

КУШНІРЧУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5445-7378>e-mail: kyshnir98@gmail.com

ТКАЧУК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>e-mail: tkachukvi@khmnu.edu.ua

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ТОЧНІСТЬ РОЗМІРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ FDM ДРУКОМ, ЩО ОБРОБЛЮЮТЬСЯ ТОЧІННЯМ ТА ФРЕЗЕРУВАННЯМ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

В роботі розглянуто вплив режимів різання на точність розмірів оброблюваних заготовок при точінні та фрезеруванні з урахуванням пружних деформацій її поверхні. Проведено аналітично аналіз впливу режимів різання при точінні та фрезеруванні пластмасових заготовок, отриманих після FDM друку, на точність виконання відповідальних поверхонь. Побудовано діаграми зміни сил різання для точіння та фрезерування при чистовому та чорновому видах оброблення з яких визначено величини пружної деформації оброблених поверхонь. Для перевірки отриманих результатів було виготовлено FDM друком деталь складної форми «Робоче колесо» та за допомогою механічної обробки різанням (токарна, фрезерна) оброблено приєднувальні поверхні, для яких точність після друку є не достатня, що було виявлено вимірюванням відповідальних поверхонь. Після проведення механічного оброблення відповідних поверхонь було проведено вимірювання отриманої точності розмірів. Результати вимірювань показали розбіжність отриманих геометричних параметрів але вони знаходяться у допуску на відповідні розміри.

Ключові слова: режими різання, пружні деформації поверхні, точність розмірів, точіння, фрезерування.

KUSHNIRCUK ANDRIY, TKACHUK VITALIY

Khmelnitskyi National University

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CUTTING MODES ON THE ACCURACY OF THE DIMENSIONS OF THE MACHINED BLANKETS DURING TURNING AND MILLING WITH ACCOUNTING FOR ELASTIC DEFORMATIONS OF ITS SURFACE

The quality of the resulting surface of elements manufactured by printing is a factor that determines their use in various areas, from prototyping to mass production, to eliminating workpiece defects, reducing surface roughness and adapting the shape of the part to technical requirements. However, the process uses several variables with a wide range of values, for example, the choice of turning tools, milling cutters including the material of the cutting inserts, the choice of cutting parameters and the determination of processing conditions. Conducting an analytical analysis of the influence of cutting modes of plastic parts after FDM printing, in connection with the emergence of new plastic materials, on the accuracy of the surfaces processed by turning and milling, taking into account elastic deformations of the workpiece surface, with the determination of technological parameters of the processes of turning and milling on CNC machines is an urgent task. The influence of cutting modes on the accuracy of the dimensions of the workpieces processed during turning and milling, taking into account elastic deformations of its surface, is considered. An analytical analysis of the influence of cutting modes during turning and milling of plastic blanks obtained after FDM printing on the accuracy of execution of critical surfaces was carried out. Diagrams of changes in cutting forces during turning and milling during finishing and roughing types of processing were constructed, from which the values of elastic deformations of the processed surfaces were determined. To verify the obtained results, a part of a complex shape "Improvement" was manufactured using the FDM printing method and the connecting surfaces were processed using mechanical cutting (turning, milling), for which the accuracy after printing was insufficient, which was revealed by measuring the corresponding surfaces. After mechanical processing of the corresponding surfaces, the obtained dimensional accuracy was measured. The measurement results showed a slight discrepancy between the obtained geometric parameters, but they are within the tolerance limits for the corresponding dimensions.

Keywords: cutting modes, elastic deformations of the surface, dimensional accuracy, turning, milling.

Постановка проблеми

Аддитивні технології (Additive Manufacturing – від слова адитивність) – це пошарове нарощування та синтез об'єкта за допомогою комп'ютерних 3D-технологій. У сучасній промисловості це кілька різних процесів, в результаті яких моделюється 3D-об'єкт. Технологічний прогрес сприяє виробленню безлічі корисних речей для побуту, здоров'я та безпеки людини наприклад адитивні технології в машинобудуванні та авіабудуванні допомагають створювати більш високо економічний і легкий по вазі авіатранспорт, при цьому його аеродинамічні властивості зберігаються у повному обсязі.

Основними напрямками розвитку машинобудування в даний час є: застосування нових полімерних, композиційних, інтелектуальних матеріалів під час виробництва деталей машин; розробка нових технологічних методів, обладнання та процесів виробництва виробів машинобудування. Першим шагом на шляху створення машини є просторове проектування виробів машинобудування із застосуванням комп'ютерних віртуальних цифрових тривимірних моделей, що стало можливо завдяки впровадженню сучасного програмного забезпечення (САД-програми), моделювання та розрахунків (САЕ). Впровадження технологій «тривимірного друку» (3D-друк) забезпечує можливість створення деталі машини чи виробу в цілому на основі розробленої 3D-моделі в найкоротші терміни та з мінімальними втратами матеріалів.

Аналіз останніх публікацій

Якість отриманої поверхні елементів, виготовлених за допомогою друку, є фактором що визначає їх використання в різноманітних сферах, від створення прототипів до масового виробництва, до усунення недоліків заготовки, зменшення шорсткості поверхні та адаптування форми деталі до технічних вимог.

Відповідно до технічних вимог друковані елементи можуть бути оброблені, наприклад, фрезеруванням або точінням.

Поєднання технології 3D-друку та традиційної обробки відоме як гібрид механічної обробки. Додавання етапу обробки є поширеним рішенням для збільшення якості виготовлених елементів. Тим не менш, процес використовує кілька змінних з широким діапазоном значень, наприклад, вибір токарного інструменту, фрез в тому числі матеріал різальних пластини, вибір параметрів різання та визначення умов обробки.

Ці змінні визначають досягнення припущених значень номіналу об'єкта, кінцеві розміри та параметри геометричної структури поверхні (шорсткість, хвилястість, відхилення форми). Ці властивості впливають на функціональність обробленої поверхні, межу втоми, зносостійкість, стійкість до корозії, змащування, тертя.

