

УДК 672:621.7+621.9

ТЕХНОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ СТВОРЕНОЇ МЕТОДОМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

С.В. Алексєєнко¹, В.А. Дербаб², А.Є.Ушакова³

¹професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, e-mail: Aleksieienko.S.V@nmu.one

²завідувач кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, e-mail: 5762634@gmail.com

³студентка групи ПМХм-25н-1, , e-mail: Ushakova.A.Y@nmu.one

^{1,2,3}Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Анотація. У роботі розглядаються вирішення науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням механічної обробки деталі, виготовленої методом адитивних технологій, шляхом оптимізації та управління її оброблюваністю ріжучим інструментом з твердих сплавів на сучасних верстатах з числовим програмним керуванням.

Ключові слова: обробка поверхні, верстат, ЧПК, нержавіюча сталь, адитивні технології, точіння, ріжучий інструмент, режими різання, CAD, CAM.

TECHNOLOGY FOR COMPREHENSIVE MACHINING PARTS MANUFACTURED USING ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

Serhii Alekseyenko¹, Vitalii Derbaba², Anastasia Ushakova³

¹Prof. Department of Mechanical Engineering Technology and Materials Science, Dnipro, Ukraine, e-mail: Aleksieienko.S.V@nmu.one

²Head of the Department of Mechanical Engineering Technology and Materials Science, Dnipro, Ukraine, e-mail: 5762634@gmail.com

³Student of group ПМХм-25н-1, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Ushakova.A.Y@nmu.one

Abstract. This paper examines solutions to a scientific and technical problem related to the technological support of machining a part manufactured using additive manufacturing technologies, through the optimization and control of its machinability using carbide cutting tools on modern CNC machines.

Keywords: surface treatment, machine tool, CNC, stainless steel, additive technologies, turning, cutting tool, cutting modes, CAD, CAM.

Вступ. Адитивні технології є однією з найбільш перспективних технологій сучасності, яка дозволяє значно змінити підходи до виробництва і виготовлення деталей в різних галузях. Вона відкриває нові горизонти для інновацій, дозволяючи створювати вироби, які раніше вважалися недосяжними.

Незважаючи на певні виклики, такі як висока вартість і необхідність вдосконалення процесів, переваги цієї технології – від економії ресурсів до індивідуалізації – роблять її ключовим елементом майбутнього виробництва. З розвитком науки й техніки 3D-друк металевими сплавами має всі шанси стати основою для наступної промислової революції, а її переваги, такі як можливість виготовлення складних конструкцій, швидкість прототипування і кастомізація виробів, роблять її важливим інструментом у сучасному виробництві. Технології 3D друку металами мають величезний потенціал для подальшого розвитку, і вже зараз вони використовуються для виготовлення компонентів в аерокосмічній, медичній та автомобільній промисловості [1, 2].

З кожним роком технологія 3D-друку металевими сплавами стає доступнішою та ефективнішою. Очікується, що:

- розробка нових сплавів із покращеними властивостями (наприклад, жаростійкість, корозійна стійкість) розширить сфери застосування;
- зниження вартості обладнання та матеріалів зробить технологію масовою;
- інтеграція штучного інтелекту в процеси проектування й друку підвищить точність і оптимізує витрати;
- гібридні системи (поєднання 3D-друку з традиційними методами виробництва) стануть стандартом у промисловості [1, 2].

В багатьох випадках, необхідно досягти високих квалітетів точності, після 3D-друку необхідна постмеханічна обробка поверхонь деталі, що необхідно враховувати перед друком. Для таких розмірів необхідно задати припуски до заготівлі на механічну обробку. Зазвичай такі припуски встановлюються виходячи з досвіду та технологічних можливостей підприємства.

Мета роботи полягає у вирішенні науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням механічної обробки деталі, виготовленої методом адитивних технологій, шляхом оптимізації та управління її оброблюваністю ріжучим інструментом з твердих сплавів на сучасних верстатах з числовим програмним керуванням.

Матеріал і результат досліджень. Предметом дослідження є деталь Ротор (рис.1), яка входить до складу високошвидкісного трьохфазного синхронного генератора з постійними магнітами, що використовується в аерокосмічній галузі. Даний генератор повинен забезпечувати електрикою бортову мережу.

