

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний факультет

(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)

(ступінь вищої освіти)

на тему «Удосконалення технологічного процесу виготовлення
складнопрофільних деталей авіаційної техніки»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М-113м

Спеціальності 131 «Прикладна механіка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Технології машинобудування»

ВОЛОТКЕВИЧ Д.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ Є.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент МАТЮХІН А.Ю.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний

Кафедра «Технологія машинобудування»

Ступінь вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) «Технології машинобудування»

(назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ

« » 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ВОЛОТКЕВИЧ Дмитро Сергійович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Удосконалення технологічного процесу складнопрофільних деталей авіаційної техніки

керівник проекту (роботи) к.т.н., доц. ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ Євген Валерійович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» 10 2024 року № 443

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 07.12.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Удосконалити технологічний процес деталі «Диск 0 ступені КВТ», робоче креслення деталі, річна програма випуску N = 5000деталей

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Сучасні підходи технологічного забезпечення виробництва складнопрофільних авіаційних деталей. 2 Автоматизація електроерозійної обробки. 3 Технологічна частина.

4 Конструкторська частина. 5 Розрахунок деталі на міцність. 6 Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів. 7 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу: креслення деталі; креслення заготовки; плакат 3D-моделей деталі та заготовок; плакат МВД; плакат зі скріншотами розробки керуючої програми в NX; креслення робочого пристосування; креслення контрольного пристосування; плакат із розрахунком деталі на міцність; 3 плакати спецзавдання; плакат автоматизації.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4, 6	ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ Є.В., доцент, к.т.н.		
5	ПУХАЛЬСЬКА Г.В., доцент		
нормоконтроль	ДЯДЯ С.І., зав. каф.		

7. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	<i>Сучасні підходи технологічного забезпечення виробництва складнопрофільних авіаційних деталей</i>	27.09.2024	
2	<i>Автоматизація електроерозійної обробки</i>	03.10.2024	
3	<i>Технологічна частина</i>	30.10.2024	
4	<i>Конструкторська частина</i>	12.11.2024	
5	<i>Розрахунок деталі на міцність</i>	20.11.2024	
6	<i>Оцінка очікуваної економічної ефективності розробки або заходів</i>	22.11.2024	
7	<i>Охорона праці</i>	27.11.2024	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	29.11.2024	
8	<i>Нормоконтроль</i>	03.12.2024	
9	<i>Рецензія</i>	13.12.2024	
10	<i>Захист дипломного проєкту</i>	17.12.2024	

Студент(ка)

(підпис)

Дмитро ВОЛОТКЕВИЧ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Євген ВИШНЕПОЛЬСЬКИЙ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: с.150, рис.59, табл.11, джерел 49, дод 3.

ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНА ОБРОБКА, ТИТАН, ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДИСК, ЗАГОТІВКА, МОДЕЛЬ, РЕЖИМИ РІЗАННЯ

Об'єкт дослідження – Диск 0 ступені компресора високого тиску.

Мета роботи – Удосконалення технологічного процесу виготовлення складнопрофільних деталей авіаційної техніки

Метод дослідження – дослідження наявних наукових робіт, таблично-аналітичний розрахунок та моделювання експлуатаційного навантаження на деталь, розробка керуючої програми для керування операцією обробки деталі на верстаті з ЧПК

В магістерській роботі з метою удосконалення технологічного процесу виготовлення складнопрофільних деталей авіаційної техніки було проведення дослідження наявних наукових робіт пов'язаних в першу чергу із електроерозійним обладнанням. Були виявлені актуальні проблеми пов'язані з автоматизацією електроерозійних операцій, і запропоновано низку інноваційних рішень. Всі дані були проаналізовані і зведені до висновків. Запропоновані методи удосконалення для підтвердження ефективності були впровадженні в технологічний процес виготовлення деталі «Диск 0 ступені компресора високого тиску». В роботі була проведена економічна оцінка, яка підтвердила ефективність і доцільність впровадження електроерозійних технологій в технологічні процеси виготовлення складнопрофільних деталей авіаційної техніки.

Практична цінність роботи полягає в вивченні можливостей актуальних технологій електроерозійної обробки, та більшому впровадженню таких технологій з доведеною ефективністю.

ЗМІСТ

Скорочення і умовні позначки	8
Вступ.....	9
1 Сучасні підходи технологічного забезпечення виробництва складнопрофільних авіаційних деталей	10
1.1 Вступ.....	10
1.2 Обладнання для технологічного забезпечення при виробництві складнопрофільних деталей	11
1.3 Електроерозійне обладнання.....	11
1.3.1 Основи електроерозійної обробки.....	11
1.3.2 Вплив режимів і параметрів електроерозійної обробки на результат....	20
1.3.3 Приклад проєктування і розробки керуючої програми для електроерозійного обладнання на базі SprutCam	23
1.3.3.1 Приклад розробки та проєктування на двох-осьовому електроерозійному верстаті з ЧПК.....	27
1.3.3.2 Приклад розробки та проєктування на чотирьох-осьовому електроерозійному верстаті з ЧПК.....	29
1.4 Висновки	31
2 Автоматизація електроерозійної обробки	34
2.1 Актуальні виклики щодо вирішення проблем автоматизації електроерозійної обробки	34
2.2 Автоматизація і оптимізація електроерозійної обробки за допомогою інтелектуальної системи	35
2.3 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою пристроїв реєстрації даних	37
2.4 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою інтегрування CAD/CAM/CAIP систем для проєктування електродів для обробки	39
2.5 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою роботів.....	40

2.6 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою програмованих логічних контролерів	45
2.7 Інноваційні методи автоматизації та оптимізації електроерозійної обробки на основі впровадження ройового штучного інтелекту	48
2.8 Сучасні тенденції та дослідження з оптимізації і автоматизації електроерозійної обробки	51
2.9 Висновок	53
3 Технологічна частина	55
3.1 Опис конструкції і службового призначення деталі	55
3.2 Вибір типу виробництва і форми організації робіт	57
3.3 Вибір виду і способу отримання заготовки з економічним обґрунтуванням....	58
3.3.1 Отримання заготовки за допомогою КГШП	59
3.3.2 Отримання заготовки за допомогою ГKM	61
3.3.3 Розрахунок економічної ефективності для обох методів отримання заготовки	63
3.4 Проектування технологічного маршруту обробки деталі.....	66
3.4.1 Аналіз конструкції деталі на технологічність	66
3.4.2 Проектування маршруту обробки поверхні	69
3.4.3 Маршрут виготовлення деталі.....	78
3.5 Розрахунок припусків і технологічних розмірів.....	79
3.6 Розрахунок режимів різання	83
3.7 Технічне нормування операції.....	92
3.8 Розробка керуючої програми	94
4 Конструкторська частина	106
4.1 Проектування робочого пристосування.....	106
4.1.1 Конструкція та принцип дії пристосування	106
4.1.2 Визначення похибки базування та закріплення. Розрахунок пристосування на точність	108
4.1.3 Визначення необхідної сили затиску. Вибір приводу	111
4.2 Проектування контрольного пристосування.....	114

4.2.1 Конструкція і принцип дії контрольного пристосування	114
4.2.2 Визначення похибки базування і закріплення. Розрахунок пристосування на точність	116
5. Розрахунок деталі на міцність	118
6 Оцінка очікуваної економічної ефективності розробки або заходів	122
7 Заходи з охорони праці	134
7.1 Охорона праці під час роботи з електроерозійним обладнанням	134
7.1.1 Основні небезпечні моменти під час роботи з електроерозійним обладнанням та заходи для їх запобігання	134
7.1.2 Дії у разі аварійних ситуацій.....	135
7.1.3 Підсумок.....	136
Висновок	137
Перелік джерел посилання	140
Додаток А специфікація робочого пристосування	146
Додаток Б Специфікація контрольного пристосування.....	148

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ЕЕО – електроерозійна обробка

ПЛК – програмовані логічні контролери

КВТ – компресор високого тиску

ГКМ – горизонтально-кувальна машина

КГШП – кривошипний гарячештампувальний прес

МОП – маршрут обробки поверхонь

ППТЯ – послідовність показників якості і точності

МВД – маршрут виготовлення деталі

ТО – технічне обладнання

ЧПК – числове-програмне керування

ТП – технологічний процес

ЗОР – змащувально-охолоджуюча рідина

ВСТУП

Метою дипломної роботи є удосконалення технологічного процесу виготовлення складнопрофільних авіаційних деталей.

Основне завдання – розробка технологічного процесу виготовлення деталі з економічно доведеною ефективністю.