Автори [1-3] вказують на необхідність обробки, коли функціональні потреби по вимогам до виробу не відповідають, наприклад, через низьку шорсткість поверхні або розмірну неточність. Такі неточності зумовлені низкою факторів, включаючи усадку, пружні деформації, кут прикладання (вертикальні стінки дуже близькі до номінального розміру, тоді як повністю горизонтальні стінки відхиляються на кілька десятих міліметра), товщина шару, в'язкість середовища, похибка хорди, усадка, задирки, структура і вид наповнювача.

Автори [4] вивчали, шорсткість та утворення задирок після виготовлення 3D-друку. Вони дійшли висновку, що для отримання більш гладкої поверхні потрібно використання меншої швидкості подачі та глибини різання разом із більшими обертами шпинделя.

Параметр шорсткості вважається ключовим фактором, що впливає на продуктивність компонентів машини. Це також фактор, який впливає на зародження втомні тріщини. Шорсткість поверхні включає в себе нерівності поверхні, викликані головним чином типом обробки або процесом виготовлення заготовки. Щоб покращити геометричну точність і досягнення необхідної якості поверхні елементів, вони іноді формуються за допомогою механічної обробки. Оброблюваність матеріалу PETG залежить від виду процесу та механічних властивостей пластмас. Використання гібридної технології дозволило інтегрувати виробничі процеси, тобто 3D-друк і токарна, фрезерна обробка: 3D-друк забезпечив короткий час вироблення та мінімізував відходи, а під час обробки компенсуються недосконалості та відмінності розмірів. Поєднання двох процесів забезпечило більшу універсальність і ширший діапазон можливостей [5, 6].

Характеристики обробки металів фрезами дуже схожі на характеристики обробки пластмас. Однак їх структура і склад накладають додаткові особливості. Через відносно низьку щільність, міцність і твердість пластмас опір стисненню і зсуву при різанні низький, а сили різання набагато менші, ніж при обробці металів. Це дозволяє використовувати більш високі режими різання для обробки пластмас. При різанні термопластів у більшості випадків утворюється суцільна стружка, в той час як при різанні реактопластів утворюється подрібнена стружка, яка легко розлітається. При різанні пластмас на поверхнях тертя інструменту виникають відносно високі температури (до 500°C), що призводить до прилипання інструменту до заготовки. Це пов'язано з тим, що теплопровідність пластмас у кілька разів нижча, ніж у металів. Після обробки в поверхневому шарі деталі виникають залишкові напруження, які в поєднанні з напруженнями під час складання (наприклад, затягування болтів і гвинтів) часто призводять до появи невеликих поверхневих тріщин. Для зменшення залишкових напружень при обробці термопластів використовуються різні технічні методи: стиснення матеріалу в зоні свердління, бічне фрезерування, багатоопераційне свердління з мінімальним прихватом на останньому проході і, у випадку з термопластами, помірне нагрівання.

Термопласти обробляються на глибинах різання від 1 до 7 мм., подачах від 0,05 до 0,8 мм/зуб і швидкостях від 100 до 500 м/хв., в залежності від марки і типу обробки (чорнова, чистова). Якість обробки забезпечується використанням добре загостреного інструменту. Для підвищення якості обробки використовуються алмазні інструменти. Точність обробки термопластів і термореактивних матеріалів визначається методом обробки. Шорсткість поверхні залежить насамперед від матеріалу, що обробляється для реактопластів $Ra =$ від 10 до 2,5 мкм; для термопластів $Ra =$ від 2,5 до 0,63 мкм; для фрезерування реактопластів $Ra =$ від 5 до 1,25 мкм; для термопластів $Ra =$ від 5 до 0,63 мкм. [7, 8].

Мінімальна шорсткість і найвища точність обробленої поверхні деталей, які можна отримати за допомогою обробки різанням, коливаються в досить широких межах і залежать від великої кількості факторів. Головними з них є: марки оброблюваного та інструментального матеріалів, геометричні параметри та якість заточування ріжучого клина інструменту, режими різання, стан обладнання, швидкість різання та середня глибина різання.

Спроби механічного перенесення закономірностей процесу різання металів і рекомендацій щодо окремих видів їх обробки на процес різання пластмас, як показала практика, успіху не мали, оскільки пластмаси – особлива, порівняно з металами група матеріалів, що має специфічні властивості, що зумовлюють закономірності та особливості процесу їх різання. Склад та технологія отримання пластмас відмінні від складу та технології отримання металів, що й обумовлює специфіку їх властивостей. Пластмаси в порівнянні з

металами мають малу щільність, низькі механічні характеристики при великому їх коливанні, анізотропію властивостей, низькі теплостійкість і теплопровідність, тому збіг закономірностей процесу їх різання навіть теоретично очікувати неможливо.

Багато вітчизняних дослідників присвятили роботи на рекомендації по різанню пластмас та склопластиків [9-18]. В останні роки з'явилися роботи закордонних дослідників по обробленню пластмасових виробів, отриманих 3-D друком [19-37], але є частковий або відсутній аналіз впливу режимів різання та розбіжні рекомендації по впливу на точність отриманих параметрів оброблюваних поверхонь.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є проведення аналітичного аналізу впливу режимів різання пластмасових деталей після FDM друку, у зв'язку з появою нових пластмасових матеріалів, на точність оброблюваних поверхонь точінням та фрезеруванням з урахуванням пружних деформацій поверхні заготовки із визначенням технологічних параметрів процесів токарного точіння та фрезерування на верстатах з ЧПК.

Виклад основного матеріалу

Процес різання пластмас доцільно розглядати як самостійний, що має певні закономірності та специфіку. Вивчення та практичне використання закономірностей процесу різання пластмас дозволять керувати ним з метою підвищення продуктивності та ефективності обробки. Порівняння закономірностей процесу різання пластмас із закономірностями процесу різання металів необхідно для того, щоб врахувати їхню відмінність при обробці пластмас на металорізальних верстатах, при використанні металорізального інструменту та ін. Взаємодія різального інструменту та матеріалу заготовки з пластмаси представлено на рис. 1.

