

ВПЛИВ МЕТОДІВ ПОСТОБРОБЛЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ РОЗМІРІВ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Демчук Б. В.¹, Драч І. В.²

Хмельницький національний університет

E-mail: ¹demchukbv@khmnu.edu.ua, ²drachil@khmnu.edu.ua

Анотація. У огляді проаналізовано ефективність різних методів постоброблення (хімічних, термічних, механічних та комбінованих) для виробів, виготовлених методами адитивного виробництва. Розглянуто вплив оброблення парами розчинників, термічного відпалу, нанесення покриттів та відцентрової галтовки на шорсткість поверхні та механічні властивості матеріалів ABS, PLA, та PEEK. Означено оптимальні режими для підвищення експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: адитивні технології, полімери, міжшарові властивості, постобробка, термічний відпал, шорсткість поверхні, механічна міцність.

Адитивні технології дозволяють створювати деталі складної геометрії, проте часто поступаються традиційним методам за якістю поверхні та механічною міцністю через шарувату структуру та наявність пор. Тому актуальним завданням є пошук ефективних методів постоброблення, які дозволяють нівелювати ці недоліки. У цьому огляді узагальнено результати експериментальних досліджень щодо покращення властивостей полімерних матеріалів.

Для деталей з ABS ефективним методом є оброблення парами ацетону. У дослідженні [1] було встановлено, що цей процес дозволяє досягати вищої розмірної точності, незважаючи на більшу товщину шару (0,20 мм проти 0,15 мм). Зразки ABS були поміщені в ацетоновий туман, що утворювався в контрольованих умовах, з метою покращення механічних властивостей матеріалу. Дослідження кінетики процесу показало, що короткочасна обробка (до 35 с) дозволяє суттєво знизити шорсткість поверхні.

Процес проходить у три стадії: початкове збільшення шорсткості (R_a зростає з 5,3 до 8,5 мкм), перехідний етап, коли починається гомогенізація поверхні, та фінальна стадія, де шорсткість зменшується до $R_a = 0,571$ мкм. При цьому спостерігається незначне зниження границі міцності (UTS) та модуля Юнга (на 9 % та 19 %, відповідно), проте зростає відносне видовження (з 4,7 % до 6,1 %), що свідчить про пластифікацію поверхневого шару та зменшення ймовірності крихкого руй-

нування. Цей підхід засвідчує ефективність хімічної обробки для покращення шорсткості поверхні деталей з ABS.

Для високоміцних композитів на основі поліфеніленсульфіду (PPS), армованого безперервним вуглецевим волокном, у [2] запропоновано комбінований підхід: модифікацію волокон наночастинками кремнезему/полідофаміном (PDA/NPs) та постоброблення гарячим пресуванням. У рамках цього дослідження було виявлено, що попереднє оброблення вуглецевих волокон приводить до покращення адгезії на межі «волокно–матриця», що є критично важливим для поліпшення механічних характеристик композиту. Коли волокна піддаються такому обробленню, спостерігається збільшення міцності на згин на 27 % порівняно з необробленими зразками. Крім того, постоброблення з використанням методів гарячого пресування дозволила зменшити пористість з 10,2 % до 3,4 %, що суттєво покращило міжшарову міцність на зсув (ILSS) до 24,73 МПа. Встановлено, що комбінований підхід до обробки забезпечує не лише поліпшення механічних характеристик, але й підвищення довговічності композитів в умовах експлуатації.

Для PLA-пластику авторами [3] досліджено суміщення процесів термічного відпалу та полімеризації порошкового покриття в одному циклі (120°C). Встановлено, що оптимальний час витримки становить близько 11 хв. Це забезпечує зростання механічної міцності (зусилля руйнування зросло з ~260 Н до ~478 Н) за рахунок кращої дифузії полімерних ланцюгів між шарами. Після термічного відпалу, який сприяє кристалізації і зменшенню залишкових напружень, порошкове покриття забезпечує гладку, глянцеvu поверхню, що підвищує захист деталей від навколишнього середовища і покращує їх естетичні характеристики. Наявність порошкового покриття також значно зменшує видимість швів, притаманних FDM-друку.

Дослідження впливу температури відпалу (120–180 °C) та статичного одновісного навантаження на міцність ABS-деталей [4] показало, що домінуючим фактором є температура. Вплив початкового статичного навантаження виявився статистично незначущим для оснастки, яка утримувала шість зразків одночасно, підтримуючи їх форму за допомогою сепараторів. Максимальний приріст міцності на розрив (на 89 %, до 34,22 МПа) досягається при 160 °C, що наближає показники друкованих деталей до литих (40 МПа).

Результати дослідження [4] показують, що при температурі 180 °C деталі розм'якшуються, що призводить до втрати геометричної цілісності. Це свідчить про необхідність оптимізації температурних режимів

для досягнення максимальних механічних характеристик без ризику деформації деталей.

Для високотехнологічного пластику PEEK ефективним методом зниження хвилястості поверхні є відцентрове дискове галтування (CDFP). У [5] було проаналізовано вплив шести різних параметрів: типу та кількості абразивного середовища, швидкості обертання галтування, кількості води, використання спеціальної добавки (compound) та тривалості оброблення – на зменшення хвилястості поверхні та втрату ваги зразків PEEK, надрукованих методом FDM. Виявлено, що тип абразиву, швидкість та час оброблення значно впливають на зменшення хвилястості, а також на шорсткість кутів і усунення задирок.

Результати дослідження [5] підтвердили, що CDFP є ефективним методом для покращення якості поверхні 3D-друкованих деталей, дозволяючи досягти зменшення хвилястості на 98 % навіть при неоптимальних параметрах і підкреслюючи важливість правильного підбору абразиву та режимів оброблення для отримання бажаного результату.

Висновки. Аналіз сучасних методів постоброблення показав, що ефективність технологічних процесів для деталей, виготовлених адитивними методами, значною мірою залежить від правильно обраних режимів оброблення. Хімічне оброблення, до прикладу, оброблення парами ацетону для ABS, дозволяє значно покращити якість поверхні та знизити шорсткість, водночас дещо негативно впливаючи на механічні властивості матеріалу. Термічний відпал, як для ABS, так і для PLA, сприяє кристалізації та зменшенню залишкових напружень, що підвищує міцність на розрив та зсув, особливо при оптимальному температурному режимі. Механічні методи, такі як дискове галтування для PEEK, ефективні для покращення естетичних характеристик та зменшення хвилястості поверхні. Комбіновані підходи, що поєднують термічний відпал, покриття чи модифікацію волокон з пресуванням, демонструють синергетичний ефект, одночасно покращуючи як механічні, так і поверхневі властивості виробів. Загалом, зазначимо, що результати досліджень підкреслюють важливість оптимізації умов постоброблення для кожного матеріалу, щоб максимально підвищити експлуатаційні характеристики деталей та забезпечити баланс між якістю поверхні і механічною міцністю.

Список використаних джерел

1. Janostik V., Cvek M., Pata V., Senkerik V., Ovsik M. Design and surface enhancement of ABS parts manufactured by Arburg plastic freeforming

(APF) using chemical vapor treatment. *Materials and Design* 2025, 253, 113940. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113940>

2. Lyu Y., Li A., Wu J., Koutsos V., Wang C., Br̄daigh C., Yang D. Enhanced mechanical performance of 3D printed continuous carbon fibre reinforced polyphenylene sulphide composites through dopamine treatment and post-processing compression. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2025, 190, 108627. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa./2024.108627>

3. Jovanović J., Đukanović M., Radunović L., Rogić Vuković S., Jovanović M. Enhanced Mechanical Properties and Surface Finish of PLA 3D Prints via Combined Heat Annealing and Powder Coating. *Applied Sciences* 2025, 15(17), 9338. URL: <https://doi.org/10.3390/app15179338>

4. Rane R., Kulkarni A., Prajapati H., Taylor R., Jain A., Chen V. Post-Process Effects of Isothermal Annealing and Initially Applied Static Uniaxial Loading on the Ultimate Tensile Strength of Fused Filament Fabrication Parts. *Materials* 2020, 13 (2), 352. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13020352>

5. Zentgraf J., N̄tzel F., M̄hlbauer N., Schultheiss U., Grad M., Schratzenstaller T. Surface Treatment of Additively Manufactured Polyetheretherketone (PEEK) by Centrifugal Disc Finishing Process: Identification of the Key Parameters. *Polymers* 2024, 16(16), 2348. URL: <https://doi.org/10.3390/polym16162348>