Сучасна авіаційна промисловість ставить перед виробниками високі вимоги до якості, надійності та ефективності виготовлення деталей. Розвиток авіації потребує постійного впровадження нових матеріалів, технологій та інженерних рішень, які забезпечують легкість конструкцій, довговічність, стійкість до екстремальних умов експлуатації та відповідність суворим міжнародним стандартам.

Інновації в обробці металів, використання адитивних технологій (3D-друк), розробка нових сплавів та інтеграція автоматизації у виробничі процеси відкривають нові горизонти для підвищення продуктивності та зниження собівартості. Удосконалення методів виробництва не лише сприяє створенню більш ефективних і економічних літаків, але й відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки польотів і розвитку авіації як галузі.

У цьому дипломному проєкті буде розглянуто основні інновації виготовлення деталей в авіаційній промисловості, з упором на електроерозійні технології.

1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Вступ

Виробництво складнопрофільних авіаційних деталей являється однією з найтехнологічніших сфер сучасної промисловості. Це обумовлено тим, що таке виробництво потребує максимальної точності, міцності і надійності деталей. Для того щоб досягнути таких високих потреб, необхідно впроваджувати сучасні підходи до технологічного забезпечення, що означає необхідність застосування новітнього обладнання, інноваційних матеріалів, цифрових технологій і автоматизованих систем управління.

Специфіка авіаційної промисловості вимагає необхідність використання оптимального поєднання ефективності, зокрема економічної, і якості. Зважаючи на це є вкрай важливі питання, які стосуються вибору інструментів, оптимізації процесів, найкращих режимів обробки і застосування адитивних технологій. Дослідження сучасних підходів в авіаційній промисловості дозволить підвищити ефективність виробництва і експлуатації, а також конкурентоспроможність серед інших підприємств в галузі.

В цьому дипломному проекті буде розглянуто основні інновації які можна використовувати для покращення технологічного забезпечення, а також їх вплив на виробництво складнопрофільних авіаційних, і не тільки, деталей, враховуючи питання точності, економічності, і експлуатаційних показників готової продукції. Основна увага приділена впровадженню електроерозійного обладнання.

1.2 Обладнання для технологічного забезпечення при виробництві складнопрофільних деталей

Для технологічного забезпечення при виробництві складнопрофільних деталей можуть використовуватись різні види обладнання, їх вибір і спектр залежить від безпосередньо складності профілю, матеріалу деталі і експлуатаційних умов. Для деталі типу «Диск 0 ступеня КВТ» можна розглядати такі види обладнання технологічного забезпечення:

- 1) Верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК);
- 2) Адитивне обладнання
- 3) Лазерні і плазмові системи
- 4) Обладнання для термічної обробки
- 5) Вимірювальні та контрольні системи
- 6) Гідроабразивні верстати та верстати для електроерозійної обробки
- 7) Автоматизовані складальні лінії

Розглянемо більш детально обладнання для електроерозійної обробки.

1.3 Електроерозійне обладнання

1.3.1 Основи електроерозійної обробки

Електроерозійна обробка (англ. EDM — Electric Discharge Machining) є одним із методів електрофізичної обробки, що базується на зміні форми, розмірів і якості поверхні заготовки з електропровідного матеріалу під впливом електричних розрядів (іскрових або дугових). Цей процес передбачає контрольоване руйнування матеріалу в зоні дії розрядів між двома електродами,

що робить його різновидом механічної обробки із застосуванням явища електричної ерозії.

Електроерозійна обробка є одним із найсучасніших і інноваційних методів виробництва, який широко використовується для створення деталей складної геометрії з високоміцних матеріалів. Завдяки своїм унікальним можливостям електроерозійна обробка дозволяє досягти високої точності, складності форм і якості поверхонь, недосяжних для традиційних механічних методів.

Особливе значення електроерозійна обробка має у галузях, які висувають підвищені вимоги до точності та надійності виробів, таких як авіабудування, космічна індустрія, медицина, енергетика та виготовлення інструментів. Ця технологія дає змогу працювати з матеріалами, які відрізняються високою твердістю, теплостійкістю чи складною оброблюваністю, такими як титан, нікелеві сплави, вольфрам і тверді сплави.

Електроерозійна обробка включає два основних методи: дротяну різку та заглибну обробку. Дротяна різка використовується для створення прорізів і контурів із високою точністю, тоді як заглибна обробка дозволяє формувати порожнини складної форми, наприклад, у матрицях і штампах. Обидва методи забезпечують мінімальний механічний вплив на заготовку, уникаючи утворення тріщин або деформацій, що є особливо важливим для деталей з високими вимогами до надійності.

При електроерозійній обробці провідні матеріали обробляються за допомогою серії електричних розрядів (іскор), які утворюються між точно розташованим рухомим дротом (електродом) і заготовкою. Високочастотні імпульси змінного або постійного струму розряджаються від дроту до заготовки з дуже малим іскровим проміжком через ізольовану діелектричну рідину (воду). Тепло кожної електричної іскри, яке оцінюється приблизно від 8300...11000°C [1], руйнує крихтний шматочок матеріалу, який випаровується і плавиться з заготовки. (Частина матеріалу дроту також розмивається) Ці частинки (стружка) вимиваються з розрізу струменем деіонізованої води через верхнє і нижнє промивні сопла, або циркуляцією води в зоні обробки. Вода також запобігає

накопиченню тепла в заготовці. Без такого охолодження теплове розширення деталі вплинуло б на розмір і точність позиціонування. Саме час вмикання та вимикання іскри, який повторюється знову і знову, видаляє матеріал, а не просто потік електричного струму. Схематично зображений процес електроерозійної обробки (електроерозійного різі) можна побачити на рисунку 1.1.

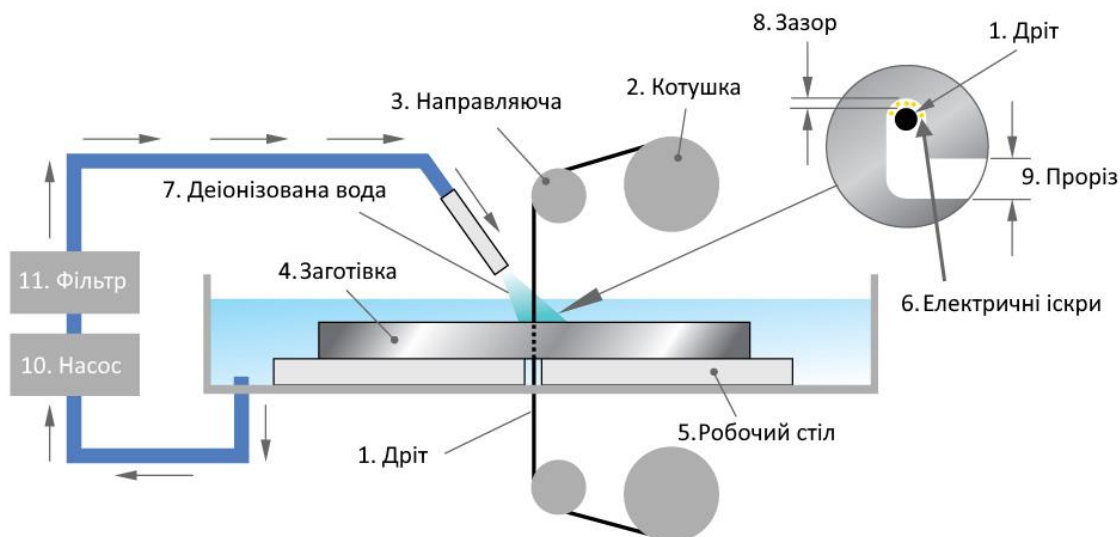


Рисунок 1.1 – Схематично зображений процес електроерозійної обробки [2]

На рисунку 1.1 можна побачити як дріт 1 подається з котушки 2, проходить через направляючі 3, а потім і через заготовку 4, що розміщена на робочому столі 5, забезпечуючи таким чином постійний контакт з матеріалом. Між дротом 1 і заготовкою 4 виникають електричні іскри 6. Ці самі іскри спричиняють локальне плавлення або навіть випаровування матеріалу з деталі. У цей же час деіонізована вода 7 поступає в зону обробки, або в деяких випадках обробка відбувається при «зануренні» в робочу рідину. Деіонізована вода охолоджує зону обробки, запобігаючи перегріву, змиває частинки відпрацьованого матеріалу, а також виступає в ролі діелектрика. Увесь процес автоматично контролюється, підтримується постійний зазор 8 між дротом 1 і заготовкою 4, а дріт у свій час рівномірно рухається із визначеною заздалегідь швидкістю(режимами). У результаті електроерозійного процесу формується проріз 9 із певною шириною, яка залежить від діаметра дроту 1 та налаштувань режимів обробки. Якщо процес

відбувається із зануренням заготовки у робочу рідину, в процесі також присутній насос 10 який допомагає робочій рідині циркулювати та вимивати відпрацьований матеріал, та фільтр 11 щоб той же відпрацьований матеріал, матеріал дроту та інші домішки не потрапляли у зону обробки.