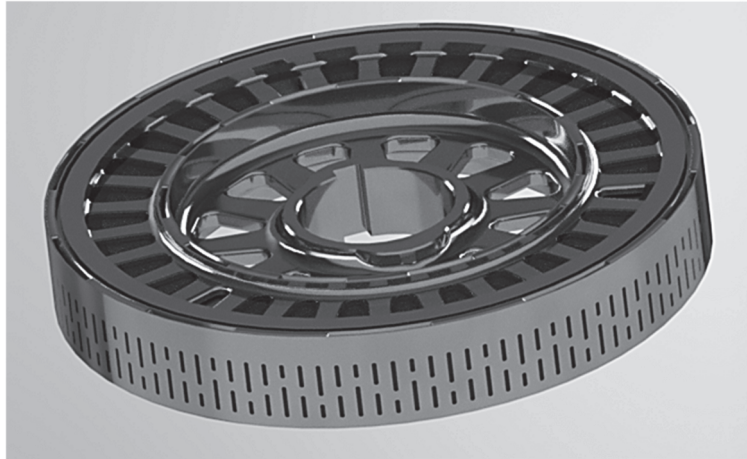


Рис.1. – Деталь Ротор

Дана деталь входить до складу складальної одиниці ротор (рис.2) і виконує роль несучої конструкції і одночасно бандажу для постійних магнітів. При обертанні ротора магнітне поле постійних магнітів виробляє трьохфазний електричний струм в обмотці статору. При проектуванні бандажу ротора необхідно було враховувати ряд вимог конструювання:

- конструкція повинна бути міцна, щоб витримувати велику відцентровану силу, яку створюють постійні магніти при обертанні зі швидкістю 50000 об/хв;
- мінімально можлива маса та габарити, що є галузевою вимогою;
- конструкція повинна бути виконана з немагнітного матеріалу, тобто відносна магнітна проникність такого матеріалу повинна дорівнювати 1 або бути наближена до 1;
- оскільки деталь знаходиться у змінному магнітному полі, матеріал деталі повинен мати високе значення питомого електричного опору, а конструкція повинна містити відповідні елементи для зниження електричних втрат;
- матеріал деталі не повинен мати протипоказань роботи в парах кисню, та бути криогенним;
- температурний діапазон роботи деталі від -183°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Матеріалом для деталі був обраний сплав Inconel 718 [3]. Inconel 718 — це високоміцний нікелевий сплав, який зберігає свою механічну міцність при температурах до $700-800^{\circ}\text{C}$. Завдяки термічній обробці його міцність значно підвищується. Сплав має високу стійкість до окислення і корозії навіть у агресивних середовищах, таких як кислоти, луги та морська вода.

Він характеризується гарною зварюваністю та високою в'язкістю при різних температурах. Крім того, Inconel 718 демонструє чудову стійкість до втоми та крипінгу, що робить його ідеальним для компонентів, які працюють під тривалими навантаженнями.

Застосування сплаву Inconel 718 обумовлено його високими механічними характеристиками, термостійкістю та корозійною стійкістю, що робить матеріал придатним для роботи в екстремальних умовах. Однак після адитивного виготовлення деталей потребує механічної обробки для досягнення необхідної точності та якості поверхні.

Конструкція виробу передбачає наявність базових поверхонь, які можуть бути використані для встановлення у пристосуваннях при подальшій механічній обробці [4]. Точні базові елементи формуються ще на етапі друку, що мінімізує похибки при їх подальшому доопрацюванні.

Одним із технологічних викликів є обробка жорсткого сплаву Inconel 718, що потребує застосування спеціального ріжучого інструменту [6, 7], оптимізованих режимів різання та систем охолодження для зниження навантаження на ріжучі кромки. Висока міцність матеріалу може призводити до підвищеного зносу інструменту, тому важливо враховувати раціональні стратегії механічної обробки.

3-D друк на якісному принтері зазвичай забезпечує 11-12 квалітет точності виготовлення [5]. При проектуванні деталі частина поверхонь та розмірів задовольняє точність та шорсткість, яку забезпечує даний спосіб виготовлення деталей. Але існують розміри та поверхні, для яких є підвищені вимоги по точності та шорсткості. Зазвичай це посадкові поверхні, розміри які важливі для розмірного розрахунку, елементи конструкції на які діє навантаження. Для таких розмірів необхідно закласти припуск та подальшу механічну обробку.

Складна конструкція деталі не дозволяє провести обробку одного типу та з одного установу. Механічна обробка буде поділятися на декілька етапів, де спочатку буде проведена електроерозійна обробка, наступним етапом токарно-фрезерна і вже на завершальному етапі токарна обробка. Технологічними базами для обробки є внутрішня поверхня Ротора та внутрішній посадковий діаметр. В таблиці 1 наданий перелік обробляючих поверхонь та прийнятих методів обробки.

Після механічної обробки необхідно провести слюсарну обробку з метою притупити в необхідних місцях гострі кромки. Після цього деталь поступає до відділу контролю якості.

Технологічний маршрут закінчується етапом маркування, упакування та передачі на склад готової продукції. Маршрут обробки деталі «Ступиця» наведено у таблиці 2.

