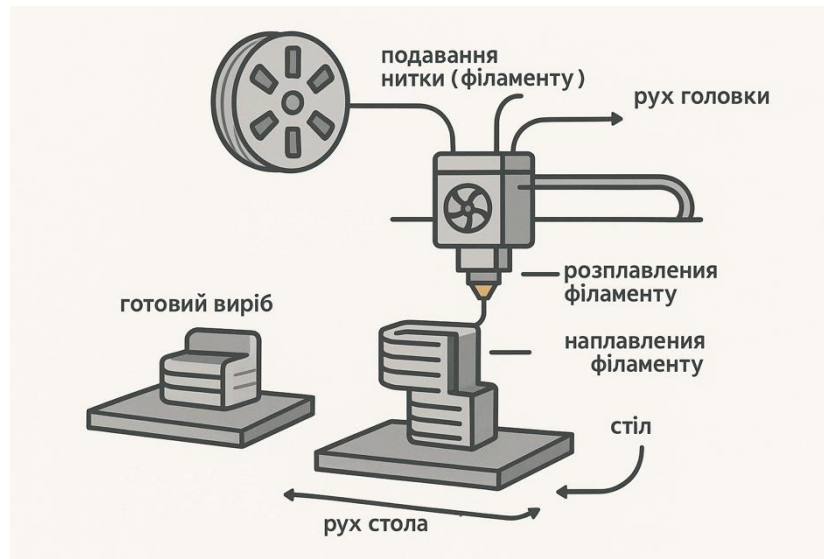
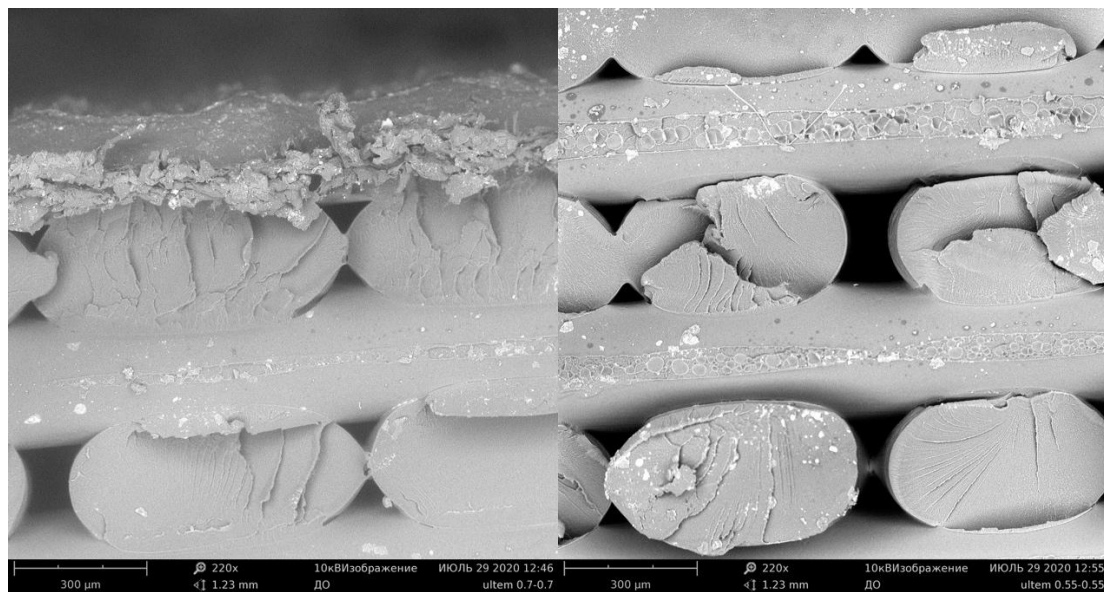


Рис. 1. Схема формування виробу методом FDM [31]



а)

б)

Рис. 2. Мікрофотографії поперечного перерізу заготовок при FDM друці: а) на зовнішній стінці; б) в тілі виробу

Крива плинності для розплаву полімеру $\tau = K\gamma^n$, де n – показник, що характеризує ступінь неньютонівської поведінки розплаву і є індексом течії. Коефіцієнт K є функцією температури, $Ke^{-\beta}$, тож:

$$\beta = -\frac{T_1}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{K_2}{K_1} \right). \quad (3)$$

Реологічні параметри K та n визначаються за експериментальними даними, а постановка задачі для встановлення впливу температурних явищ в інваріантній формі включає кінематичні співвідношення, рівняння теплопровідності: $c_v \theta = \text{div}(k \text{grad} \theta) + Q$, квазістатичної рівноваги: $\text{div} \sigma = 0$, граничних та початкових умов: $\theta = \theta_0$ при $t = 0$; $-kn \cdot \text{grad} \theta = -q + \gamma(\theta - \theta_c)$; $\sigma \times n = 0$. Тут θ – температура; σ – тензор напружень; Q – потужність об'ємного джерела тепла; q – заданий потік тепла; c_v та k – коефіцієнти

теплоємності та теплопровідності; γ – коефіцієнт тепловіддачі; θ_c – температура навколишнього середовища; θ_0 – початкова температура; n – зовнішня нормаль до поверхні тіла; $\sigma = (\sigma_{ij})$, $i, j = x, y, z$.

При викладанні філаменту формується структура, подібна до зазначеної нарисунку 3.

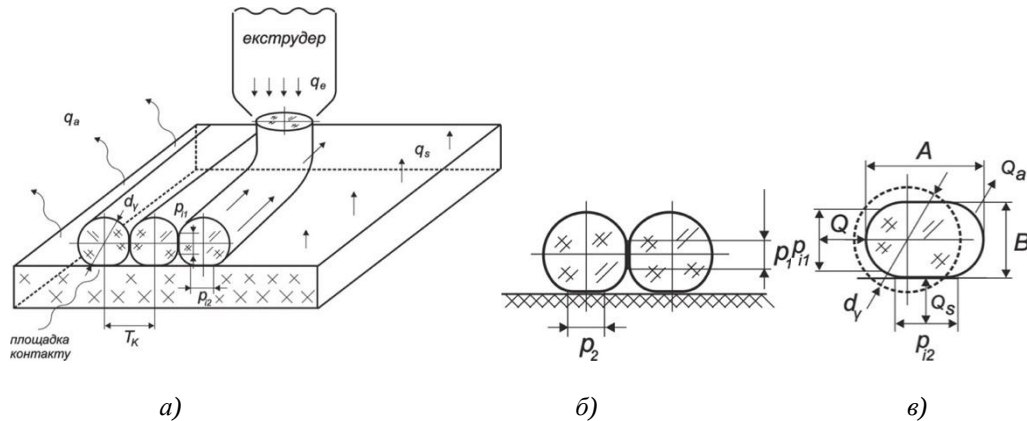


Рис. 3. Схема викладання філаменту та утворення смуг адгезії: а) загальний вигляд; б) параметри контакту сусідніх смуг; в) основні параметри однієї смуги

Плоский напружений стан в площині викладання OXY:

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0, u_i = u_i(x, y), \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x, y), \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y), \theta = \theta(x, y). \quad (4)$$

Термомеханічна поведінка матеріалу описується співвідношеннями: $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^0$; $\varepsilon^0 = \alpha(\theta - \theta_0)I$; $s = 2Ge$, $tr\sigma = 3K_v tr(\varepsilon - \varepsilon^0)$. Тут ε^e та ε^0 – пружна і теплова складники деформації, s та e – девіатори тензорів напружень і деформацій; G і K_v – модуль зсуву та об'ємний модуль; tr – слід тензора; I – одиничний тензор.