Таким чином досягається досить висока точність обробки, а використовуючи сучасне обладнання і з використанням ЧПК точність такої обробки може сягати $\pm 0,0005$ мм, за словами виробників такого обладнання [3]

Енергія імпульсних розрядів, що виникають між катодом і анодом, варіюється від $10^{-6} \dots 10^{-4}$ Дж до 20...30. Напруга між електродами-інструментом і заготовкою становить від 10...20 В до 300...400 В. Тривалість імпульсів коливається від часток мікросекунд до кількох мікросекунд, а їхня частота може змінюватися від 50 Гц до 1МГц [2].

Електроерозійна обробка поділяється на два види: електроіскрову та електроімпульсну. Основна відмінність між ними полягає в тривалості імпульсу: для електроіскрової обробки вона становить менше ніж 10^{-4} секунди, а для електроімпульсної – більше ніж 10^{-3} секунди. Крім того, ці методи відрізняються за скважністю: у випадку електроіскрової обробки $g > 5$, тоді як для електроімпульсної $g < 5$ [4].

Скважність g – це відношення періоду повторення імпульсу T , до його тривалості τ :

$$g = \frac{T}{\tau} \quad (1.1)$$

Основні матеріалами для виготовлення електрода-інструмента [5]:

- мідь;
- латунь;
- молібден;
- алюміній;
- сталь;

- вольфрам;
- графіт;
- композитні матеріали, тощо.

Розглянемо більш детально суть процесу електроерозійної обробки.

Спочатку(рис. 1.2), при електроерозійній обробці із зануренням у робочу рідину(2), електрод(1) наближається до заготовки(3) і під напругою між заготовкою(3) і електродом(1) виникає іскра(4).

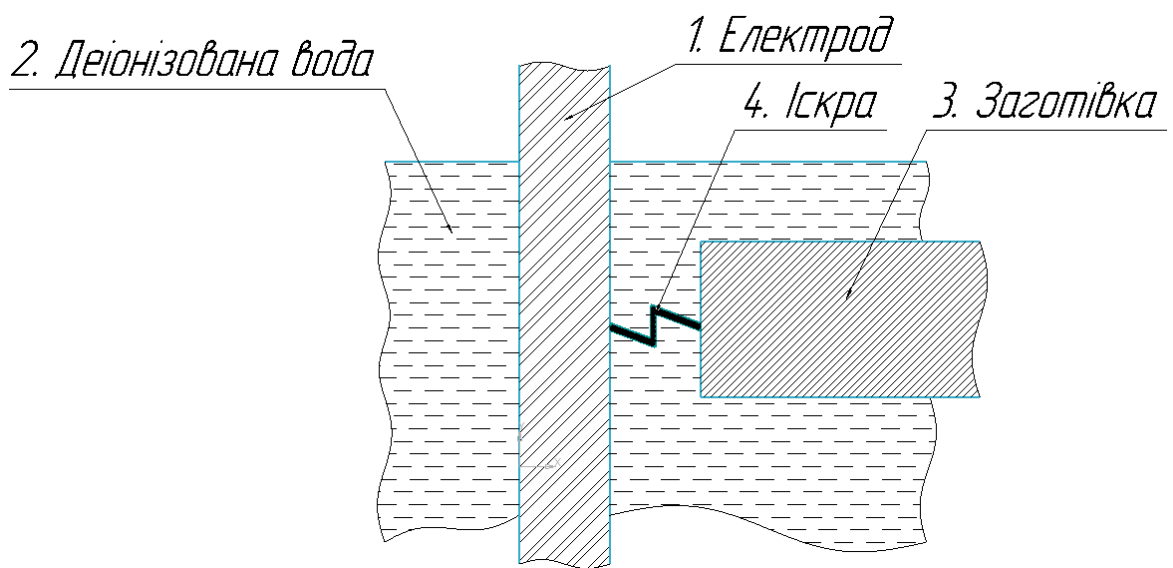


Рисунок 1.2 – Початок обробки електроерозійним методом [6, с.62-89]

Після першої ж іскри, на поверхнях заготовки (3) і електроду (1) виникають мікронерівності (5) (рис. 1.3), а частинки видаленого матеріалу заготовки (6) і електроду (7) вимиваються деіонізованою водою, або іншою робочою рідиною. Наступна ж іскра (4) виникає там, де відстань між електродом (1) і заготовкою (3) найменша – L_{\min} .

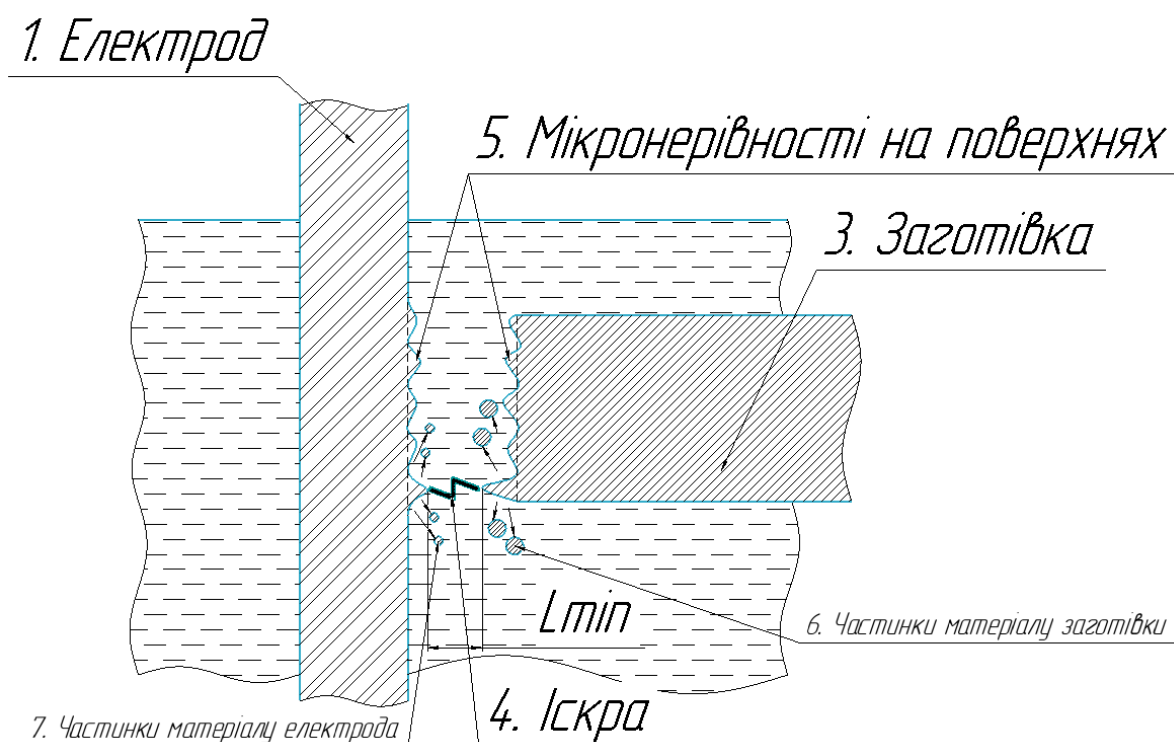


Рисунок 1.3 – Мікронерівності на поверхнях деталі і електрода [6, с.62-89]

Після кількох таких циклів з іскрами, які можуть виникати до 1 мільйона разів на секунду, поступово починає видалятися шар матеріалу заготівки (8), як показано на рисунку 1.4. В цьому і полягає суть електроерозійної обробки, зокрема дротом. Але слід пам'ятати, що шар видаляється не лише з заготівки, а й з електрода (7). Саме тому подача електрода здійснюється за допомогою катушок. При тривалій обробці дротом катушки і дріт потребують заміни. Відпрацьований дріт або утилізується, або, що частіше відбувається, використовується в подальшому при чорновій обробці інших заготовок, або при обробці заготовок де шорсткість та точність обробки не в пріоритеті.