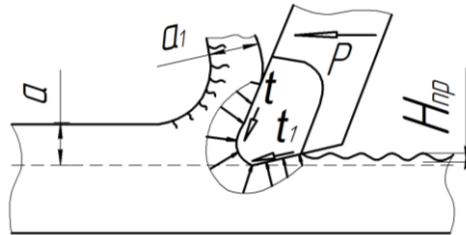


Рис. 1. Схема взаємодії різального інструменту та матеріалу заготовки з пластмаси: a – товщина припуску; a_1 – товщина зрізасного шару; P – сумарна сила різання; t_1 та t_2 – сили тертя по передній та задній поверхні інструмента; $H_{пр}$ – величина пружних відтискань матеріалу

При різанні матеріалу заготовок з пластмаси спостерігається пружна деформація матеріалу заготовки завдяки низькому модулю повздовжньої пружності $E = (1,4-2)$ МПа, що нижче на два порядки чим у металів. Завдяки чому матеріал заготовки, після проходження зони різання, відтискається на $H_{пр}$ – величину пружних відтискань рис. 1.

З метою аналізу впливу режимів різання на точність розмірів виготовлення поверхонь деталі, згідно допуску, врахуємо пружні деформації поверхні та відтискання, що оброблюється, згідно закону Гука (рис.1).

Розглянемо пласку модель взаємодії ріжучого клину інструменту з поверхнею, що оброблюється точінням на одиничній площині.

Для одиничної площі та довжини можна записати рівняння, згідно закону Гука:

$$F = E \cdot \Delta L, \quad (1)$$

де ΔL – величина пружної деформації поверхні;

$F = P_y (P_v)$ – сила, яка діє на поверхню і дорівнює певній силі різання;

E – модуль повздовжньої пружності, $E = (1,4 \div 2,0) \cdot 10^3$ МПа.

Введемо основні припущення:

1. В процесі різання точінням відбувається зрушення матеріалу об'єкту (різання) під дією сили P_z , а сила різання P_y створює зони пластичної пружної деформації, які відповідно дають зворотні пружні переміщення оброблюваних поверхонь, змінюючи розмір у більшу сторону, що виконується. Необхідно щоби вони були менше допуску на розмір, особливо на чистових переходах.

2. Врахуємо, що сили різання при точінні або при фрезеруванні залежать від різних факторів: глибини різання подачі, швидкості різання, обертів та конструктивних особливостей інструменту, зміни модулю повздовжньої пружності для різних видів пластмас.

Для процесу точіння силою, що створює пружні деформації та відтискання на поверхні заготовки буде сила P_y (рис. 2).

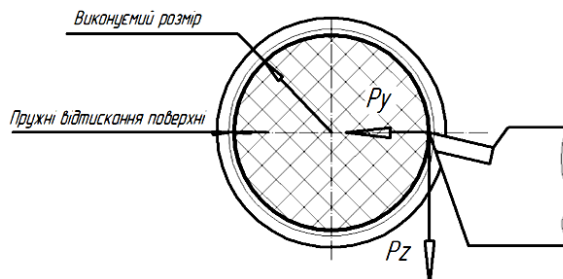


Рис. 2. Схема різання точінням матеріалу з пластмаси

Проведемо комплексний аналітичний аналіз впливу параметрів різання при точінні на зміну сили P_y . Розрахунки проводимо у програмному продукті Excel за формулою:

$$P_y = 10 \cdot C_p t^x S^y V^n K_p, \tag{2}$$

де $C_p = 35,5$ [8]; $X = 0,6$; $Y = 0,8$; $n = -0,3$; $K_p = 1$.

Розрахунки проведемо при зміні одного з параметрів при зафіксованих інших. Параметри режимів різання від чистового виду оброблення до чорнового виду змінюємо у межах:

- глибина різання $t = 0,5; 1; 1,5$ мм;
- подача $S = 0,1; 0,2; 0,3$ мм;
- швидкість $V = 100; 200; 300$ м /хв.

У результаті проведених розрахунків отримано ряд графіків залежностей P_y від різних параметрів різання S, t, V , окремі результати яких представлено на графіках рис. 3 та рис.4.

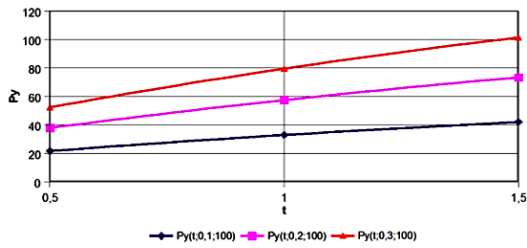


Рис. 3. Графік зміни сили різання P_y від глибини t при зміні подачі при швидкості 100 м/хв.

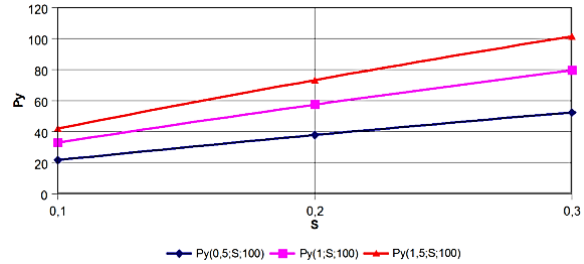


Рис. 4. Графік зміни сили різання P_y від подачі S при зміні глибини різання при швидкості 100 м/хв.

Визначивши залежність сили різання P_y від зміни параметрів режимів різання у широкому діапазоні, як для чистового точіння так і для чорнових видів оброблення, проведемо розрахунки величини пружних відтискань поверхні заготовки, згідно лінійного закону Гука. Розрахунки переміщень поверхні заготовки проведемо для плоскої моделі взаємодії інструменту з поверхнею, що оброблюється на одиничній площині.

Для точіння величина пружної деформації на одиничній площині поверхні розраховується за формулою:

$$\Delta l = \frac{P_y}{E} \tag{3}$$

У результаті розрахунків отримано порівняльні діаграми для різних видів переходів від чистового до чорнового точіння із змінними параметрами, які представлені на рис. 5 та рис. 6.