Таблиця 1. – Розміри для постмеханічної обробки

Розмір	Ra (Rz)	Метод обробки
45h7	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
11±0.02	Rz 20	Токарна
Ø16.5H6	Ra 0.4	Електроерозія
Ø44.4f7	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
Ø68.2H8	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
Ø69.4±0.02	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
17.9 ^{+0.1}	Ra 1.6	Електроерозія
3JS9	Ra 1.6	Електроерозія
10±0.06	Rz 20	Токарно-фрезерна
2.5H8	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
Ø46k6	Ra 0.2	Токарно-фрезерна
8h8	Ra 1.6	Токарна

Таблиця 2. – Технологічний маршрут механічної обробки деталі

№ оп.	Найменування	Опис операції	Обладнання
005	Заготівельна	Отримання заготовки	EOS M400
010	Контрольна	Перевірка заготовки	-
015	Електроерозійна	Обробка поверхонь під посадку на вал	MITSUBISHI MV2400S NewGen
020	Токарно-фрезерна з ЧПК	Основна обробка поверхонь	DMG Mori CMX 70 U
025	Токарна з ЧПК	Доопрацювання довжини	DMG Mori CMX 70 U
030	Токарна з ЧПК	Доопрацювання довжини	DMG Mori CMX 70 U
035	Слюсарна	Затупити гострі кромки	-
040	Промивка	Промивка	-
045	Контрольна	Контроль розмірів	-
050	Маркування	Маркування	-
055	Упаковка	Упаковка	-
060	Остаточна здача	Здача на склад	-

На основі технічного аналізу ринку верстатів, до обробки заготовки з Inconel 718 рекомендовано використання наступної моделі електроерозійного верстату MITSUBISHI MV2400S NewGen (рис.2). Цей верстат забезпечує необхідну геометричну точність та якість обробленої поверхні (*Ra* до 0,2 мкм) при роботі з важкооброблюваними сплавами,

такими як Inconel 718. Завдяки використанню технології цифрового управління з компенсацією температури, досягається стабільна обробка навіть при довготривалих вирізах.



Рис.2. – Електроерозійний верстат MITSUBISHI MV2400S NewGen [9]

Програмні операції механічної обробки виконуються на п'ятикоординатному верстаті з ЧПК DMG Mori CMX70U (рис. 3). Верстат має магазин на 30 інструментальних позицій і поворотну інструментальну головку, що дозволяє виконувати обробку деталі з однієї установки.



Рис.3. – Верстат з програмним керуванням DMG Mori CMX70U [10]

Параметри різання для кожної операції були прораховані і оптимізовані спеціалізованою прикладною програмою (рис.5), ядро математичної моделі описане в відкритих джерелах [6, 7], виходячи з вихідних даних на заготівлю, верстат та ріжучі інструменти.

Для розмірів $\varnothing 44.4f7$ нижче наведений класичний розрахунок режимів різання для механічної обробки нашої деталі [7].

Швидкість різання:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = 40 \text{ м/хв}, S = 0.07 \text{ мм/об}, t = 0.5 \text{ мм} \quad (2)$$

Частота обертання:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 40}{\pi \cdot 45,4} \approx 280 \text{ об/хв} \quad (3)$$

Подача:

$$V_s = n \cdot S = 280 \cdot 0.07 \approx 19.6 \text{ мм/хв} \quad (4)$$

Час обробки:

$$T_m = \frac{L}{V_s} \cdot k = \frac{11}{4.52} \cdot 5 \approx 0.26 \text{ хв} \quad (5)$$

де k -кількість проходів

Потужність:

$$P = \frac{V_c \cdot K_c \cdot t \cdot S}{60 \cdot 10^6} = \frac{40 \cdot 2000 \cdot 0.5 \cdot 0.07}{60 \cdot 10^6} \approx 0.047 \text{ кВт} \quad (6)$$

де $K_c \approx 2000 \text{ Н/мм}^2$ -питома сила різання для Inconel 718.

Шляхом перерахунку аналітичних режимів різання, отримані нові результати для інших переходів. Результат оптимізованих результатів режимних параметрів наведений у таблиці 4.

Таблиця 4. – Результати розрахунку оптимізованих режимів різання для переходів 1–8 з урахуванням припуску

Перехід	t, хв	S, мм/об	L, мм	V, м/хв	n, об/хв	T_m , хв
1	1.5	0.06 (fz)	20	83.5	348	1.44
2	0.3	0.05 (fz)	20	59.7	597	8.38
3	0.3	0.05	2.5	6.65	133	1.50
4	0.2	0.04	11	4.52	113	12.17
5	0.5	0.07	2.5	19.6	280	0.26
6	0.3	0.05	7.5	5.95	119	5.04
7	0.2	0.03	0.6	2.07	69	1.45
8	0.2	0.04	7.5	4.88	122	7.68

Висновки. В процесі дослідження було встановлено, що адитивні технології у поєднанні з подальшою постмеханічною обробкою дозволяють усунути технологічні обмеження при виготовленні деталей, а також знизити собівартість продукції у випадку виготовлення невеликих партій або складних конструкцій. Це особливо актуально для аерокосмічної галузі, де підвищенні вимоги до точності розмірів та якості поверхонь деталей.