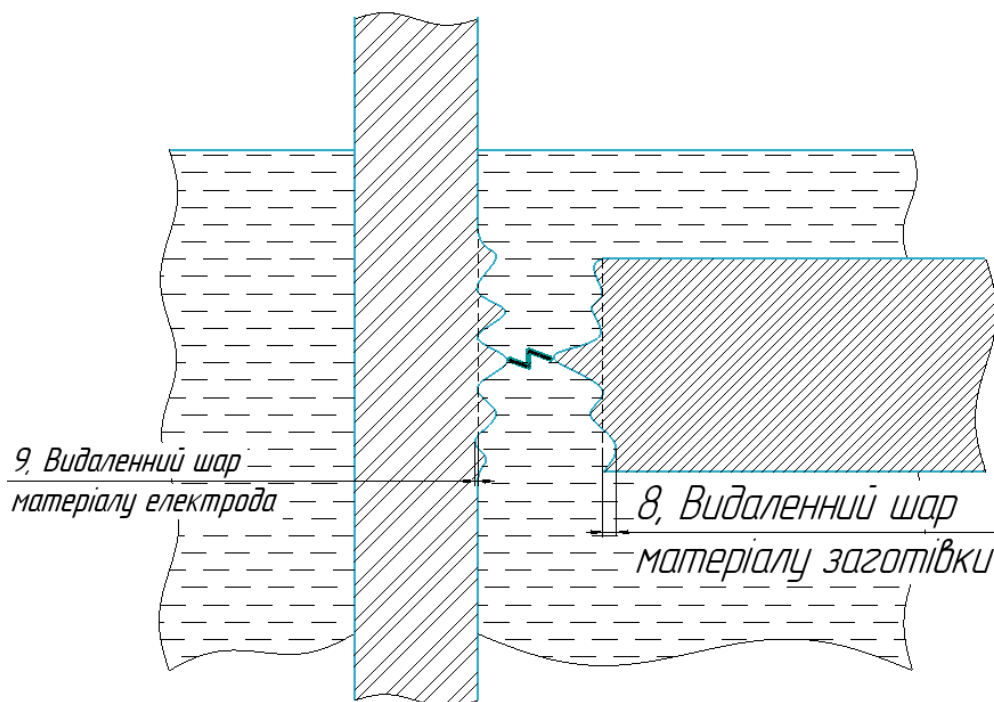


Рисунок 1.4 – Видалений шар матеріалу заготовки і електрода [6, с.62-89]

Для того щоб між заготовкою і електродом утворювалися іскри, потрібно використовувати діелектрики, якими можуть бути повітря, інші гази, масла, нафтопродукти, деіонізована або дистильована вода. Проте зазвичай використовують діелектрик у виді робочої рідини. Це обумовлено тим, що діелектрична рідина забезпечує стабільність, охолодження, видалення продуктів ерозії, якість поверхні та безпеку процесу, в той час як гази або повітря використовуються лише у спеціалізованих випадках, коли, наприклад, потрібна обробка в складних умовах (наприклад, зменшення впливу рідин на матеріал) [6, с. 4-5, с. 154]. Проте і серед рідин вистачає різноманітності діелектриків, так, наприклад, деякі верстати використовують нафтопродукти в якості діелектрика. Доцільність застосування нафтопродуктів можна оцінити за допомогою графіка зображеного на рисунку 1.5, на якому показано вплив властивостей діелектричного середовища на величину пробивної напруги та величину простору між інструментом-електродом і оброблюваною заготовкою, де відбувається іскровий розряд, так званим міжелектродним проміжком.

Міжелектродний проміжок, або інакше міжелектродний простір, в свою чергу впливає на якість, точність і стабільність електроерозійного процесу [6, с.177-186]. Так, занадто малий проміжок може спричинити коротке замикання, перегрів електроду або заготовки, і в цілому знижує якість і точність обробки, а занадто великий проміжок знижує ефективність розряду, що уповільнює обробку і теж знижує точність.

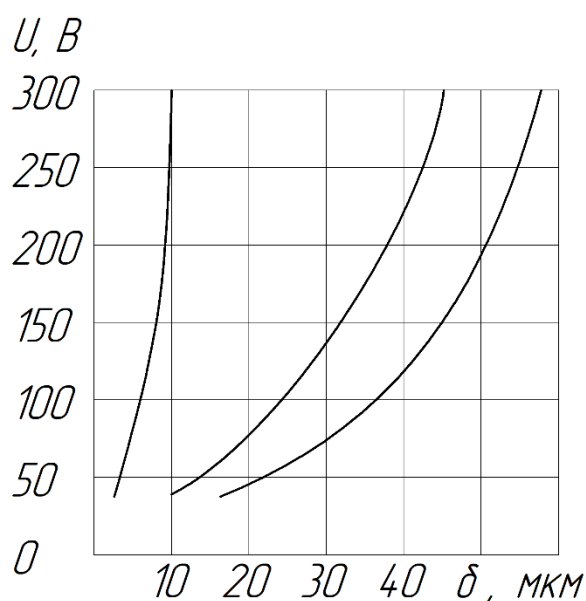


Рисунок 1.5 – Порівняння впливу діелектричного середовища на величину пробивної напруги і міжелектродний проміжок: 1 – повітря; 2 – гас; 3 – трансформаторне масло [7, с.14]

Слід зазначити, як саме відбувається електроерозійна обробка і виникають іскри якщо для цієї обробки використовується діелектричне середовище, Основна суть використання будь-якого діелектричного середовища полягає в тому, що воно є ізолятором і діелектриком до тих пір, поки не буде прикладено достатньо напруги яка подолає діелектричні властивості і змусить стати середовище провідником.

Але навіть при достатній нарузі діелектричні рідини, що застосовуються при електроерозійній обробці, лишаються діелектриками та ізолюють деталь від електроду, за окрім найближчих місцях між електродом і заготовкою – L_{\min} , як,

наприклад, проілюстровано на рисунку 1.3. В цих найближчих місцях між електродам і заготівкою діелектрик перетворюється на провідник, що з'єднує електрод і заготівку, цим самим створюючи іскру, розряд. Момент, коли діелектрик перестає бути ізолятором і стає провідником називається точкою іонізації [6, с.3], і в цей момент, утворюється зона діелектрика що стає провідником, така зона називається іонізованою [6, с. 65]. Цей момент проілюстровано на рисунку 1.6. Після того як напруга вимикається або зменшується, іскра зникає, і рідина знов стає діелектриком і виконує функції ізолятора. Цей процес називається деіонізацією. Такий цикл із подачею напруги, і вимиканням напруги, утворенням іонізованої зони, а після деіонізації, відбувається для кожної іскри що виникає під час електроерозійної обробки. Частота таких циклів може сягати 1МГц, або інакше мільйон разів на секунду.

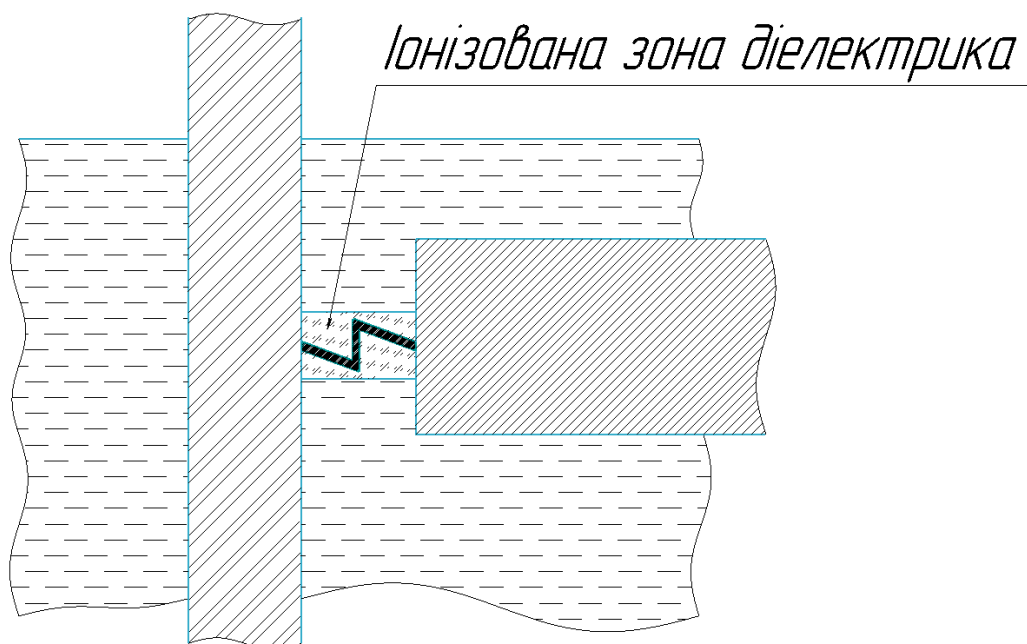


Рисунок 1.6 – Утворення іонізованої зони діелектрика [6, с.62-89]

1.3.2 Вплив режимів і параметрів електроерозійної обробки на результат

Електроерозійна обробка має значний вплив на поверхню оброблюваної деталі, який потрібно враховувати під час проектування технології обробки.

Перш за все, поверхня після електроерозійної обробки має характерний мікрорельєф, утворений кратерами, що залишаються від дії розрядів, приблизний вплив на поверхню показаний на рисунку 1.7.

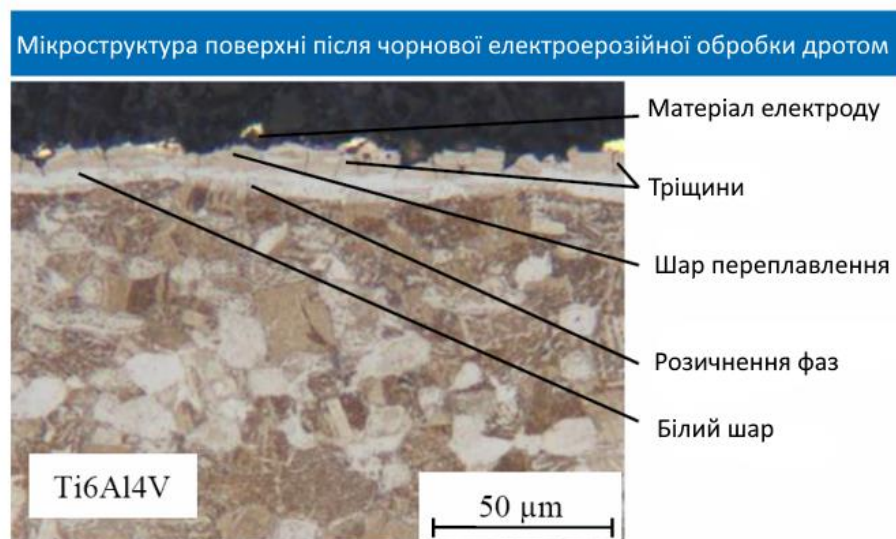


Рисунок 1.7 – Мікроструктура поверхні після чорнової електроерозійної обробки дротом [8]

На рисунку 1.7 можна побачити мікроструктуру поверхні, отриманої після грубої обробки дротяною електроерозійною машиною для титаново-алюмінієвого сплаву Ti6Al4V. На рисунку проілюстровано такі елементи:

Матеріал дроту – верхній шар, який ілюструє залишки або вплив матеріалу електрода, що бере участь у процесі обробки. Під час електроерозійної обробки дріт-електрод піддається ерозії, і його частинки можуть зміщуватися з поверхнею заготовки.

Тріщини що виникають унаслідок високих локалізованих температур і швидкого охолодження. Ці тріщини можуть знижувати механічну міцність і втомну витривалість матеріалу.

Шар переплавлення – верхній шар матеріалу, що розплавився під дією електричних розрядів і затвердів під час охолодження. Цей шар часто має високу твердість, але може бути крихким і містити залишкові напруження.

Зона розчинення фаз – це зона, де фази матеріалу піддаються повторному розчиненню або трансформаціям через термічну дію. Це може змінити механічні властивості матеріалу, такі як твердість і пластичність.

Поверхневий шар, що характеризується зміненою мікроструктурою через швидке нагрівання і охолодження названо білим шаром. Цей шар часто має підвищену твердість і відрізняється за хімічним складом від основного матеріалу через вплив матеріалу електрода або діелектрика.

Глибина та розмір кратерів визначають шорсткість поверхні. Чим більший струм і триваліший імпульс, тим глибшими будуть кратери, а отже, і гірша шорсткість. Для досягнення високої якості поверхні та кращої шорсткості зазвичай використовують кілька етапів обробки: чорнова, чистова та фінішна обробка. Остання проводиться за мінімальних енергетичних параметрів для створення гладкої поверхні з наднизькою шорсткістю (наприклад, $R_a < 0,2$ мкм).

Крім того, в зоні обробки формується перехідний шар, що складається з трьох основних зон: поверхневого шару, шару плавлення та ураженого теплом шару. Поверхневий шар зазнає змін через швидке нагрівання і подальше охолодження. Шар плавлення складається з матеріалу, що розплавився і затвердів, утворюючи нові мікроструктурні фази, які часто мають підвищену твердість. Наприклад, у сталях може утворюватися мартенсит, що підвищує твердість, але знижує пластичність. Шар уражений теплом характеризується менш вираженими змінами структури, але також впливає на механічні властивості матеріалу.

Оскільки обробка супроводжується інтенсивним локалізованим термічним навантаженням, це може призводити до появи мікротріщин на поверхні деталі.

Такі тріщини особливо характерні для крихких матеріалів або при роботі за надмірно жорстких режимів. Для їх мінімізації необхідно правильно підбирати параметри процесу та якість діелектрика.

Ще одним важливим аспектом є утворення залишкових напружень на поверхні. Вони можуть бути як стискаючими, так і розтягувальними залежно від режиму обробки. Стискаючі напруження зазвичай позитивно впливають на втомну міцність деталі, тоді як розтягувальні можуть викликати зниження ресурсу через схильність до розвитку тріщин.

Хімічний склад поверхні також може змінюватися внаслідок дифузії елементів із діелектрика або електрода в оброблюваний матеріал [9]. Наприклад, під час використання вуглеводневих діелектриків може спостерігатися карбонізація поверхні, що впливає на її властивості. Тому вибір діелектрика та контроль його стану є важливими факторами для забезпечення стабільної якості.

Також важливим фактором впливу на поверхню під час обробки має діелектрична речовина. Так, у випадку застосування рідкого діелектрика, було визначено що важливим параметром є ламінарна течія робочої рідини, це є необхідною умовою для забезпечення високої якості обробленої поверхні, зокрема її шорсткості [10].

Важливо зазначити, що електроерозійна обробка дозволяє досягти високої точності та повторюваності обробки, що є однією з її основних переваг. Проте рівномірність процесу залежить від стабільності електрода, параметрів розряду та ефективного відведення тепла.

Для мінімізації негативних наслідків ЕЕО часто застосовують фінішні обробки, таку як полірування для зняття мікрорельєфу або термообробку для зниження залишкових напружень. Завдяки своїй універсальності, електроерозійна обробка широко використовується для обробки складних деталей із титанових сплавів, твердих сплавів, надтвердих матеріалів і навіть діелектриків, проте її вплив на поверхню вимагає детального аналізу та контролю.

1.3.3 Приклад проектування і розробки керуючої програми для електроерозійного обладнання на базі SprutCAM

В основному, дротяна електроерозійна обробка використовується, коли традиційна обробка ускладнена або економічно не вигідна через відходи або важкооброблювані (загартовані) метали.

Електроерозійні верстати з ЧПК використовуються для різання металів методом електроерозії. Верстати доступні з 2 або 4 осями, які можуть різати криволінійні контури з вертикальними або конічними сторонами (рис. 1.8).

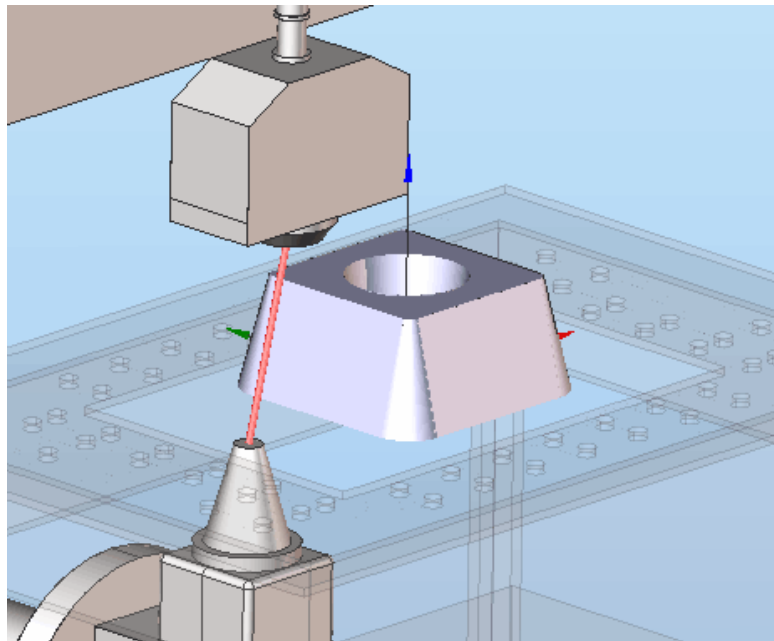


Рисунок 1.8 – Приклад обробки деталі із гранями під нахилом

Операції контурного різання використовуються для створення траєкторії руху дроту з використанням 2D контуру для 2-осьового контурного різання або одночасно по двох контурах: верхньому і нижньому для 4-осьового контурного різання. Також можлива обробка декількох контурів за одну операцію. Список контурів, необхідних для обробки, вибирається в <Призначення завдання> (рис 1.9).

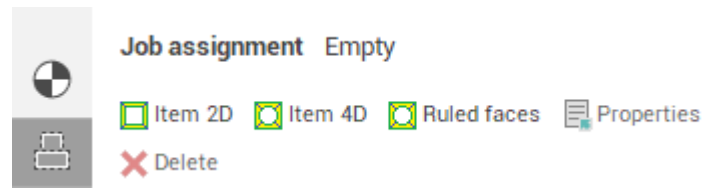


Рисунок 1.9 – Меню <Призначення завдання>.

У призначенні завдання користувач також може вказати необхідний напрямок обробки. Програма автоматично може розрахувати напрямок компенсації - напрямок, у якому система числового програмного керування компенсує відхилення між фактичною траєкторією дроту та ідеальною контурною лінією деталі. Ця компенсація враховує діаметр дроту і зазор між дротом та оброблюваною деталлю, який утворюється під час обробки через електричні розряди. Він також враховує тип контуру і напрямок обробки. Для кожного контуру можна визначити початкову і кінцеву точки обробки, точки навантаження і дроту деталі, кути витяжки, тощо.

Для початкової і кінцевої точок кожного контуру можна створити додаткові переміщення підведення і відведення. Використання цих додаткових переміщень допомагає забезпечити правильну обробку початкових і кінцевих точок. Методи підведення і відведення та їх параметри визначаються на сторінці <Підведення/Відведення> вікна параметрів операції (рис. 1.10).

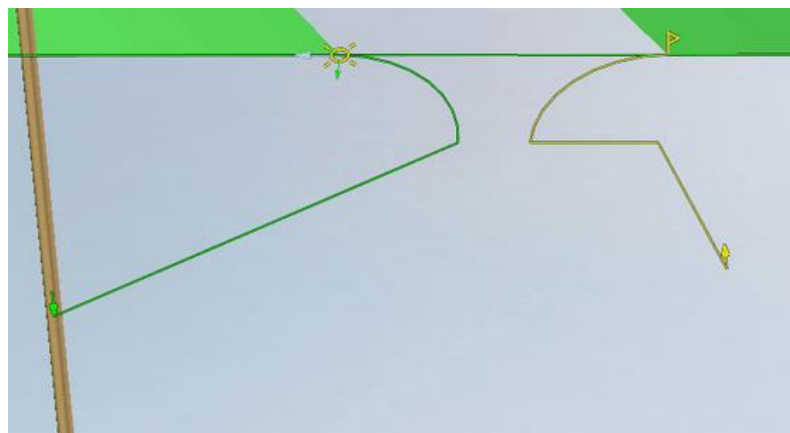


Рисунок 1.10 – Приклад траєкторії підводу та відводу інструмента

Щоб забезпечити хорошу якість поверхні, іноді необхідно зробити кілька проходів по контуру. SprutCAM X дозволяє використовувати різні методи для цих проходів: чорнові, чистові, перемички, відсікання, тощо. Включення і виключення цих проходів, а також визначення їх додаткових параметрів здійснюється на сторінці <Стратегія> у вікні параметрів операції (рис. 1.11). Для цього доступні різні опції: оптимізований напрямок траєкторії, вибраний тип компенсації, тощо.

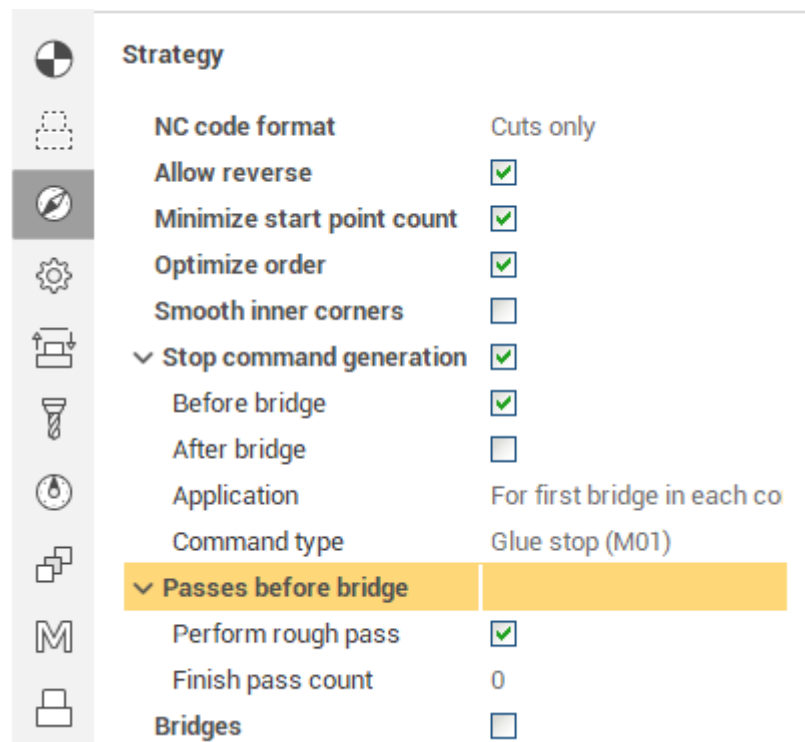


Рисунок 1.11 – Меню стратегія у програмі SprutCAM X

Більшість сучасних електроерозійних ЧПК систем дозволяють завантажувати безпосередньо в ЧПК таблицю заздалегідь визначених режимів різання для кожного проходу по контуру. В процесі обробки один з цих наборів таблиць вибирається шляхом включення в G-код спеціальної інструкції для цього режиму різання. SprutCAM X підтримує цей метод призначення режимів різання в операціях електроерозійної обробки дроту. Модифікація цих таблиць режимів обробки виконується на сторінці <Подачі/Швидкості> у вікні параметрів операції (рис. 1.12). На цій сторінці можна редагувати умови обробки

для кожного проходу, включаючи значення зміщення дроту і кілька інших параметрів: висоту і матеріал заготовки, діаметр і матеріал дроту, а також необхідну чистоту поверхні. Таблиці умов обробки можуть бути обрані з бібліотек технологій обробки або визначені для кожної операції вручну. Робота з бібліотеками технологій обробки здійснюється в тому ж вікні на окремій вкладці.

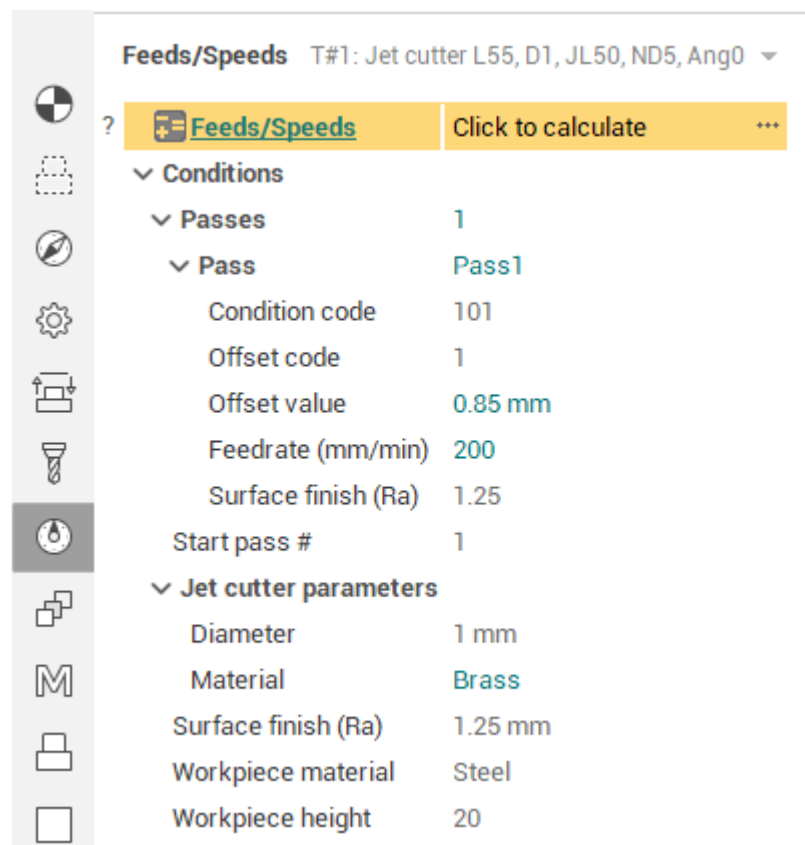


Рисунок 1.12 – Меню редагування подачі і швидкості обробки

Специфічні властивості для кожної операції визначаються на сторінці <Параметри> вікна параметрів операції. Як наслідок, це вікно виглядає по-різному для двохосової і чотирьохосової обробки.

При обробці деталі з повторюваними елементами (однотипні отвори, пази, тощо) доцільно використовувати <Трансформація>, це скорочує час розрахунку і зменшує час, необхідний для налагодження даних ЧПК. Функція доступна у вікні параметрів операції.

1.3.3.1 Приклад розробки та проєктування на двох-осьовому електроерозійному верстаті з ЧПК

Операція <Wire Countouring EDM 2d> призначена для створення траєкторії руху дроту вздовж плоских контурів, а також вздовж плоских контурів з кутом нахилу дроту (конусність) або 3d-контуровання. Отримана траєкторія дроту базується на контурах, які лежать в одній площині (рис 1.13), на відміну від операції чотирьохосьової контурної обробки, де необхідно вибрати контури для нижньої площини (площина робочих контурів XY) і верхньої площини (площина провідних контурів UV).

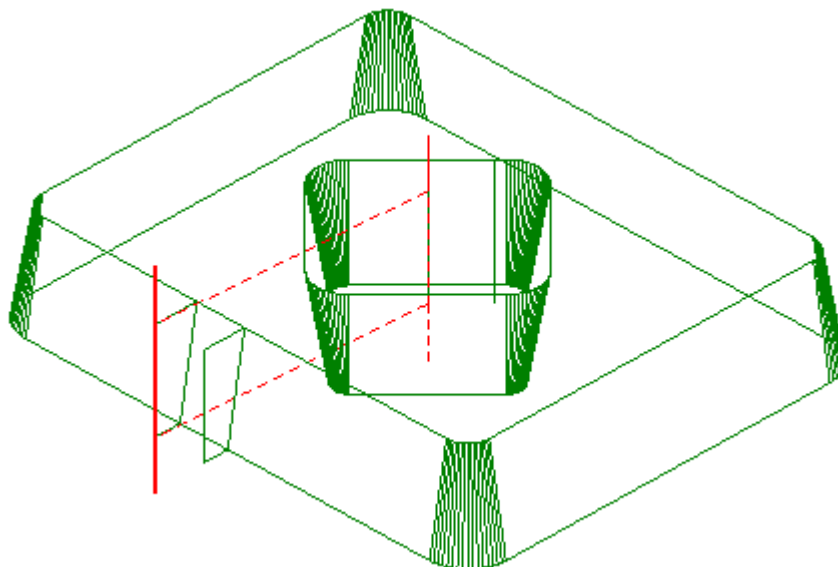


Рисунок 1.13 – Приклад траєкторії руху дроту при двохосьовій обробці

Конкретні параметри для кожної операції визначаються у вікні параметрів операції на сторінці <Параметри> (рис. 1.14).

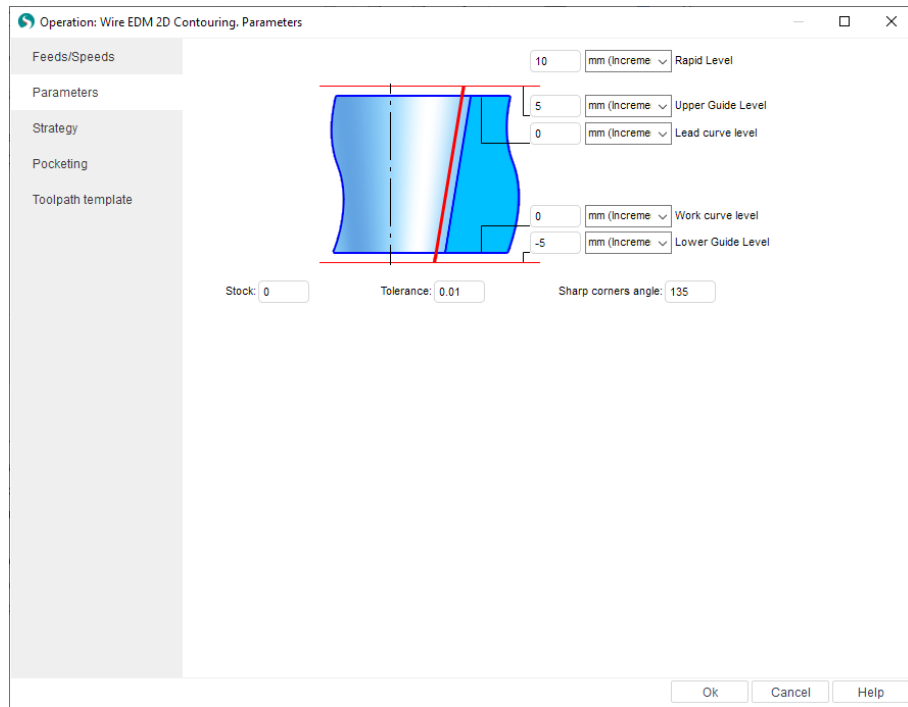


Рисунок 1.14 – Меню <Параметри> для двохосьової обробки

Доступні наступні параметри і налаштування операції:

<Швидкий рівень> - визначає рівень Z , на якому виконуються швидкі переміщення. Він повинен бути розташований над усіма робочими рівнями, щоб швидкі переміщення виконувалися на висоті, вільній від кріплень тощо;

<Верхня напрямна> - визначає рівень Z для верхньої напрямної дротового електроерозійного верстата;

<Рівень кривої випередження> - для чотирьохосьової обробки визначає рівень Z верхнього ведучого (UV) контуру. Для двохосьової визначає висоту, на якій буде створюватися «віртуальний» верхній контур;

<Рівень робочої кривої> - зазвичай рівень Z робочого (програмного) контуру;

<Рівень нижньої направляючої> - визначає рівень Z для нижньої направляючої дротяного електроерозійного верстата;

<Запас> - значення додаткового запасу, який повинен бути використаний для всіх контурів в роботі. Метод розрахунку цього значення залежить від обраного <Типу компенсації> на сторінці <Стратегія>;

<Допуск> - це розрахунковий допуск, який визначає максимальне відхилення приблизної траєкторії проводів від ідеальної. Якщо встановити занадто високий допуск, то час розрахунку може бути надмірним, і навпаки, якщо встановити занадто низький допуск, то на деталі можуть почати з'являтися неприпустимі зазубрини;

<Кут гострих кутів> дозволяє визначити, які кути є гострими. Якщо модуль кута більше заданого значення, то він визначається як тупий і не буде прокатуватися.

1.3.3.2 Приклад розробки та проектування на чотирьохосьовому електроерозійному верстаті з ЧПК

Операція <Wire EDM 4d Contouring> призначена для створення траєкторії руху дроту по двох плоских контурах одночасно. Один з цих контурів переміщує нижню направляючу дротяного електроерозійного верстата, точніше - переміщує робочу (XY) площину контуру. Другий контур переміщує верхню направляючу дротяного електроерозійного верстата - ведучий (UV) контур. Таким чином, в процесі роботи верхній і нижній кінці дроту можуть рухатися по різних траєкторіях, як показано на рисунку 1.15.

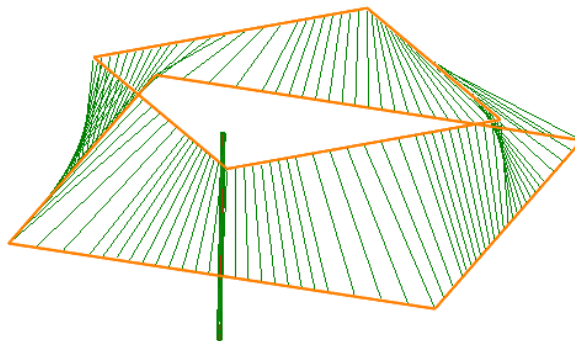


Рисунок 1.15 – Приклад траєкторії руху дроту при чотирьохосьовій обробці

Конкретні параметри для кожної операції також визначаються у вікні параметрів операції на сторінці <Параметри> (рис. 1.16).