Неоднорідна порожниста структура адитованого матеріалу обумовлює перерозподіл навантажень між компонентами викладання (рис. 1). Так напруження у тілі оброблюваної заготовки, що утворюють різальний клин, можуть бути оцінені відповідно до розв'язку задачі визначення напружень при дії точкового довільно розташованого навантаження, розглянутої в роботі [35], як частині розв'язання окремих завдань пружності квазіпружних ортотропних матеріалів. У випадку перпендикулярної дії різального клина на поверхню компоненти тензора напружень (визначені у системі координат відповідно до рисунка 4) матимуть вигляд:

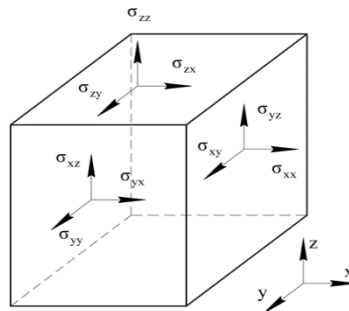


Рис. 4. Компоненти тензора напружень

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

$$\sigma_{yy} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div} U + \frac{1}{2\pi} \times \left[S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3y^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{x}{R^2(R+z)} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + \right. \\ \left. + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3y^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left(-\frac{3y}{R(R+z)^2} + \frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \right. \\ \left. + S_z \left(\frac{z}{R^3} - \frac{3zy^2}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{1}{R(R+z)} + \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \right]; \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div} U + \frac{1}{2\pi} \times \left[S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3z^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{x}{R^3} \right) + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3z^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{y}{R^3} \right) + \right. \\ \left. + S_z \left(-\frac{2(m-1)}{m} \frac{z}{R^3} + \frac{2z}{R^3} - \frac{3z^3}{R^5} \right) \right]; \quad (7)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{4\pi} \times \left[S_x \left(-\frac{6x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + S_y \left(\frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + \right. \\ \left. + 2S_z \left(-\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right]; \quad (8)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{1}{2\pi} \times \left[S_x \left(-\frac{3y^2x}{R^5} - \frac{3xyz}{R^5} \right) + S_y \left(\frac{m-2}{m} \left(\frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + \right. \\ \left. + S_z \left(-\frac{6z^2y}{R^5} + \left(1 + \frac{3(m-2)}{m} \right) \frac{y}{R^3} \right) \right]; \quad (9)$$

$$\sigma_{zx} = \frac{1}{4\pi} \times \left[S_x \left(-\frac{3zx^2}{R^5} - \frac{3z^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) - S_y \frac{6xyz}{R^5} + S_z \left(\left(1 + \frac{m-2}{m} \right) \frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \right], \quad (10)$$

де R – одиничний вектор напрямку; m – число Пуассона; S_x, S_y, S_z – проекції зосередженої сили на осі XYZ , що діє усередину напівпростору.

Якщо вважати викладену структуру симетричною, інші компоненти тензора можна подати у вигляді:

$$\sigma_{yx} = \frac{1}{4\pi} \times \left[S_x \left(\frac{6x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + \right. \\ \left. + S_y \left(\frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + \right. \\ \left. + 2S_z \left(\frac{3xyz}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right]; \quad (11)$$

$$\sigma_{zy} = \frac{1}{2\pi} \times \left[S_x \left(\frac{3y^2x}{R^5} + \frac{3xyz}{R^5} \right) - \right. \\ \left. - S_y \left(\frac{m-2}{m} \left(\frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + \right. \\ \left. + S_z \left(\frac{6z^2y}{R^5} - \left(1 + \frac{3(m-2)}{m} \right) \frac{y}{R^3} \right) \right]; \quad (12)$$

$$\sigma_{xz} = \frac{1}{4\pi} \times \left[S_x \left(\frac{3zx^2}{R^5} + \frac{3z^2x}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left(-\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \right. \\ \left. + S_y \frac{6xyz}{R^5} - S_z \left(\left(1 + \frac{m-2}{m} \right) \frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \right]. \quad (13)$$

Для нормально орієнтованої площинки S_x, S_y , та S_z визначаються складниками різання і залежать від використовуваного інструменту та його геометрії.

Під час різання (яке здійснюється із достатньо високими швидкостями) в матеріалі виділяється тепло. Тепловий баланс має вигляд:

$$Q_p + Q_{tr} + Q_{tl} = Q_k + Q_i + Q_a, \quad (14)$$

де Q_p – тепловиділення на периферії інструменту; Q_v , Q_{tl} – тепловиділення на передній і задній поверхнях відповідно; Q_k – теплопоглинання в матеріал Q_i – теплопоглинання в інструмент; Q_a – відведення тепла в навколишнє середовище та у шлам.

Вважаємо, що робота зовнішніх сил у зоні різання розподіляється на роботу руйнування і роботу сили тертя. Якщо взяти до уваги, що остання повністю перетворюється на теплоту, то інтенсивність тепловиділення на підставі [7] становитиме:

$$q = fpv, \quad (15)$$

де f – коефіцієнт тертя (для карбону за умови лінеаризації на великих швидкостях $f = 0,18$); p – контактний тиск; v – швидкість ковзання.

Контактний тиск визначається співвідношенням сили нормального навантаження (F) до площі контакту (s_k). За дії нормальної сили в місці контакту напруження можуть бути визначені за відповідними формулами Герца, які для випадку контакту верхівки різального клина (що представляється у вигляді сфери радіусом r_1) та викладеного волокна радіусом r_2 визначаються так: $\sigma = \frac{mF^{1/3}E^{2/3}}{r^{2/3}}$, де $m = 1 + \frac{r_1}{r_2}$,

E – приведений модуль пружності, $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$, r – приведений радіус контакту, $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$. Оскільки під

час обробки порожнистої структури контакт непостійний, час контакту (а отже, й інтенсивність тепловиділення) визначиться порожнистістю і швидкістю відносного руху.

З геометричних міркувань і за умови, що зрізання частини волокна відбудеться лише в разі виступання волокна на величину ψ , максимальна довжина контакту становить $l_k = 2\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}$. Одночасно в зоні обробки відбуватиметься N контактів, отже, приведена довжина контакту становитиме $l_p = Nl_k$, м. Тоді час контактної взаємодії, який визначить виділення теплоти, становитиме:

$$\tau = \frac{2N\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}}{\pi D_k n}. \quad (16)$$

Частота виникнення зон тепловиділення визначиться кількістю контактів верхівки різця із поверхнею на фіксованій площині впродовж певного часу. Для малих зон тепловиділення, що отримують теплоту від контактної взаємодії, завдання розподілу температурних полів (а також визначення температури на поверхні нагріву) може бути зведене до задачі імпульсного нагріву поверхні точковим джерелом, розглянутої в [7].

Рівняння, що описує одновимірне температурне поле для постановки задачі відносно периферії інструменту, може бути отримано на підставі розв'язання диференціального рівняння

$$q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t):$$

$$T(x, t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right). \quad (17)$$

Після припинення дії імпульсу тривалістю τ на поверхню, що нагрівається, відбувається її охолодження шляхом перерозподілу підведеного тепла. Одновимірне температурне поле за умови, що оброблюване тіло являє собою напівнескінченний простір, може бути визначено таким чином:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T} \left[\sqrt{t} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t - \tau} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T (t - \tau)}}\right) \right]. \quad (18)$$

При цьому температура поверхні становитиме $T_0(t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T}$.