Обґрунтований і встановлений повний системний зв'язок параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту, інструментального матеріалу і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології токарної обробки.

Обґрунтовано вибір матеріалу для деталі «Ступиця» - найбільш доцільним виявився жароміцний сплав Inconel 718. Прораховані конструкторські особливості деталі, проаналізована деталь на технологічність перед безпосереднім застосуванням адитивних технологій та подальшої механічної обробки на верстаті з ЧПК. Сформовано деталізований технологічний маршрут обробки поверхонь деталі «Ступиця», з застосуванням сучасного високоточного обладнання.

Виконана методика значно спрощує громісткі аналітичні розрахунки за класичними методами з купою виправних коефіцієнтів та враховує сучасну геометрію інструментів показники і режимів різання стосовно конкретної деталі та більш того, може буди адаптована до інших типів деталей типу тіл обертів різних галузей виробництва.

Складена оптимальна технологія механічної обробки деталі. Застосований прогресивний ріжучий інструмент стандарту ISO, оснащення для сучасного багатоцільового верстата з ЧПК. Програмна реалізація і комп'ютерний експеримент якої, може бути реалізований, в майбутньому, у програмах ESPRIT TNG CAM, FeatureCAM, Inventor CAM, SolidCAM.

Виконане дослідження дозволяє моделювати абсолютно всі токарні роботи за рахунок застосування комп'ютерних програм в умовах дефіциту виробництва натурних експериментів та дистанційного навчання.

ЛІТЕРАТУРА

1. V. Ruban, V., Derbaba, O., Bohdanov, & Y. Shcherbyna. (2023). Optimization of product processing modes in modeling and programming of machining on machine tools with program control. Collection of Research Papers of the National Mining University, (72), 222-238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>
2. Дербаба, В.А., Григоренко, В.У. & Рубан, В.М. (2023). Розвиток елементів комп'ютерного програмування у складових наскрізних технологіях виготовлення механічного обладнання в машинобудуванні. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», (72), 212-221.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.212>
3. Дербаба, В.А., Богданов, О.О. & Рубан, В.Н. (2023) Дослідження температурних явищ при механічній обробці сталей та чавунів. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», (72), 202-211.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.202>
4. Проців В.В. Сучасні полімерні матеріали та технології в 3D-прінтингу / В.В. Проців, В.А. Козечко, В.А. Дербаба, О.О. Богданов// *Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний*

вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2021 – № 65 – С.107-117. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>

5. В.А. Дербаба, В.А. Козечко, С.Т. Пацера, О.Л. Войчишен & В.І. Козечко (2023). Експлуатаційні показники різальних інструментів з надтвердих матеріалів. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», (74), 133-142.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.133> .

6. В.А. Козечко, М.В. Куваєв, В.А. Дербаба, С.В. Алексеєнко & Д.С. Несін (2025). Вдосконалення технології постмеханічної обробки деталі створеної методом адитивних технологій. *Збірник наукових праць НГУ. Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка».* 83. 269–279. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.269>

7. В.А. Дербаба, В.А. Козечко, О.О. Богданов, В.І. Козечко & С.В. Алексеєнко (2025). Використання технологій 3D-друку під час проектування засобів обробітку ґрунту. *Вісник НТУ «ХПІ».* 2025. №2 (12) ISSN 2079–004X(Print), ISSN 2786–7587(Online). DOI: 10.20998/2079-004X.2025.2(12).16.

УДК 621.926

ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ДРОБАРОК ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

В.І. Банга¹, Д.Ю. Бубній²

¹кандидат технічних наук, доцент, кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, e-mail: vasyl.i.banha@lpnu.ua

²аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, e-mail: danylo.bubnii.asp.2025@lpnu.ua

^{1,2}Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

Анотація. Проведено огляд і аналіз існуючих конструкцій дробарок зернистих матеріалів і їх робочих органів, наведено переваги та недоліки і встановлено їх вплив на якісні показники процесу подрібнення з метою обґрунтування конструкції робочих органів дробарки зернистих матеріалів.

Ключові слова: молоткова дробарка, зернистий матеріал, робочі органи, якість процесу подрібнення.

OVERVIEW AND ANALYSIS OF THE DESIGN OF GRANULAR MATERIAL CRUSHERS

V.I. Banha¹, D.Y. Bubnii²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Machine Design and Automotive Engineering, e-mail: vasyl.i.banha@lpnu.ua

²Postgraduate, Department of Machine Design and Automotive Engineering, e-mail: danylo.bubnii.asp.2025@lpnu.ua

^{1,2}Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine