

© В.А. Козечко¹, М.В. Куваєв², В.А. Дербаба¹, С.В. Алексеєнко¹, Д.С. Несін¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОСТМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ СТВОРЕНОЇ МЕТОДОМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

V. Kozechko¹, <https://orcid.org/0000-0002-2837-187X>

M. Kuvaiev², <https://orcid.org/0000-0002-8560-5433>

V. Derbaba¹, <https://orcid.org/0000-0002-3918-2177>

S. Alekseyenko¹, <https://orcid.org/0000-0003-0320-989X>

D. Nesin¹, <https://orcid.org/0009-0008-9631-4368>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

IMPROVEMENT OF POST-MECHANICAL PROCESSING TECHNOLOGY FOR PARTS CREATED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

Мета. 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.

Методика. Методологія ґрунтується на використанні чисельного та графо-аналітичному методах дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів механічної обробки деталі з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту і відповідною інтеграцією їх до керуючої програми верстата та 3D-принтера.

Результати. Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні науково-технічної задачі продуктивної комбінованої обробки деталі з нержавіючої сталі на верстаті з числовим програмним керуванням. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних матеріалів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань та контролю якості.

Наукова новизна. Встановлення повного і системного зв'язку параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології автоматизованого виробництва. У математико-статистичному опрацюванні експериментальних даних, що дало змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння на верстаті.

Практична значимість. Полягає у виборі й обґрунтуванні оптимальних геометричних параметрах різальних інструментів, установленні характеру впливу умов лезової обробки нержавіючої сталі на основні показники процесу – час механічної обробки та режимні показники, в залежності від твердості матеріалу деталі і інструментального матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання отриманих даних в САМ системах.

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

Вступ. 3D-друк металевими сплавами 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 [3, 4].

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.

В даній роботі був відображені вдосконалені технологічні особливості виготовлення деталі з застосуванням сучасних адитивних технологій та постмеханічною обробкою на сучасних верстатах з ЧПК.



Сторона 1



Сторона 2

Рис.1. Деталь Ступиця

Основна частина. Предметом дослідження є деталь Ступиця (див. 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.

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 статора. 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 $+50^{\circ}\text{C}$.

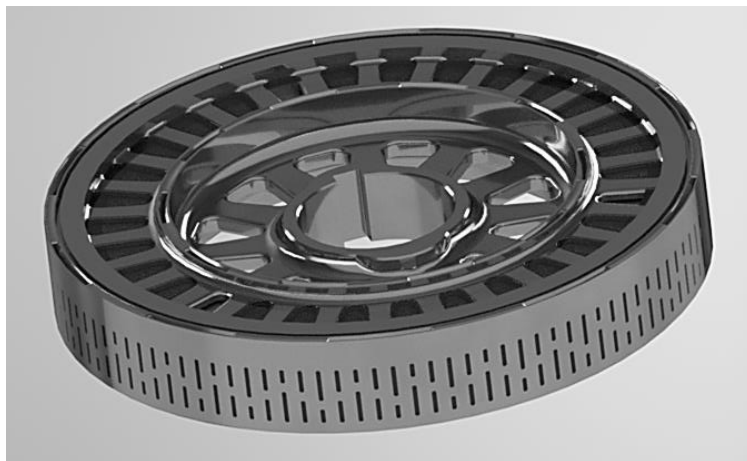


Рис.2. Тривимірний модель деталі Ротор

Матеріалом для деталі був обраний сплав Inconel 718 [4]. 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, луки 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.

Основні сфери застосування:

- аерокосмічна промисловість (турбінні лопатки, диски, ущільнення реактивних двигунів);
- газові турбіни (компоненти для енергетичних та промислових турбін);
- ракетні двигуни (камери згоряння, сопла);
- хімічна промисловість (теплообмінники, реактори, клапани);
- морська та офшорна промисловість (стійкість до корозії в морській воді);
- 3D-друк (виготовлення складних авіаційних та космічних деталей).

Завдяки поєднанню міцності, термостійкості та корозійної стійкості, Inconel 718 залишається одним із ключових матеріалів для високотехнологічних галузей.

Розглядаючи конструкцію деталі та вимоги до її виробництва, обрано технологію 3D-друку на основі порошкового лазерного наплавлення. Це рішення дозволяє отримати складну геометрію без необхідності використання традиційних методів лиття або механічної обробки на початковому етапі.

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 [5]. 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 [8]. 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.