Величина пружної деформації поверхні Δl при глибині точіння $t=0,5$ мм

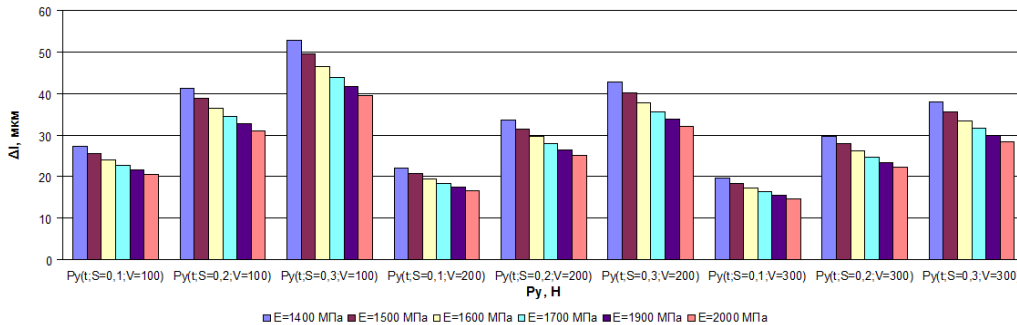


Рис. 5. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки при чистовому точінні з різними подачами та швидкостями різання при змінному модулі повздовжньої пружності

Величина пружної деформації поверхні Δl при глибині точіння $t=1,5$ мм

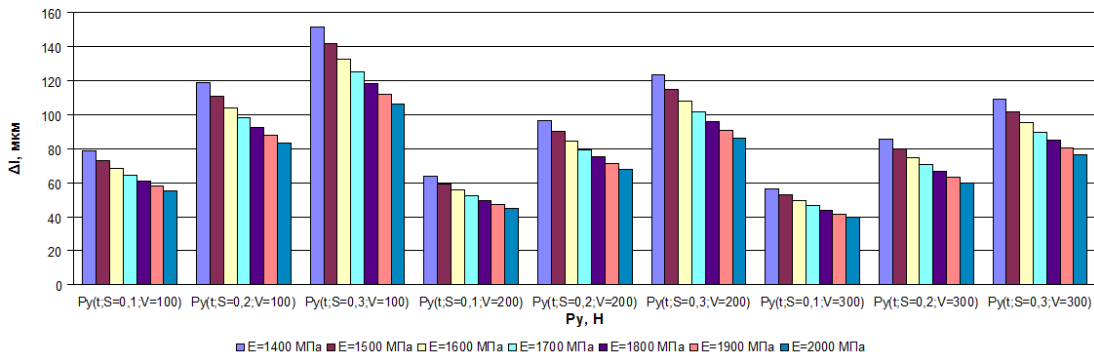


Рис. 6. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки при чорновому точінні з різними подачами та швидкостями різання при змінному модулі повздовжньої пружності

У результаті аналізу отриманих даних встановлено, що при збільшенні подачі інструмента величина пружної деформації поверхні заготовки збільшується від 80 до 150 мкм, але із збільшенням швидкості різання

відбувається зниження пружної деформації поверхні заготовки від 58 до 110 мкм. Також значний вплив на величину пружної деформації має модуль повздовжньої пружності E , збільшення якого призводить до зменшення величини пружної деформації від 24 до 55 мкм.

Аналіз процесу фрезерування здійснюється із застосуванням кінцевої фрези діаметром D , що ріже шар матеріалу B , який близько дорівнює діаметру фрези. На рис. 7 показано вплив сили P_V на бокову стінку деталі, що визиває пружні відтискання обробленої поверхні.

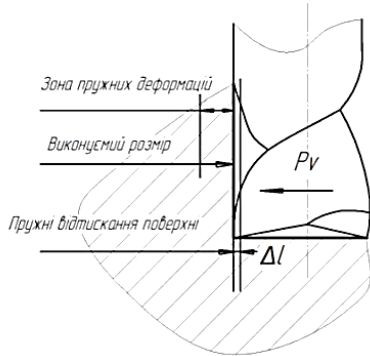


Рис. 7. Схема взаємодії кінцевої фрези та матеріалу заготовки з пластмаси: P_y – сила різання, що діє нормально до поверхні; B – ширина зрізаного шару; D – діаметр фрези; Δl – величина пружних відтискань поверхні заготовки; S – подача верстата

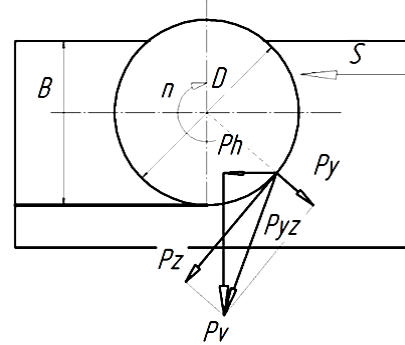


Рис. 8. Схема силової взаємодії кінцевої фрези та матеріалу заготовки з пластмаси з урахуванням пружних відтискань

Розглянемо які сили діють в процесі оброблення згідно рис. 8. Розглянемо вплив параметрів різання при фрезеруванні на зміну сили P_z . Параметри режимів від чистового виду оброблення до чорнового виду змінюємо у межах: t – глибина при фрезеруванні, 0,5; 1; 1,5; 2 мм; S_z – подача на зуб, 0,03; 0,1; 0,2; 0,3 мм/об;

B – ширина фрезерування, дорівнює діаметру фрези, $B = 8$ мм.; Z – кількість зубців фрези 3; 4; n – число обертів фрези об/хв. 400, 600, 1000, 1400.

При несиметричному попутному фрезеруванню на пружні деформації поверхні заготовки впливає сила P_V .

Проведемо комплексний аналітичний аналіз впливу параметрів різання на зміну сили P_z . У розрахунках приймаємо фрезу кінцеву суцільну з швидкорізальної сталі HSS. Розрахунки проводимо у програмному продукті Excel за формулою:

$$P_z = \frac{10C_p t^x S_z^y B^u Z}{D^q n^w} K_{M_p}, H. \quad (4)$$

де $C_p = 47$ [8]; $X = 0,75$; $Y = 0,6$; $u = 1$; $q = 0,86$; $w = 0$; $K_{M_p} = 1$.

При несиметричному попутному фрезеруванню $P_V = P_z(0,9 - 1,0)$.