З погляду реологічних властивостей тіло, сформоване адитивними процесами, зокрема, FDM, для задачі у двовимірній постановці можна уявити як певний елемент, на який діють складові сили P за осями Z та X , і який має відмінні за відповідними осями коефіцієнти пружності $c^x_1 \dots c^x_i, c^z_1 \dots c^z_j$ та демпфування $b^x_1 \dots b^x_i, b^z_1 \dots b^z_j$. Тоді при збуренні поверхневого шару складовими сили P , що матимуть квазіциклічний характер (типовий випадок при фрезеруванні, шліфуванні, а також точінні загостреним різцем, $P_z = \cos(\omega t)$, $P_x = \sin(\omega t)$), поведінка елемента у певній точці перетину матеріалу описуватиметься рівняннями Лагранжа з урахуванням докритичних навантажень.

Для двох сумісних елементів $m1$ та $m2$, відповідно до рисунка 5, рівняння набудуть вигляду: у вертикальній площині:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \frac{d^2 z_1}{dt^2} = m_1 g - F_b - c_1 (z_1 - z_2) - b_1 \left(\frac{dz_1}{dt} - \frac{dz_2}{dt} \right) \\ m_2 \cdot \frac{d^2 z_2}{dt^2} = m_2 g - c_2 z_2 - c_1 (z_1 - z_2) - b_1 \left(\frac{dz_1}{dt} - \frac{dz_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (19)$$

в горизонтальній

$$\begin{cases} m_1 \cdot \frac{d^2 x_4}{dt^2} = -F_{er} - \mu \cdot m_1 g \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_4}{dt} \right) - c_3 (x_4 - x_3) - b_3 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) \\ m_2 \cdot \frac{d^2 x_3}{dt^2} = -\mu \cdot m_2 g \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_3}{dt} \right) - c_3 x_3 - b_3 \frac{dx_3}{dt} - c_4 (x_4 - x_3) - b_3 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} m_3 \cdot \frac{d^2 x_5}{dt^2} = -R_{er} - \mu \cdot m_3 g \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_5}{dt} \right) - c_5 (x_6 - x_5) - b_5 \left(\frac{dx_6}{dt} - \frac{dx_5}{dt} \right) \\ m_4 \cdot \frac{d^2 x_6}{dt^2} = -\mu \cdot m_4 g \cdot \operatorname{sgn} \left(\frac{dx_6}{dt} \right) - c_6 x_3 - b_6 \frac{dx_3}{dt} - c_5 (x_6 - x_5) - b_5 \left(\frac{dx_6}{dt} - \frac{dx_5}{dt} \right) \end{cases} \quad (21)$$

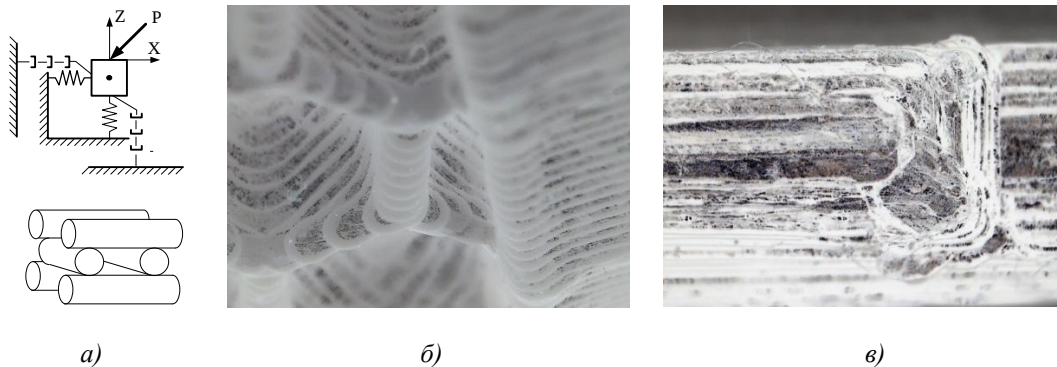


Рис. 5. Пружно-еластична модель структурного елемента адитованого матеріалу (а), мікрофотографія тіла матеріалу (б) та мікрофото одного волокна (в)

Виходячи із наведених вище міркувань, обумовленість параметрів поверхневого шару, механічних властивостей виробу відображається причинно-наслідковою діаграмою (рис. 6).



Рис. 6. Причинно-наслідкова діаграма обумовленості вихідних властивостей виробу режимами друку та динамікою використовуваного принтера

З діаграми стає очевидним, що поряд із механічним, заготовка може сприймати тепловий (температурний) вплив від утворюваних осередків локального нагрівання, хімічний при дії різними активними речовинами, які призводять до внутрішніх змін у структурі та властивостях виробу.

Порожнистість структури та анізотропія властивостей за основними ортами вимагали врахування особливостей взаємодії різального клину з оброблюваним виробом (рис. 7): дію верхівки різця як узагальнення сукупності впливів на оброблювану заготовку на першому етапі звели до навантаження ділянки заготовки компонентами силами різання (рис. 8).

Розробка моделі контактної взаємодії

Припущення та обмеження моделі

На відміну від відомих підходів, матеріал уявляємо як порожнє неоднорідне тіло, яке характеризується певною структурою: покладені навхрест окремі волокна сполучені поміж собою на площинках адгезії, сформованих під час застигання пластику.

Міцність міжшарових та міжниткових сполучень, попри результати [12; 21] вважали однаковою на усіх проміжках і такою, що дорівнювала усередненим значенням: для $[\sigma_x] = 27,5$ МПа, $[\sigma_y] = 24,8$ МПа, $[\sigma_z] = 17,3$ МПа. Контакт у місці сполучення вважали абсолютно жорстким та сталим, переміщення можуть відбуватися виключно внаслідок деформації частин волокон, що знаходяться між зонами контакту. Демпфувальні властивості при динамічному навантаженні обирали із бібліотек для полімерного пластику PLA [16]. Геометричні розміри побудованої моделі регулярні, нитки мають усереднений діаметр 0,45 мм.

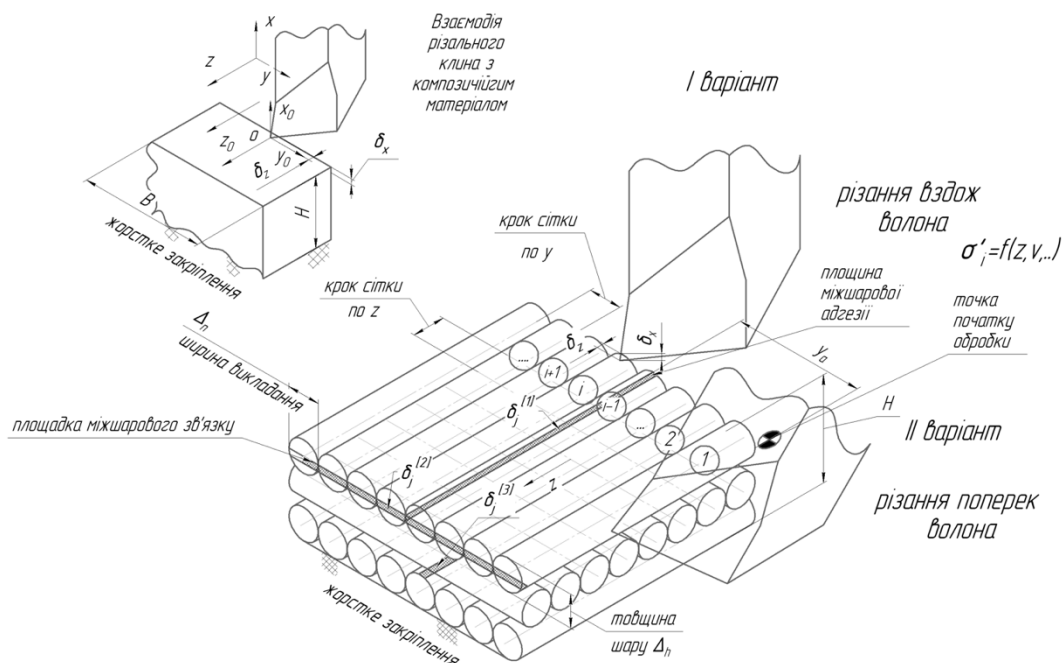


Рис. 7. Схема взаємодії різального клину із заготовкою, виконаною адитивними процесами (FDM)

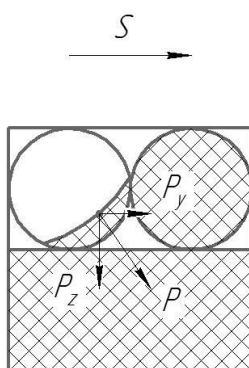


Рис. 8. Зона силового впливу, взята до уваги при моделюванні

Міцність пластику обирали відповідно до результатів випробувань властивостей екструдованого матеріалу [21]. Анізотропія в основних ортах визначалася як приведені характеристики пружної ланки постійного перетину та жорсткого з'єднання у точках контакту. Це дозволяло за рівняннями (5–10) визначати напруження на основних майданчиках із врахуванням відмінностей властивостей пластику при викладанні. Додатково пластик може бути армованим, наприклад, шляхом введення до його складу вуглецевих або скляних волокон. Міцність на розтягування $[\sigma_x]$ у цьому випадку має бути збільшена відповідно до [13] на коефіцієнт $k = 1,8 \dots 2,5$.

При оцінювальному моделюванні деталь уявляли у вигляді багатшарового багатониткового призматичного тіла, створеного сполученими між собою нитками у площинах викладання. Умови

сполучення відповідають схемі рисунка 3, однак нитки умовно уявляти правильної циліндричної форми, що відповідало результатам, отриманим при мікроелектронному дослідженні (рис. 2). При цьому зону силового впливу визначали відповідно до рисунка 8.

Діюче навантаження розподіляли на верхній грані (на рисунку 9 грань умовно повернута за годинниковою стрілкою на кут 90°), і вважали що таке навантаження діє на заокругле втиснення радіусом, що відповідає радіусу при верхівці різального клина 50 мкм.

Модель розглядали жорстко закріпленою на столі (рис. 9), без можливості планарних переміщень у площині встановлення.

З метою визначення розподілу напружень на елементах друкованого виробу під час обробки створено матрицю компонентів напружень, кожен із яких прив'язаний до визначеної точки у шарі або за перетином. Для спрощення процесу моделювання застосуємо поняття «початкового структурного елемента» (ПСЕ), що сприймає зосереджене навантаження. Тоді, знаючи розподіл напружень на основних гранях (рис. 4), маємо змогу перейти до кінцево-елементної моделі, однак тепер така модель враховуватиме структуру оброблюваного матеріалу.

При моделюванні до уваги взяті властивості матеріалу PLA зазначені у таблиці 3.

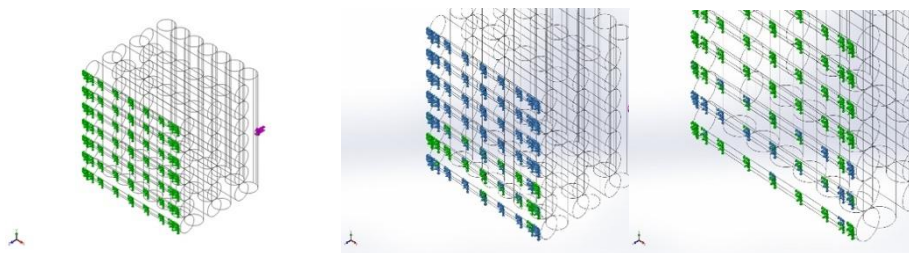


Рис. 9. Тестова заготовка та її закріплення

Таблиця 3

Основні фізико-механічні властивості матеріалу PLA

Величина	Значення
Температура плавлення	173–178 °C
Температура розм'якшення	50 °C
Твердість (за Роквеллом)	R70–R90
Відносне подовження при розриві	3,8 %
Міцність на вигин	55,3 МПа
Міцність на розрив	57,8 МПа
Модуль пружності при розтягуванні	3,3 ГПа
Модуль пружності при вигині	2,3 ГПа
Температура склування	60–65 °C
Щільність	1,23–1,25 г/см ³
Мінімальна товщина стінок	1 мм
Точність друку	± 0,1 %
Розмір найдрібніших деталей	0,3 мм
Усадка під час виготовлення виробів	немає
Вологопоглинання	0,5–50 %

Інші умови моделювання подані у таблиці 4.

Таблиця 4

Параметри і умови моделювання

Величина	Значення
1	2
Тип сітки	Solid Mesh
Використана сітка	Blended curvature-based mesh
Точки Якобіана	16 Points
Максимальний розмір елемента	2,35914 mm
Мінімальний розмір елемента	0,786371 mm
Якість сітки	High

1	2
Інформація про сітку	
Всього вузлів	62602
Всього елементів	34040
Максимальне співвідношення сторін	10,054
Відсоток елементів зі співвідношенням сторін < 3	97,2
Відсоток елементів зі співвідношенням сторін > 10	0,00588
Відсоток спотворених елементів	0
Властивості дослідження	
Тип аналізу	Static
Тепловий ефект	On
Тепловий варіант	Include temperature loads
Нульова температура деформації	298 Kelvin
Включає ефекти тиску рідини з SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Тип розв'язувача	Automatic
Ефект площини	Off
М'які пружини	Off
Інерційний рельєф	Off
Несумісні варіанти скріплення	Automatic
Великі переміщення	On
Тертя	Off
Використовуйте адаптивний метод	Off

Взято також до уваги, що в процесі відтворення виріб сприймає значні термічні навантаження, які після застигання як правило викликають певні дефекти форми. Оскільки постоброблення направлене переважно на усунення таких дефектів, проаналізовано температурні поля в момент формування виробу.

Результати моделювання. Побудова температурних полів (рис. 10), показала, що охолодження тестового призматичного зразка нерівномірне. Так температури залишаються достатньо стабільними всередині зразка, зі зростанням до площини викладання, де $T = 184...200$ °C. Внаслідок нерівномірного охолодження найбільше усадження спостерігається на певній відстані від площини викладання, що підтверджує припущення щодо існування критичного шару біля поверхні викладання, про яку зазначено в [25]. Окрім того, теплопередача у бік теплопоглинання веде до швидкого охолодження зовнішнього шару на 85...90 °C (рис. 10, б).

Отримання картин деформацій, напружень і переміщень (рис. 11–13) дозволило зробити висновок, що докладені зусилля переважно локалізується у точці біля силового впливу (рис. 11); однак деформації (рис. 12) та переміщення (рис. 13) поширюються на значну відстань: з боку дії різального клина значні деформації спостерігаються на 6...8 волокнах, однак вглиб матеріалу при поверхневому контакті вони обмежуються двома-трьома шарами.

Отримання перерізів у точці прикладання сили (рис. 14), доводить, що перерозподіл напружень відбувається як між волокнами у контактному шарі, так між шарами.