Необхідно врахувати допуски на розмір і закласти додатковий припуск виходячи з практичного досвіду, що відображено в таблиці 1.

Таблиця 1

Припуски на механічну обробку деталі

Розмір	Номинальне значення, мм	Допуск розміру, мм	Припуск на сторону, мм	Розмір заготовки, мм
45h7	45	- 0.025	1	46±0.125
11±0.02	11	±0.02	1	12±0.09
Ø16.5H6	16.5	+0.011	1	14.5±0.09
44.4f7	44.4	-0.025...-0.05	1	46.4±0.125
Ø68.2H8	68.2	+0.046	1	66.2±0.15
Ø69.4±0.02	69.4	±0.02	1	71.4±0.15
17.9 ^{+0.1}	17.9	+0.1	0.5 та 1	16.4±0.09
3JS9	3	±0.012	0.5	2±0.05
10±0.06	10	±0.06	1	11±0.09
2.5H8	2.5	+0.014	1	3.5±0.05
Ø46k6	46	+0.002...+0.018	1	48±0.125
8h8	8	-0.022	1	9±0.075

Для оригіналу деталі в номінальному розмірі та заготовки була розрахована маса. Так маса деталі складає 63 грам, а маса заготовки складає 128 грам. Тобто коефіцієнт вагової точності буде складати:

$$K_{в.т.} = \frac{G_d}{G_z} = \frac{63}{128} = 0,49, \quad (1)$$

де G_d – маса готової деталі; G_z – маса заготовки, що надходить з ділянки 3D друку.

На перший погляд значення вагової точності не дуже висока, але виходячи з того, що матеріал Inconel 718 має високу щільність, яка складає $8,19\text{г/см}^3$, та виходячи з високих галузевих вимог до якості продукції, то вважаємо, що дане значення є прийнятне.

Наступним кроком є розробка технологічного маршруту виготовлення деталі. Для розмірів, квалітет яких є вищим за сучасні можливості адитивних технологій необхідно провести подальшу механічну обробку.

Складна конструкція деталі не дозволяє провести обробку одного типу та з одного установу. Механічна обробка буде поділитися 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 Ступиці та внутрішній посадковий діаметр. В таблиці 2 наданий перелік обробляючих поверхонь та прийнятих методів обробки.

Таблиця 2

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

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 3.

Таблиця 3

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.3). 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. 3. Електроерозійний верстат MITSUBISHI MV2400S NewGen [9]

Програмні операції механічної обробки виконуються на п'ятикоординатному верстаті з ЧПК DMG Mori CMX70U (рис 4). Верстат має магазин на 30 інструментальних позицій і поворотну інструментальну головку, що дозволяє виконувати обробку деталі з однієї установки.



Рис. 4. 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 [11], виходячи з вихідних даних на заготівлю, верстат та ріжучі інструменти.

Для розмірів Ø44.4f7 нижче наведений класичний розрахунок режимів різання для механічної обробки нашої деталі [12, 13].

Швидкість різання:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = 40 \text{ м/хв}, \quad S = 0,07 \text{ мм/об}, \quad t = 0,5 \text{ мм}. \quad (2)$$

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.

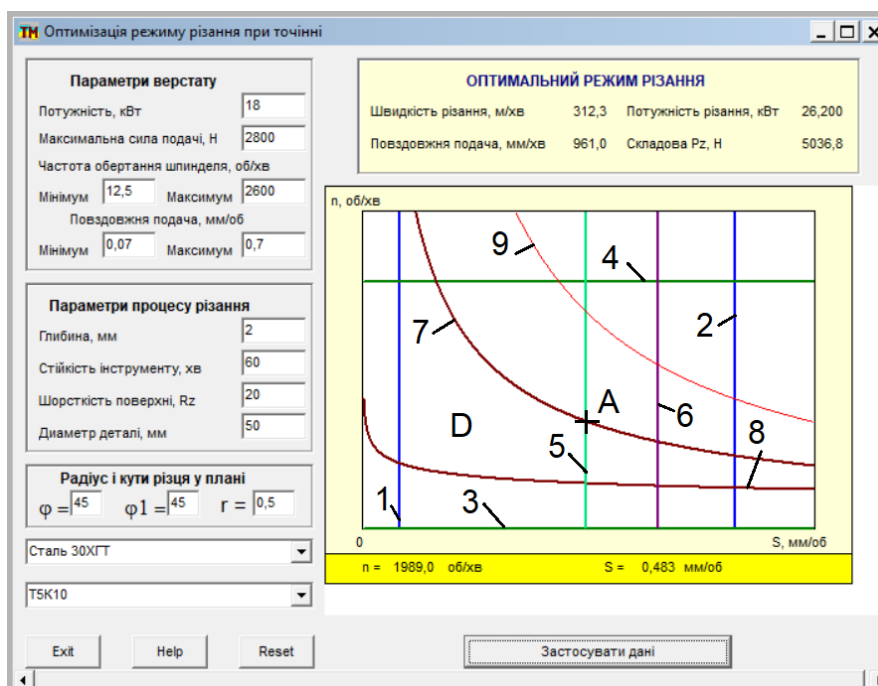


Рис.5. Інтерфейс прикладної програми оптимізації режимів різання

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 бути 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 багатопільового 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; індивіалізувати процес навчання та підвищити ефективність самостійної роботи учня або студента; надає змогу проводити дослідження в таких областях змінення параметрів, які неможливо або небезпечно реалізувати на реальному коштовному обладнанні.

Перелік посилань

1. Gibson, I., Rosen, D.W. & Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
2. Кравченко Ю.Г., Дербаба В.А. & Смагін Д.В. (2020). Визначення і взаємозв'язок кутів зсуву і тертя при стружкоутворенні. *Збірник наукових праць НГУ*, 61, 193–201. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.193>
3. Gu, D. (2015). *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. Springer. 311.
4. Special Metals Corporation. INCONEL® alloy 718. Technical Bulletin. – New York: Special Metals, (2010). <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf>.
5. Дербаба, В.А., Пацера, С.Т. & Григоренко, В.У. (2022). Особливості механічної обробки зносостійких чавунів. *Збірник наукових праць НГУ*, (71), 217–230. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217>
6. Sandvik Coromant. Product catalog (2023). Sandviken, Sweden: Sandvik AB.
7. Щербина, Є.Ю., Дербаба, В.А. & Козечко, В.А. (2022) Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки. *Збірник наукових праць НГУ*, 67, 77–95. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>
8. Проців, В.В., Козечко, В.А., Дербаба, В.А. & Богданов, О.О. (2021). Сучасні полімерні матеріали та технології в 3D-прінтингу. *Збірник наукових праць НГУ*, 65, 107–117. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>.
9. Mitsubishi Electric. Wire-cut EDM MV2400S NewGen. – Tokyo: Mitsubishi Electric Corp., (2020). <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/edm/lineup/mv2400s/>
10. DMG MORI. CMX 70 U – 5-Axis Milling Machine. – Tokyo: DMG MORI CO., LTD., (2023). – <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/cm-x-u/cm-x-70-u>
11. Петраков, Ю. В. (2017). Методи управління процесами різання. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*, (2), 124–134.
12. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ*, 63, 123–133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>.
13. Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Shcherbyna, Y. (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>

ABSTRACT

Purpose. To solve a scientific and technical problem related to the technological support of mechanical processing of a part manufactured using additive technologies by optimizing and controlling its machinability with cutting tools made of hard alloys on modern numerically controlled machine tools.

Methods. The methodology is based on the use of numerical and grapho-analytical research methods to establish a systematic relationship between the parameters of mechanical processing of a part and the properties of the material being processed, the geometry of the tool, and their corresponding integration into the control program of the machine tool and 3D printer.

Findings. Numerical results of research were obtained for a scientifically based approach to solving the scientific and technical problem of productive combined processing of stainless steel parts on a numerically controlled machine tool. The results obtained were compared with known works related to the study of mechanical processing of various materials, assessment of the reliability of cutting tools, accuracy and roughness of the machined surface, measurement results, and quality control.

The originality. Establishing a complete and systematic relationship between processing parameters and the properties of the material being processed, tool geometry, and design and technological factors of the part to calculate the optimized technology for automated production. Mathematical and statistical processing of experimental data made it possible for the first time to obtain comprehensive dependencies in a form convenient for calculation and analysis, which give a clear idea of the influence of each parameter of the turning process on the machine tool.

Practical implementation. It consists in selecting and justifying the optimal geometric parameters of cutting tools, establishing the nature of the influence of stainless steel blade processing conditions on the main indicators of the process – machining time and operating parameters, depending on the hardness of the part material and tool material. Practical recommendations are provided for the optimal use of the obtained data in CAM systems.

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

дата першого надходження статті до видання	01.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	07.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025