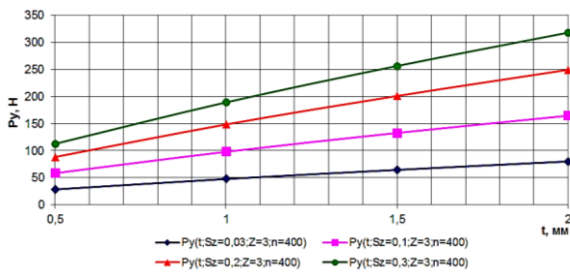


Рис. 9. Графік зміни сили різання P_y від глибини t при зміні подачі при швидкості 100 м/хв.

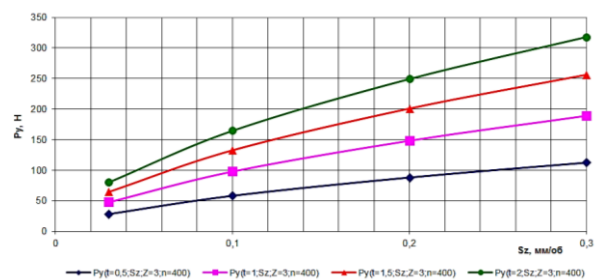


Рис. 10. Графік зміни сили різання P_y від подачі S при зміні глибини різання при швидкості 100 м/хв.

Визначивши залежність сили різання P_V від зміни параметрів режимів різання у широкому діапазоні, як для чистового фрезерування так і для чорнового видів оброблення, проведемо розрахунки величини пружних відтискань поверхні заготовки, згідно лінійного закону Гука. Розрахунки переміщень поверхні заготовки проведемо для пласкої моделі взаємодії інструменту з поверхнею, що оброблюється на одиничній площині.

Для перевірки отриманих результатів було виготовлено FDM друком деталь складної форми «Робоче колесо» з CoPET (рис. 13, а) та за допомогою механічної обробки різанням (токарна, фрезерна) оброблено приєднувальні поверхні для яких точність після друку є не достатня (рис. 13, б).

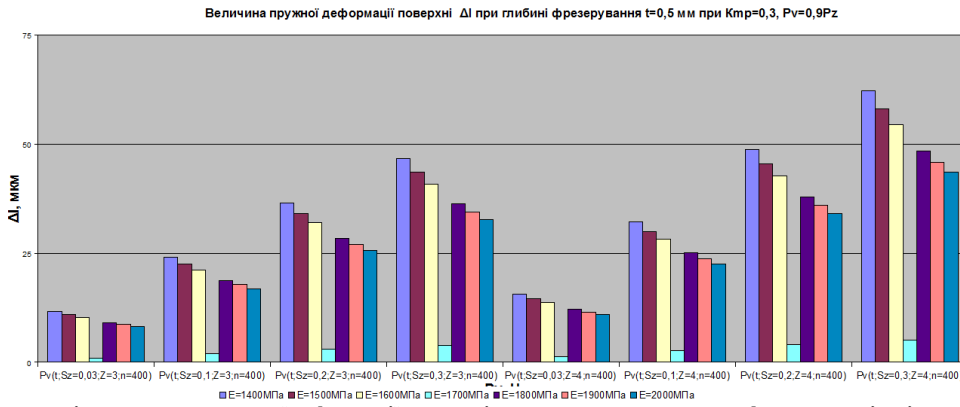


Рис. 11. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки при чистовому фрезеруванні з різними подачами та обертами фрези при змінному модулю повздожньої пружності
Величина пружної деформації поверхні Δl при глибині фрезерування $t=1$ мм при $K_{mp}=1$, $P_v=0,9P_z$

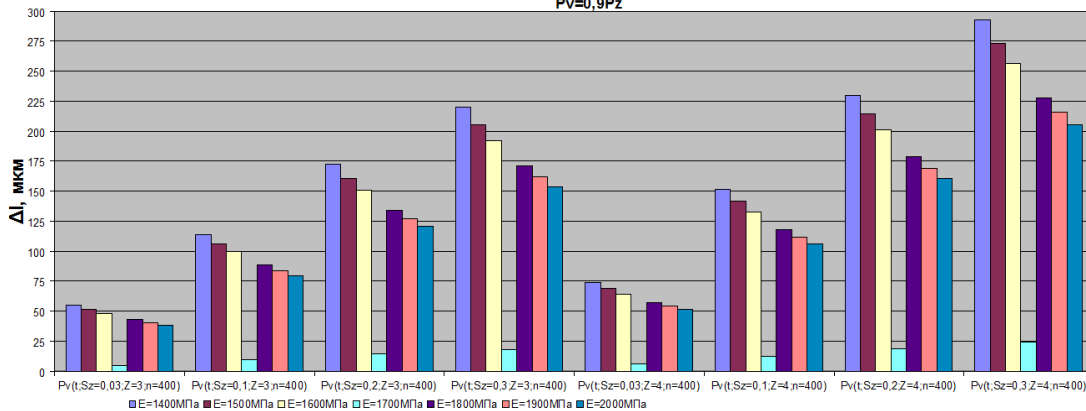


Рис. 12. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки при черновому фрезеруванні з різними подачами та обертами фрези при змінному модулю повздожньої пружності

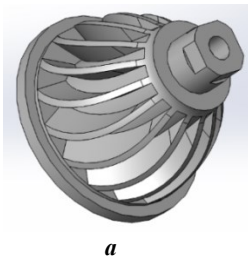


Рис. 13. Загальний вигляд деталі: а – 3D модель; б – деталь надрукована FDM без обробки

Після друку було проведено заміри приєднувальних поверхонь згідно схеми показаній на рис. 14, де латинськими літерами позначено поверхні які контролюється, римськими цифрами – перерізи в яких проводиться вимірювання кожної поверхні, вимірювання здійснюються за допомогою штангенциркуля ШЦЦ-150 згідно ДСТУ 166:2009. Вимірювання після FDM друку (табл.1, п.1) показали значну відмінність розмірів в двох перпендикулярних перерізах, також на поверхнях присутні нерівності та напливи утворені в процесі друку, такі дефекти не дозволяє використовувати деталь за призначенням. Тому було проведено механічну обробку відповідальних поверхонь у розмір методом точіння і фрезерування.