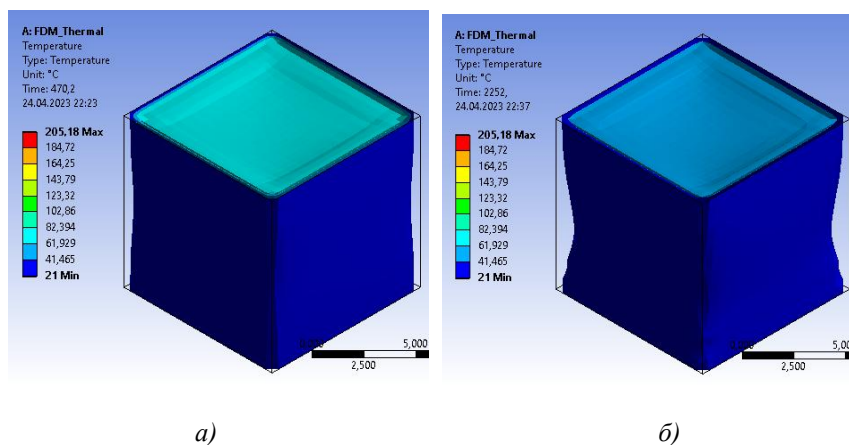


Рис. 10. Картина теплових полів при друкуванні тестового кубика (а) та деформування виробу при його застиганні (б)

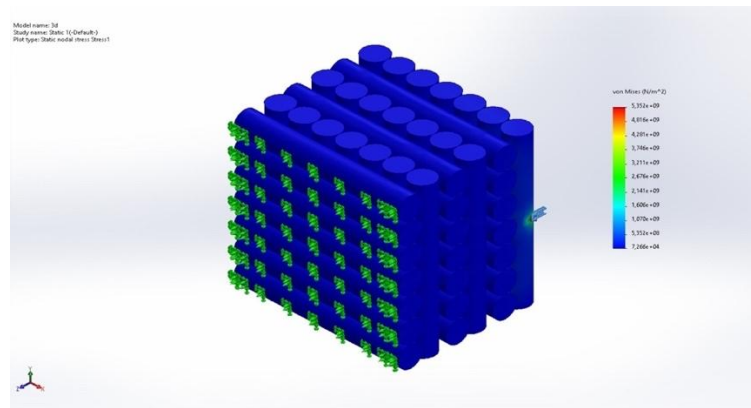
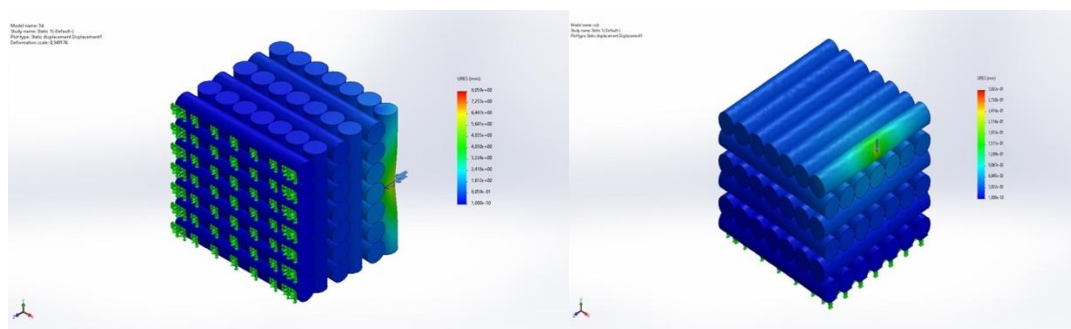


Рис. 11. Картини деформацій від силового точкового навантаження зразка



а)

б)

Рис. 12. Картини переміщень елементів тіла з боку дії сил: у вертикальному перерізі (а) та у площини викладання філамента (б)

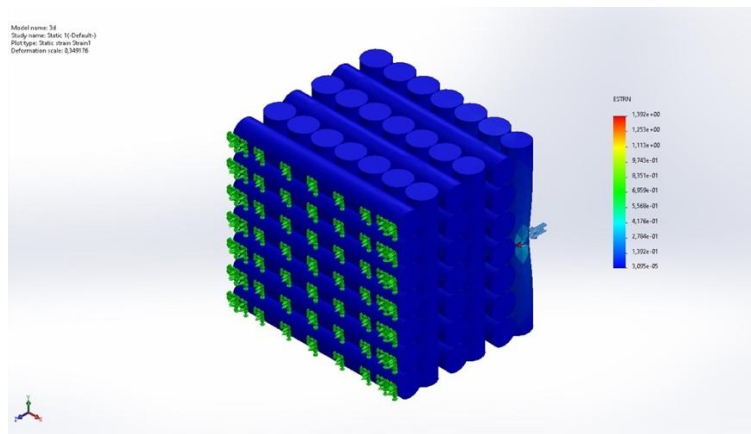
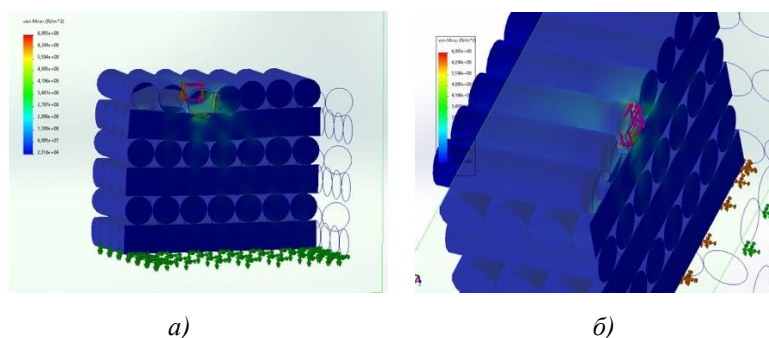


Рис. 13. Напруження у точці силового навантаження, локалізовані в одному шарі



а)

б)

Рис. 14. Перерозподіл напружень між волокнами та шарами (а); поширення напружень у волокні вздовж лінії дії сили (б)

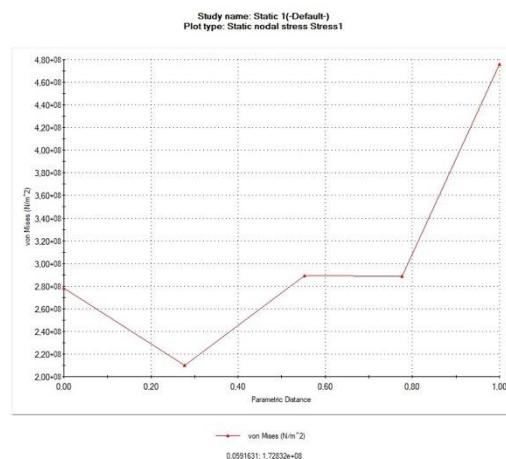


Рис. 15. Розподіл напружень між волокнами у шарі, що безпосередньо сприймає навантаження різання

Окрім того, волокно, на яке безпосередньо діє сила, також має ділянки виникнення напружень, що можуть викликати пошкодження на певній відстані від точки прикладання сили (рис. 14, б).

Перерозподіл напружень між волокнами ілюструє рисунок 15 (по горизонталі прийнято відносне віддалення від точки прикладання навантаження), з якого стає очевидним, що існують ділянки, в яких напруження істотно відрізняються від областей дії зосередженої сили різання. Перехід до абсолютних значень відповідно до рисунка 7 доводить, що за умови сталого рівня міцності σ_a ділянок зчеплення на міжволоконному та міжплощинному рівні поширення деструкції слід очікувати у межах 2...3 волокон; наявність різного роду дефектів та зміна σ_a веде до збільшення розмірів ділянки деструкції.