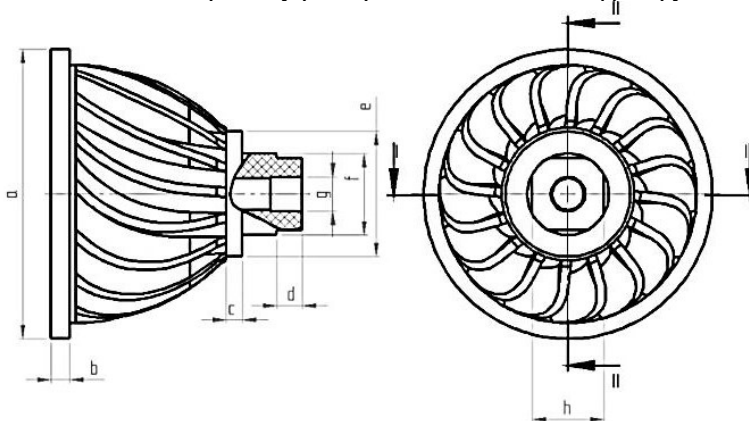


Рис. 14. Схема вимірювань параметрів деталі по січеннях I-I, II-II

Заміряні величини після механічної обробки занесені до таблиці 1. п.2.

Таблиця 1

Заміряні величини параметрів до механічної і після механічної обробки

Заміряні величини до механічної обробки									
п 1	Переріз в якому здійснюється вимірювання	Заміряні величини, мм.							
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>g</i>	<i>f</i>	<i>e</i>	<i>h</i>
		I	91,48	6,28	5,67	8,07	9,65	25,61	40,88
II	91,33	6,24	5,55	8,10	9,93	25,75	40,58	22,70	
Заміряні величини після механічної обробки.									
п 2	Переріз в якому здійснюється вимірювання	Заміряні величини, мм.							
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>g</i>	<i>f</i>	<i>e</i>	<i>h</i>
		I	88,98	3,92	4,96	10,01	10,99	24,43	39,49
II	88,97	3,90	4,97	9,94	10,97	24,45	39,48	21,91	

На рис. 15 та рис. 16 показані світлини оброблених поверхонь деталі «Робоче колесо» точінням та фрезеруванням.



а



б

Рис. 15. Світлина оброблених поверхонь точінням: а - *f* та *e*; б – розмір *b*; підрізка торців, базування здійснювалося в трикулачковому патроні в упор кулачками за оброблену поверхню



Рис. 16. Світлина оброблення фрезеруванням лисок *h*, установка заготовки здійснена торцем на стіл фрезерного верстату, фіксація прихватом через Т-подібні болти

Для процесу фрезерування було застосовано різальний інструмент: кінцеві фрези із швидкорізальної сталі HSS діаметром 8мм. та фрези з твердого сплаву APKT1135PDR-MA з полірованою поверхнею.

Проаналізувавши результати експериментальних досліджень – фрезерування пластикових деталей отриманих FDM-друком із матеріалу CoPET, було встановлено, що найбільша точність та якість оброблених поверхонь (паза та уступу) досягається при використанні фрези з твердого сплаву APKT1135PDR-MA з полірованою поверхнею, частково придатною також виявилася фреза із швидкорізальної сталі HSS. Також було встановлено найкращі режими різання, що відповідають обертам шпинделя – 2240 об/хв. та подачі – 400 мм/хв.

Аналіз результатів, отриманих після оброблення точінням та фрезерування відповідальних поверхонь показав, що відмінність відповідальних розмірів у січеннях, де проводили вимірювання, лежить у межах від 10 до 20 мкм. (див. табл.1, п2), що відповідає технічним вимогам на данні поверхні та входить у межі допуску на них.

Висновки і перспективи розвитку напрямку

При аналізі використаних джерел встановлено, що отримати низьку шорсткість та високу точність розмірів поверхонь після процесу FDM-друку виробу важко через технологічні особливості роботи обладнання та властиві йому обмеження. Таким чином, щоб отримати поверхню кращої якості та вищої точності, необхідно виконати додатковий процес механічного оброблення відповідальних поверхонь.

З аналізу точності виконання розмірів відповідальних поверхонь, з урахуванням пружних відтискань поверхні, можна констатувати, що пружні відтискання поверхонь при точінні значно більші при чорнових видах оброблення (від 130 до 150 мкм) чим при чистових (від 44 до 65 мкм), а при чорновому фрезеруванні від 220 до 280 мкм. та чистовому фрезеруванні від 45 до 65 мкм. і незначні в порівнянні з технічними вимогами по допускам на дані поверхні.

Найкращі результати за такими параметрами як: чистота поверхні, відсутність налипання стружки на інструмент та заготовку, досягнуто при використанні ріжучих пластинок АРКТ1135PDFR-МА при режимах різання, які відповідають обертам шпинделя – 2240 об/хв. та подачі – 400 мм/хв.

Для виробів, що мають дизайнерське призначення, можна рекомендувати режими оброблення, які дають найбільшу продуктивність не зважаючи на якість та точність поверхонь, що оброблюються, обмежуючись тільки температурним режимом різання.