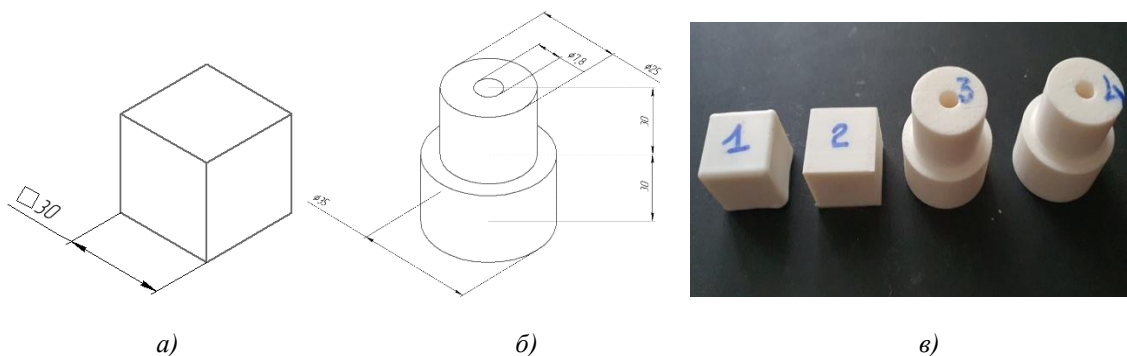
Тож можна очікувати, що зменшення зони силового навантаження призведе до поліпшення якості обробки шляхом локалізації силового впливу; водночас випереджаюча деформація та викривлення волокон перед зоною різання обумовлюватиме появу деструктивного шару, мінімізація якого вбачається у зменшенні величини сили різання.

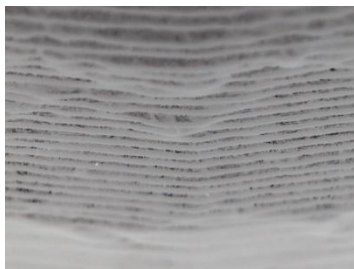
Отже, постоброблення виробів, отриманих FDM-принтингом, має проводитися із мінімальним силовим навантаженням гострозаточеним інструментом; рівень шорсткості R_z визначатиметься на основі стандартних методик із врахуванням можливого порушення адгезивного зчеплення волокон і шарів між собою.

Необхідні додаткові дослідження процесу, направлені на встановлення закономірностей сприйняття навантаження різання різними матеріалами, з урахуванням їх реологічних властивостей. Окрім того, потрібне подальше вивчення особливостей обробки виробів у різних площинах викладання, оскільки рівняння (5–13) свідчать про істотні відмінності механічних властивостей, зокрема, σ_{zz} , σ_{xx} , σ_{yy} , відповідні значення ε_z , ε_x , ε_y .

Експериментальна перевірка. Типовий виріб з геометричними розмірами $L \times B \times H$ та тіло діаметром D наведено на рисунку 16. Такі розміри обирали з метою швидкого прототипування та можливостей зміни параметрів друку при використанні простих принтерів, зокрема, принтера «CREALITY K1C». Під час друку використовували сопло діаметром 0,4 мм, температура викладання – $T_e = 220^\circ\text{C}$, товщина шару – 0,12 мм. Це дозволяло отримувати досить щільні структури (рис. 16, з), що достатньо точно визначається (1).

Результати експериментальних випробувань наведені у таблиці 5. Зважаючи на те, що шліфування, яке реалізує мікрорізання, також належить до механічного оброблення, провели досліді також і цього способу обробки.





e)

Рис. 16. Геометричні розміри тестових зразків (а, б), їх фото (в) та структури викладеного матеріалу (г) в процесі відтворення

Таблиця 5

Аналізовані процеси постоброблення адитивних виробів

Процес	Схема різання	Використаний інструмент	Режими різання	Параметри поверхні (мкм)
Точіння	ТОЧІННЯ	Різець прохідний упорний Т15К6 Пластина ромбічної форми з кутом 55 °	Кількість обертів 570 об/хв, подача 0,14 мм/об, глибина різання 0,2 мм	$R_a = 3,0 \dots 3,6$ $R_z = 20 \dots 40$
Фрезерування	ФРЕЗЕРУВАННЯ	Торцева фреза, 4 пластини механічного кріплення, Т15К6	Подача 71 мм/хв; кількість обертів 800 об/хв, глибина різання 0,2 мм	$R_a = 1,9 \dots 2,2$ $R_z = 20 \dots 80$
Свердлування	СВЕРДЛУВАННЯ	Свердло D = 0,8 мм; Р6М5	Кількість обертів 570 об/хв подача 0,5 мм/с	$R_a = 3,0 \dots 3,6$ $R_z = 20 \dots 40$
Шліфування	ШЛІФУВАННЯ	Білий електрокорунд 25 А, діаметр круга 250 мм	Частота обертання 3000 хв ⁻¹ ; подача 100 мм/с	$R_a = 1,3 \dots 1,6$ $R_z = 10 \dots 20$

З представлених результатів очевидно, що використання гострозаточених інструментів із кутами загострення: передній кут 10 °, задній 15 ° дозволяє отримувати досить високу якість поверхневого шару на матеріалі PLA.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті проведених досліджень встановлено закономірності напружено-деформованого стану заготовки, отриманої адитивним відтворенням, в процесі взаємодії різального клина з поверхнею. Показано, що для випадку моделювання створеної адитивними процесами заготовки необхідне врахування порожнистості тіла заготовки, а також її шаруватість та компонентність. При цьому силовий вплив у вигляді дії верхівки різального клина на ділянку поверхні викликає перерозподіл напружень між нитками та шарами; при навантаженнях, властивих рекомендованим умовам різання матеріалів, зазвичай зони перерозподілу напружень, локальних

деформацій та переміщень локалізуються у 2...3 шарах матеріалу, відмінність напружень може сягати 50...70 %; в межах площини викладання пластику перерозподіл спостерігається між 3...5 нитками від центра дії сили. Для виробів, отриманих методом FDM, із використанням сопла 0,4 мм ця ділянка становить до 2,0...2,5 мм в площині столу та до 0,5 мм вглиб матеріалу. При цьому температурні напруження, які створюються при викладанні пластику, можуть значно розширити таку ділянку.

Рекомендації щодо виконання постоброблення: в цілому вони схожі на обробки шаруватих полімерних композиційних матеріалів, з обмеженням силового впливу (потужності різання). Обробку слід виконувати різальним інструментом із загостреним клином з кутами $\alpha = 5...12^\circ$, $\gamma = 10...15^\circ$, $\varphi = 30...45^\circ$. Використання гострозаточених інструментів дозволяє отримувати досить високу якість поверхневого шару на матеріалі PLA: $R_a = 3,0...3,6$ мкм, $R_z = 20...40$ мкм при точінні, фрезеруванні та свердлінні.

Подальші дослідження повинні бути направлені на встановлення обумовленості параметрів поверхні використовуваним матеріалом, його реологічними властивостями.