Література

1. Jo, K.H., Jeong, Y.S., Lee, J.H. and Lee, S.H. A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17 № 11, 2016. pp. 1541-1546.
2. Jyothish Kumar, L., Pandey, P.M. and Wimpenny, D.I. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, *Springer*, Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
3. Chen, Y.F., Wang, Y.H. and Tsai, J.C. Enhancement of surface reflectivity of fused deposition modeling parts by post-processing. *Optics Communications*, Vol. 430, 2019. pp. 479-485.
4. Чонка Е. Я., Новаковський О. Г., Серов В. В. Дослідження якості поверхні при виготовленні моделей на 3D-принтері. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. С. 201–202.*
5. Chohan, J.S. and Singh, R. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23 № 3, 2017. pp. 495-513.
6. Townsend, V., and R. J. A Systems Approach to Hybrid Design: Fused Deposition Modeling and CNC Machining. *In Global Product Development*, Heidelberg: Springer Berlin. 2011. pp.711–720.
7. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. (Сокращ. перев. с англ.). М., «Машиностроение», 1974. 192 с.
8. Штучний Б. М. Механмчечкая обработка пластмасс: справочник, 2 –е издание., перераб. и доп. Машиностроение, 1987. 152 с.
9. Бобровников Г.А., Житник Н.И. Совершенствование технологического процесса механической обработки полимеров и эластомеров с применением холода. Киев, Знание. 1976. 29 с.
10. Степанов А.А., Карпов В.П., Кислов К.Г. Исследование точения органопластика. *Станки и инструмент*. 1981. №4. С. 26-27.
11. Трёмбовецкнй А.Н., Муковоз Ю.А. Алмазная обработка неметаллических материалов. Киев. Знание. 1980. 20 с.
12. Осинковский Э. И., Суворов В. Д. Механическая обработка и отделка изделий из пластмасс. Д., Химия, 1976. 96 с.
13. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. Киев: Наук, думка, 1991. 416 с.
14. Кудинов В. А. Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания). *Станки и инструмент*. 1992. № 10. С. 14-17.
15. Сорокин Г. М., Петровский Б. С., Ярема И. Т., Наконечный Ю. И. Установка для исследования износостойкости полимерных материалов при циклическом нагружении. *Журнал «Заводская лаборатория»*. № 6. 1987. С. 73–75.
16. Луців І. В., Дячук Д. С. Особливості обробки різанням полімерно-композитних матеріалів: *матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя* (м. Тернопіль, 29–30 жовтня 2014 року.). Тернопіль: ТНТУ, 2014. 324 с.
17. Луців І. В., Ярема І. Т., Стахурський О. О. Аналіз силових факторів при обробці полімерних матеріалів різанням. «Актуальні задачі сучасних технологій»: *матеріали 5-ої міжнар. наук.-техніч. конф.* (м. Тернопіль, 17–18 листопада 2016 р.). Тернопіль, 2016. С. 256.
18. Ярема І. Т., Наконечний Ю. І., Кашуба Н. П., Буховець В. М. Конструкція пластмасових деталей. Вплив їх виготовлення на працездатність. «Обладнання і технології сучасного машинобудування»: *матеріали Всеукраїн. наук.-практ. конф.* (м. Тернопіль, 11–12 травня 2017 р.). Тернопіль, 2017. С. 178–179.
19. Castro-Casado D. Chemical treatments to enhance surface quality of FFF manufactured parts: a systematic review, *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 6 № 2, 2021. pp. 307-319.
20. Chen H. and Zhao Y. F. Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22 № 3, 2016. pp. 527-538.

21. Choe, C.M., Yang, W.C., Kim, U.H., Ri, B.G. and Om, M.S. Manufacture of centrifugal compressor impeller using FDM and investment casting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 118 № 1/2, 2022. pp. 173-181.
22. Chohan, J.S., Singh, R., Boparai, K.S., Penna, R. and Fraternali, F. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 117, 2017. pp. 138-149.
23. Chueca de Bruijn, A., Gomez-Gras, G. and Pérez, M.A. On the effect upon the surface finish and mechanical performance of ball burnishing process on fused filament fabricated parts, *Additive Manufacturing*, Vol. 46, 2021. p. 102133.
24. Ehteshamfar, M.V., Javadi, M.S. and Adibi, H. Surface modification of prototypes in fused deposition modelling using lapping process, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 28 № 7, 2022. doi: 10.1108/RPJ-06-2021-0148.
25. Garg, A., Bhattacharya, A. and Batish, A. Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: analysis of surface finish and mechanical strength, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89 № 5/8, 2017. pp. 2175-2191.
26. Abdul Wahab Hashmi, Harlal Singh Mali and Anoj Meena Rapid Prototyping Journal Haidiezul, A.H.M., Aiman, A.F. and Bakar, B. Surface finish effects using coating method on 3D printing (FDM) parts, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 318 №1, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/318/1/012065.
27. K.H., Jeong, Y.S., Lee, J.H. and Lee, S.H. A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17 № 11, 2016. pp. 1541-1546.
28. Michael, K., Servos, M., Stief, P., Dantan, J., Etienne, A. And Siadat, A. On achieving accuracy and efficiency in additive manufacturing: requirements on a hybrid CAM system, 2018. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.265.
29. Nancharaiah, T., Raju, D.R. and Raju, V.R. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components, *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 1 № 2, 2010. pp. 106-111.
30. Nguyen, T.K. and Lee, B.K. Post-processing of FDM parts to improve surface and thermal properties, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 № 7, 2018. pp. 1091-1100.
31. Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. and Clare, A.T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity, *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119-122.
32. Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. and Clare, A.T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity, *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119-122.
33. Puerta, A.P.V., Lopez-Castro, J.D., López, A.O. and Vidal, S.R.F. On improving the surface finish of 3D printing polylactic acid parts by corundum blasting, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.7, 2021. pp. 1398-1407, doi: 10.1108/RPJ-05-2021-0105.
34. Singh, R. and Trivedi, A. 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 № 3, 2017. pp. 455-463.
35. Sood, A.K., Mahapatra, S.S. and Ohdar, R.K. Weighted principal component approach for improving surface finish of ABS plastic parts built through fused deposition modelling process, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 2 № 1/2, 2011. p. 4.
36. Tamburrino, F., Barone, S., Paoli, A. and Rationale, A.V. Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 16 № 2, 2021. pp. 218-251.
37. Zhang, P., Liu, Z., Du, J., Su, G., Zhang, J. and Xu, C. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: a review, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 53, 2020. pp. 123-143.

References

1. Jo, K.H., Jeong, Y.S., Lee, J.H. and Lee, S.H. A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17 № 11, 2016. pp. 1541-1546.
2. Jyothish Kumar, L., Pandey, P.M. and Wimpenny, D.I. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, *Springer*, Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
3. Chen, Y.F., Wang, Y.H. and Tsai, J.C. Enhancement of surface reflectivity of fused deposition modeling parts by post-processing. *Optics Communications*, Vol. 430, 2019. pp. 479-485.
4. Chonka E. Ya., Novakovskiy O. G., Serov V. V. Research on surface quality in the manufacture of models on a 3D printer. *Mechanical processing processes, machine tools and tools: collection of scientific papers of the 10th All-Ukrainian Scientific and Technical Conference Zhytomyr: State University "Zhytomyr Polytechnic"*, 2019. pp. 201-202.
5. Chohan, J.S. and Singh, R. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23 № 3, 2017. pp. 495-513.
6. Townsend, V., and R. J. A Systems Approach to Hybrid Design: Fused Deposition Modeling and CNC Machining. *In Global Product Development*, Heidelberg: Springer Berlin. 2011. pp.711-720.
7. Kobayashi A. Processing of plastics by cutting. (Abbreviated translation from English). M., "Mashinostroenie", 1974. 192 p.
8. Stuchnyi B. M. Mechanical processing of plastics: reference book, 2nd edition., revised. and additional Mechanical engineering, 1987. 152 p.
9. Bobrovnikov G. A., Zhytnyk N. Y. Improvement of the technological process of mechanical processing of polymers and elastomers using cold. Kyiv, Znanie. 1976. 29 p.
10. Stepanov A. A., Karpov V. P., Kyslov K. G. Research on turning of organoplastics. *Machine tools and instruments*. 1981. № 4.

WITH. 26-27.

11. Trembovetsky A.N., Mukovoz Yu.A. Diamond processing of non-metallic materials. Kyiv. Knowledge 1980. 20 p.
12. Osynovsky E. I., Suvorov V. D. Mechanical processing and finishing of plastic products. D., Chemistry, 1976. 96 p.
13. Panasiuk V. IN. Mechanics of quasi-brittle destruction of materials. Kyiv: Nauk, dumka, 1991. 416 p.
14. Kudynov V. AND. Chip formation scheme (dynamic model of the cutting process). *Machine tools and instruments*. 1992. №10. P. 14-17.
15. Sorokin H. M., Petrovsky B. S., Yarema I. T., Nakonechny Yu. I. Installation for the study of wear resistance of polymer materials under cyclic loading. "Zavodskaya Laboratoriya" magazine. №6. 1987. P. 73–75.
16. Lutsiv I. V., Dyachuk D. S. Peculiarities of cutting processing of polymer-composite materials: *materials of the XVIII scientific conference of I. Pulyuy TNTU* (Ternopil, October 29–30, 2014). Ternopil: TNTU, 2014. 324 p.
17. Lutsiv I. V., Yarema I. T., Stakhurskyi O. O. Analysis of force factors in the processing of polymeric materials by cutting. "Actual problems of modern technologies": *materials of the 5th international scientific and technical conference. conf.* (Ternopil, November 17–18, 2016). Ternopil, 2016. P. 256.
18. Yarema I. T., Nakonechny Yu. I., Kashuba N. P., Bukhovets V. M. Construction plastic parts. The impact of their manufacture on performance. "Equipment and technologies of modern mechanical engineering": *materials of the All-Ukrainian scientific-practical conference* (Ternopil, May 11–12, 2017). Ternopil, 2017. pp. 178–179.
19. Castro-Casado D. Chemical treatments to enhance surface quality of FFF manufactured parts: a systematic review, *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 6 № 2, 2021. pp. 307-319.
20. Chen H. and Zhao Y. F. Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22 № 3, 2016. pp. 527-538.
21. Choe, C.M., Yang, W.C., Kim, U.H., Ri, B.G. and Om, M.S. Manufacture of centrifugal compressor impeller using FDM and investment casting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 118 № 1/2, 2022. pp. 173-181.
22. Chohan, J.S., Singh, R., Boparai, K.S., Penna, R. and Fraternali, F. Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 117, 2017. pp. 138-149.
23. Chueca de Bruijn, A., Gomez-Gras, G. and Pérez, M.A. On the effect upon the surface finish and mechanical performance of ball burnishing process on fused filament fabricated parts, *Additive Manufacturing*, Vol. 46, 2021. p. 102133.
24. Ehteshamfar, M.V., Javadi, M.S. and Adibi, H. Surface modification of prototypes in fused deposition modelling using lapping process, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 28 № 7, 2022. doi: 10.1108/RPJ-06-2021-0148.
25. Garg, A., Bhattacharya, A. and Batish, A. Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: analysis of surface finish and mechanical strength, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89 № 5/8, 2017. pp. 2175-2191.
26. Abdul Wahab Hashmi, Harlal Singh Mali and Anoj Meena *Rapid Prototyping Journal* Haidiezul, A.H.M., Aiman, A.F. and Bakar, B. Surface finish effects using coating method on 3D printing (FDM) parts, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 318 №1, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/318/1/012065.
27. K.H., Jeong, Y.S., Lee, J.H. and Lee, S.H. A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17 № 11, 2016. pp. 1541-1546.
28. Michael, K., Servos, M., Stief, P., Dantan, J., Etienne, A. And Siadat, A. On achieving accuracy and efficiency in additive manufacturing: requirements on a hybrid CAM system, 2018. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.265.
29. Nancharaiah, T., Raju, D.R. and Raju, V.R. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components, *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 1 № 2, 2010. pp. 106-111.
30. Nguyen, T.K. and Lee, B.K. Post-processing of FDM parts to improve surface and thermal properties, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 № 7, 2018. pp. 1091-1100.
31. Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. and Clare, A.T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity, *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119-122.
32. Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. and Clare, A.T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity, *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119-122.
33. Puerta, A.P.V., Lopez-Castro, J.D., López, A.O. and Vidal, S.R.F. On improving the surface finish of 3D printing polylactic acid parts by corundum blasting, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.7, 2021. pp. 1398-1407, doi: 10.1108/ RPJ-05-2021-0105.
34. Singh, R. and Trivedi, A. 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 № 3, 2017. pp. 455-463.
35. Sood, A.K., Mahapatra, S.S. and Ohdar, R.K. Weighted principal component approach for improving surface finish of ABS plastic parts built through fused deposition modelling process, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 2 № 1/2, 2011. p. 4.
36. Tamburrino, F., Barone, S., Paoli, A. and Rationale, A.V. Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 16 № 2, 2021. pp. 218-251.
37. Zhang, P., Liu, Z., Du, J., Su, G., Zhang, J. and Xu, C. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: a review, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 53, 2020. pp. 123-143.