Список використаної літератури:

1. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури : ДСТУ ISO 4287:2012.
2. Mechanical and physical properties of highly ZrO₂ / β -TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (Fdm) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application / A.M. Abdullah, T.N.A. Tuan Rahim, D.Mohamad and other // Materials Letters. – 2017. – Vol. 189. – P. 307–309. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.11.052.
3. Дзюра В.О. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Марущак. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. – 170 с.
4. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding / M.Lay and other // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 176. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107341.
5. Ramesh M. Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM / M.Ramesh, K.Panneerselvam // Materials Today: Proceedings. – 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.697.
6. Тімаренко О.В. Забезпечення якості поверхневого шару на етапі напівчистої обробки термопластичних полімерних матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / О.В. Тімаренко ; Національний технічний ун-т «Харківський політехнічний ін-т». – Х., 2008. – 20 с.
7. Підвищення ефективності обробки композиційних матеріалів застосуванням гібридного інструменту / О.Ф. Саленко, І.В. Шепеленко, Р.Ф. Будар Мохамед та ін. – 2020.
8. Manufacture of centrifugal compressor impeller using FDM and investment casting / C.M. Choe, W.C. Yang, U.H. Kim and other // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 118, № 1/2. – P. 173–181.
9. On achieving accuracy and efficiency in additive manufacturing: requirements on a hybrid CAM system / K.Michael, M.Servos, P.Stief and other. – 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.265.
10. Hashmi A.W. The Surface Quality Improvement Methods for FDM Printed Parts: A Review / A.W. Hashmi, H.S. Mali, A.Meena // Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. Materials Forming, Machining and Tribology ; in H.K. Dave, J.P. Davim (eds). – Cham : Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-68024-4_9.
11. Castro-Casado D. Chemical treatments to enhance surface quality of FFF manufactured parts: a systematic review / D.Castro-Casado // Progress in Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 6, № 2. – P. 307–319.
12. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review / T.J. Gordelier, P.R. Thies, L.Turner, L.Johanning // Rapid Prototyping Journal. – 2019. – Vol. 25, No. 6. – P. 953–971. DOI: 10.1108/RPJ-07-2018-0183.
13. Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review / F.Tamburrino, S.Barone, A.Paoli, A.V. Rationale // Virtual and Physical Prototyping. – 2021. – Vol. 16, № 2. – P. 218–251.
14. Singh R. Experimental investigations for surface roughness and dimensional accuracy of FDM components with barrel finishing / R.Singh, A.Trivedi // Proce Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. – 2017. – Vol. 87, № 3. – P. 455–463.
15. Damage Mechanisms of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method / O.Salenko, D.Dzhulii, V.Drahobetskyi and other // Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023 : Lecture Notes in Mechanical Engineering ; in V.Ivanov, I.Pavlenko, O.Liaposhchenko and other (eds). – Cham : Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-32774-2_27.
16. Gordeev E.G. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling / E.G. Gordeev, A.S. Galushko, V.P. Ananikov // PLoS ONE. – 2018. – Vol. 13 (6). DOI: 10.1371/journal.pone.0198370.
17. Improvement of tensile and flexural properties of 3D printed PEEK through the increase of interfacial adhesion / P.Rendas and other // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 93. – P. 260–274.
18. A Review on Multiplicity in Multi-Material Additive Manufacturing: Process, Capability, Scale, and Structure / A.Verma, A.Kapil, D.Klobčar, A.Sharma // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 15. DOI: 10.3390/ma16155246.
19. Bisheh M.N. A layer-by-layer quality monitoring framework for 3D printing / M.N. Bisheh, S.I. Chang, S.Lei // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Vol. 157. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107314.
20. Karakurt I. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing / I.Karakurt, L.Lin // Current Opinion in Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28. – P. 134–143. DOI: 10.1016/j.coche.2020.04.001.

21. Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Densit / P.Platek, K.Rajkowski, K.Cieplak and other // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, № 9. DOI: 10.3390/polym12092120.
22. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additivelymanufactured thick coatings: a review / P.Zhang, Z.Liu, J.Du and other // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 53. – P. 123–143.
23. Increasing the Strength of Thin-walled Products Obtained by FDM Using the Thin Surface Films / M.Zagirnyak, O.Salenko, W.Alnusirat and other // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2024. – Vol. 1 (3). – P. 291–294. DOI: 10.15199/48.2024.03.52.
24. Hashmi A.W. Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: a review / A.W. Hashmi, H.S. Mali, A.Meena // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 81, Part 2. – P. 723–738. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.223.
25. Oskolkov A.A. Mathematical Model of the Layer-by-Layer FFF/FGF Polymer Extrusion Process for Use in the Algorithm of Numerical Implementation of Real-Time Thermal Cycle Control / A.A. Oskolkov, I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15. DOI: 10.3390/polym15234518.
26. Combined thermal and particle shape effects on powder spreading in additive manufacturing via discrete element simulations / S.Roy and other // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 445.
27. Advancements in 3D printing materials: A comparative analysis of performance and applications / R.Subramani, M.A. Mustafa, G.K. Ghadir and other // *Applied Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 7, № 2.
28. Hozdić E. Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM- and SLA-Printed ABS Materials / E.Hozdić // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 2. DOI: 10.3390/app14020649.
29. On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders: A Review / E.L. Papazoglou, N.E. Karkalos, P.Karmiris-Obratański and other // *Arch Computat Methods Eng*. – 2022. – Vol. 29. – P. 941–973. DOI: 10.1007/s11831-021-09601-x.
30. FDM Products Strength Increasing Using the Algorithmic Means of 3-D Printers Working / O.Salenko, M.Zagirnyak, V.Orel and other // *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. – Kremenichuk, 2022. – P. 1–5. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.100056.
31. Learning-based error modeling in FDM 3D printing process / P.Charalampous, I.Kostavelis, T.Kontodina, D.Tzovaras // *Rapid Prototyping Journal*. – 2021. – Vol. 27, No. 3. – P. 507–517. DOI: 10.1108/RPJ-03-2020-0046.
32. Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts – A Critical Review / D.Syrlybayev, B.Zharylkassyn, A.Seisekulova and other // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 10. DOI: 10.3390/polym13101587.
33. On improving the surface finish of 3D printing polylactic acid parts by corundum blasting / A.P.V. Puerta, J.D. Lopez-Castro, A.O. López, S.R.F. Vidal // *Rapid Prototyping Journal*. – 2021. – Vol. 7. – P. 1398–1407. DOI: 10.1108/RPJ-05-2021-0105.
34. Вплив температури екструдованого філаменту на параметри міцності тонкостінних виробів / O.Саленко, B.Орел, Г.Габузян // *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : матеріали науково-технічної конференції*. – 2023. – № XXIII. – P. 185–189. DOI: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278904.
35. Hashmi A.W. Surface finish effects using coating method on 3D printing (FDM) parts / A.W. Hashmi, H.S. Mali, A.Meena // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 318, № 1. DOI: 10.1088/1757-899X/318/1/012065.

References:

1. DSTU ISO 4287:2012 *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury*.
2. Abdullah, A.M., Tuan Rahim, T.N.A., Mohamad, D. et al. (2017), «Mechanical and physical properties of highly ZrO₂ / β -TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (Fdm) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application», *Materials Letters*, Vol. 189, pp. 307–309, doi: 10.1016/j.matlet.2016.11.052.
3. Dziura, V.O. and Marushchak, P.O. (2021), *Tekhnolohichni metody zabezpechennia parametriv yakosti poverkhon til obertannia ta yikh profilometrychnyi kontrol*, FOP Palanytsia V.A., Ternopil, 170 p.
4. Lay, M. et al. (2019), «Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding», *Composites Part B: Engineering*, Vol. 176, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107341.
5. Ramesh, M. and Panneerselvam, K. (2020), «Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM», *Materials Today: Proceedings*, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.697.
6. Titarenko, O.V. (2008), «Zabezpechennia yakosti poverkhnevoho sharu na etapi napivchystovoi obrobky termoplastychnykh polimernykh materialiv», Abstract of Ph.D. dissertation, 05.03.01, Natsionalnyi tekhnichniy un-t «Kharkivskiy politekhnichniy in-t», Kh., 20 p.
7. Salenko, O.F., Shepelenko, I.V., Budar Mokhamed, R.F. et al. (2020), «Pidvyshchennia efektyvnosti obrobky kompozytsiynykh materialiv zastosuvanniam hibrydnoho instrumentu».
8. Choe, C.M., Yang, W.C., Kim, U.H. et al. (2022), «Manufacture of centrifugal compressor impeller using FDM and investment casting», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 118, No. 1/2, pp. 173–181.
9. Michael, K., Servos, M., Stief, P. et al. (2018), «On achieving accuracy and efficiency in additive manufacturing: requirements on a hybrid CAM system», doi: 10.1016/j.procir.2018.03.265.
10. Hashmi, A.W., Mali, H.S. and Meena, A. (2021), «The Surface Quality Improvement Methods for FDM Printed Parts: A Review», in Dave, H.K., Davim, J.P. (ed.), *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. Materials Forming, Machining and Tribology*, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-68024-4_9.
11. Castro-Casado, D. (2021), «Chemical treatments to enhance surface quality of FFF manufactured parts: a systematic review», *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 6, No. 2, pp. 307–319.

12. Gordelier, T.J., Thies, P.R., Turner, L. and Johanning, L. (2019), «Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25, No. 6, pp. 953–971, doi: 10.1108/RPJ-07-2018-0183.
13. Tamburrino, F., Barone, S., Paoli, A. and Rationale, A.V. (2021), «Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review», *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 16, No. 2, pp. 218–251.
14. Singh, R. and Trivedi, A. (2017), «Experimental investigations for surface roughness and dimensional accuracy of FDM components with barrel finishing», *Proce Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, Vol. 87, No. 3, pp. 455–463.
15. Salenko, O., Dzhulii, D., Drahobetskyi, V. et al. (2023), «Damage Mechanisms of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method», in Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O. et al. (ed.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-031-32774-2_27.
16. Gordeev, E.G., Galushko, A.S. and Ananikov, V.P. (2018), «Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling», *PLoS ONE*, Vol. 13 (6), doi: 10.1371/journal.pone.0198370.
17. Rendas, P. et al. (2023), «Improvement of tensile and flexural properties of 3D printed PEEK through the increase of interfacial adhesion», *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 93, pp. 260–274.
18. Verma, A., Kapil, A., Klobčar, D. and Sharma, A. (2023), «A Review on Multiplicity in Multi-Material Additive Manufacturing: Process, Capability, Scale, and Structure», *Materials*, Vol. 16, No. 15, doi: 10.3390/ma16155246.
19. Bisheh, M.N., Chang, S.I. and Lei, S. (2021), «A layer-by-layer quality monitoring framework for 3D printing», *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 157, doi: 10.1016/j.cie.2021.107314.
20. Karakurt, I. and Lin, L. (2020), «3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing», *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 134–143, doi: 10.1016/j.coche.2020.04.001.
21. Piatek, P., Rajkowski, K., Cieplak, K. et al. (2020), «Deformation Process of 3D Printed Structures Made from Flexible Material with Different Values of Relative Density», *Polymers*, Vol. 12, No. 9, doi: 10.3390/polym12092120.
22. Zhang, P., Liu, Z., Du, J. et al. (2020), «On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively manufactured thick coatings: a review», *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 53, pp. 123–143.
23. Zagirnyak, M., Salenko, O., Alnusirat, W. et al. (2024), «Increasing the Strength of Thin-walled Products Obtained by FDM Using the Thin Surface Films», *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 1 (3), pp. 291–294, doi: 10.15199/48.2024.03.52.
24. Hashmi, A.W., Mali, H.S. and Meena, A. (2023), «Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: a review», *Materials Today: Proceedings*, Vol. 81, Part 2, pp. 723–738, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.223.
25. Oskolkov, A.A., Bezukladnikov, I.I. and Trushnikov, D.N. (2023), «Mathematical Model of the Layer-by-Layer FFF/FGF Polymer Extrusion Process for Use in the Algorithm of Numerical Implementation of Real-Time Thermal Cycle Control», *Polymers*, Vol. 15, doi: 10.3390/polym15234518.
26. Roy, S. et al. (2024), «Combined thermal and particle shape effects on powder spreading in additive manufacturing via discrete element simulations», *Powder Technology*, Vol. 445.
27. Subramani, R., Mustafa, M.A., Ghadir, G.K. et al. (2024), «Advancements in 3D printing materials: A comparative analysis of performance and applications», *Applied Chemical Engineering*, Vol. 7, No. 2.
28. Hozdić, E. (2024), «Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM- and SLA-Printed ABS Materials», *Applied Sciences*, Vol. 14, No. 2, doi: 10.3390/app14020649.
29. Papazoglou, E.L., Karkalos, N.E., Karmiris-Obratański, P. et al. (2022), «On the Modeling and Simulation of SLM and SLS for Metal and Polymer Powders: A Review», *Arch Computat Methods Eng*, Vol. 29, pp. 941–973, doi: 10.1007/s11831-021-09601-x.
30. Salenko, O., Zagirnyak, M., Orel, V. et al. (2022), «FDM Products Strength Increasing Using the Algorithmic Means of 3-D Printers Working», *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, pp. 1–5, doi: 10.1109/MEES58014.2022.100056.
31. Charalampous, P., Kostavelis, I., Kontodina, T. and Tzovaras, D. (2021), «Learning-based error modeling in FDM 3D printing process», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 507–517, doi: 10.1108/RPJ-03-2020-0046.
32. 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.
33. Puerta, A.P.V., Lopez-Castro, J.D., López, A.O. and Vidal, S.R.F. (2021), «On improving the surface finish of 3D printing polylactic acid parts by corundum blasting», *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7, pp. 1398–1407, doi: 10.1108/RPJ-05-2021-0105.
34. Salenko, O., Orel, V., Habuzian, H. et al. (2023), «Vplyv temperatury ekstrudovanoho filamentu na parametry mitsnosti tonkostinnykh vyrobiv», *Prohresyva tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita*, materialy naukovy-tekhnichnoi konferentsii, No. XXIII, pp. 185–189, doi: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278904.
35. Hashmi, A.W., Mali, H.S. and Meena, A. (2018), «Surface finish effects using coating method on 3D printing (FDM) parts», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 318, No. 1, doi: 10.1088/1757-899X/318/1/012065.

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

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

Наукові інтереси:

- адитивні технології;
- обробка композиційних матеріалів.

Козловська Тетяна Федорівна – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ.

<https://orcid.org/0000-0002-6106-5524>.

Наукові інтереси:

– фізико-хімічні та фізико-механічні особливості процесів адсорбції органічних і неорганічних речовин складних технологічних процесів.

Саленко Олександр Федорович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-5685-6225>.

Наукові інтереси:

- обробка високоенергетичними методами;
- функціонально орієнтований підхід.

Мельничук Петро Петрович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0003-0361-756X>.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Orel V.M., Kozlovs'ka T.F., Salenko O.F., Melnychuk P.P.

Post-processing of engineering products obtained by additive layer modelling

The article investigates the influence of mechanical post-treatment on the geometric and physical and mechanical characteristics of products manufactured by additive layer modelling (in particular, FDM). The mechanisms of formation of the defective layer arising from the hollow, anisotropic structure of the material, as well as temperature and force loads are considered. For the case of modelling a workpiece created by additive processes, it is necessary to take into account the hollowness of the workpiece body, as well as its layering and componentry. On the basis of numerical modelling, the stress-strain state of the workpiece during cutting, as well as the peculiarities of the distribution of deformations and stresses between fibres and layers, are determined. The influence of the cutting tool geometry, cutting modes, and structural features of the PLA material on the quality of the machined surface was investigated. Experimental tests of various post-processing methods were carried out i.e., turning, milling, drilling, and grinding. The obtained results confirm the need to limit cutting forces and use sharpened tools. Practical recommendations for optimising the post-processing of FDM-printed products are proposed. Prospects for further research, in particular, in the direction of taking into account the rheological properties of materials, are indicated.

Keywords: additive manufacturing; FDM; post-processing; mechanical properties; stresses; modelling; surface layer.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2025.