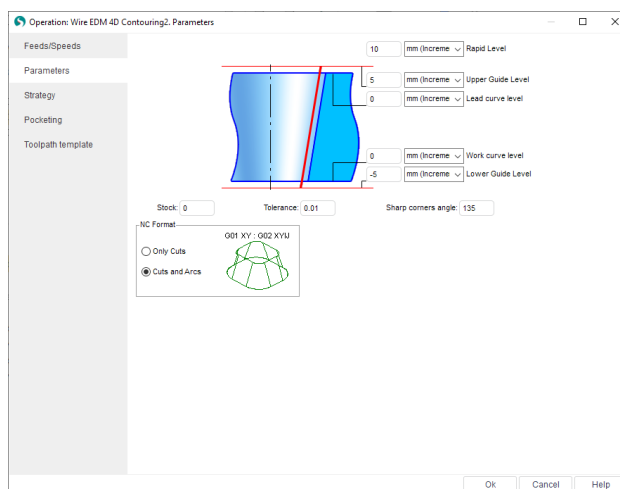


Рисунок 1.16 – Меню <Параметри> при чотирьохосьовій обробці

Більшість параметрів для налаштування ті ж самі що і при розробці керуючої програми для двохосьової обробки, але є й нові:

<Формат ЧПК> - на цій панелі можна вибрати один з двох форматів для G-коду:

<Тільки прямі> - всі дуги у вихідних контурах будуть апроксимовані лінійними відрізками (<Прямі>). G-код буде містити тільки лінійні переміщення. NC-блоки в цьому випадку одночасно містять координати нижнього контуру (X, Y) і верхнього контуру (U, V). Блок коду буде виглядати наступним чином (рис. 1.16, а):

```
G01 X65.852 Y-89.422 U-3.902 V19.616
```

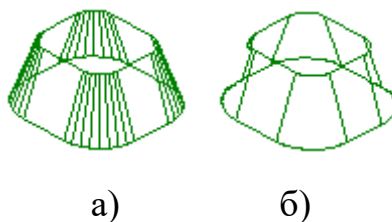


Рисунок 1.17 – Приклад траєкторії при використанні: а – <Тільки прямі>; б – <Прямі і дуги>.

<Прямі і дуги> - G-код може містити лінійні відрізки та дуги. Зазвичай NC-блок у цьому форматі складається з двох частин, які розділяються двокрапкою. У лівій частині блоку знаходяться ходи для нижнього контуру, а в правій - ходи для верхнього контуру (рис. 1.16, б). Блок коду буде виглядати наступним чином:

G03 X60. Y90. I-30. J0 : G03 X60. Y70. I-10. J0.

1.4 Висновки

В цьому розділі було розглянуто та проаналізовано сучасні підходи до виробництва складнопрофільних авіаційних деталей, зокрема на використанні технологій електроерозійної обробки (EDM). Для забезпечення високої точності, міцності та надійності деталей у виробництві активно впроваджуються новітні технології, такі як верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), адитивні технології, лазерні та плазмові системи, а також автоматизовані складальні лінії. Це дозволяє значно підвищити ефективність виробництва завдяки автоматизації та цифровим рішенням.

Електроерозійна обробка є одним із найбільш перспективних методів роботи з високоміцними матеріалами, такими як титан і нікелеві сплави. Вона забезпечує високу точність обробки (до $\pm 0,0005$ мм) і дозволяє створювати деталі складної геометрії. Основними методами цієї технології є дротяна різка та заглибна обробка, які застосовуються для створення прорізів, контурів і порожнин. Процес обробки базується на електричних розрядах між електродом і заготовкою, що викликають локальне плавлення матеріалу.

Висока якість обробки залежить від правильно вибраних режимів роботи: тривалості імпульсів, частоти розрядів і типу діелектрика. Під час обробки формуються мікроструктурні зміни на поверхні деталі, такі як утворення шарів переплавлення та мікротріщин, які можуть впливати на її механічні властивості.

Практичне застосування електроерозійної обробки включає використання програмного забезпечення, наприклад SprutCAM для автоматизації процесів на дво- та чотирьохосьових верстатах. Розробка керуючих програм дозволяє оптимізувати траєкторії руху інструмента, налаштовувати параметри обробки та зменшувати витрати часу.

Таким чином, було продемонстровано важливість впровадження сучасних технологій у виробництво складнопрофільних деталей. Електроерозійна обробка є перспективною для роботи з важкооброблюваними матеріалами, а автоматизація процесів за допомогою ЧПК і спеціалізоване програмне забезпечення сприяє підвищенню якості, точності та конкурентоспроможності в авіаційній галузі.

Також, в цьому розділі було описано недоліки електроерозійної обробки, які варто враховувати під час проектування технологічних процесів. Одним із головних недоліків є мікроструктурні зміни поверхні, такі як шар переплавлення, мікротріщини та залишкові напруження, які можуть знижувати міцність і довговічність деталей, особливо в умовах втомного навантаження. Процес є енергоємним, оскільки потребує значної кількості енергії для генерації електричних імпульсів, що підвищує виробничі витрати.

Значною проблемою є також знос електродів, особливо дротяних, які поступово руйнуються під час обробки, що вимагає частих заміन і підвищує витрати на інструмент. Процес також дуже чутливий до різноманітних параметрів: неправильне налаштування може призвести до перегріву, коротких замикань, утворення нерівностей і зниження точності. Використання діелектричних рідин, таких як масла чи трансформаторні рідини, може змінювати хімічний склад поверхні деталей, наприклад, викликати карбонізацію, що потребує додаткового контролю.

Електроерозійна обробка характеризується відносно низькою продуктивністю порівняно з іншими методами, що може стати критичним фактором вже для серійного виробництва. Крім того, цей метод обмежений у застосуванні до електропровідних матеріалів і непридатний для діелектриків, що

звужує його універсальність. У цілому, процес потребує ретельного налаштування та контролю для мінімізації негативного впливу на якість обробленої поверхні, забезпечення економічної доцільності та досягнення необхідних характеристик готової продукції.

Але основним недоліком можна вважати неможливість роботи з матеріалами, електропровідність яких занадто низька.

2 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ

2.1 Актуальні виклики щодо вирішення проблем автоматизації електроерозійної обробки

Автоматизація виробничих процесів є одним із ключових напрямів розвитку сучасного машинобудування, спрямованого на підвищення точності, продуктивності та економічної ефективності технологій обробки. У цьому контексті електроерозійна обробка (англ. Electric Discharge Machining - EDM) займає особливе місце завдяки своїй здатності виконувати високоточну обробку складних поверхонь і матеріалів із високою твердістю. Проте складність та енергоємність цього процесу створюють додаткові виклики для його впровадження у промислових умовах.

Автоматизація процесів електроерозійної обробки відкриває нові можливості для підвищення стабільності технологічного циклу, оптимізації параметрів обробки та зменшення людського втручання. Використання сучасних систем керування, інтелектуальних алгоритмів і робототехнічних рішень дозволяє значно знизити тривалість циклів обробки, мінімізувати знос електродів та покращити якість кінцевої продукції.

Особливий інтерес становить інтеграція автоматизованих рішень у складні виробничі системи, зокрема, застосування CAD/CAM-систем для програмування обробки, роботизованих комплексів для обслуговування обладнання, а також використання методів машинного навчання для контролю та коригування параметрів процесу в реальному часі. Таким чином, автоматизація ЕЕО є не лише ефективним інструментом для підвищення конкурентоспроможності підприємств, але й сприяє розвитку інновацій у виробничій сфері.

У цьому розділі розглянуто основні аспекти автоматизації та оптимізації електроерозійної обробки, сучасні тенденції в цій галузі, а також аналіз технологічних рішень, які забезпечують максимальну ефективність процесу.

2.2 Автоматизація і оптимізація електроерозійної обробки за допомогою інтелектуальної системи

Електроерозійна обробка (ЕО) може ефективно вирішити недоліки традиційних процесів обробки, які не можуть обробляти спеціальні матеріали, тому вона широко використовується для заготовок з матеріалами високої твердості, таких як титанові сплави та інструментальні сталі, для виготовлення різних форм і штампів. Однак робочі процеси електроерозійної обробки досить складні, а продуктивність обробки є відносно низька. Для оптимізації і підвищення ефективності обробки можуть використовуватися різні методи, які також сприяють автоматизації процесу.

Відповідні дослідження спрямовані на розробку технологічних рішень, які дозволять операторам електроерозійної обробки швидко визначати оптимальні параметри обробки для підвищення продуктивності обробки за різними показниками, такими як швидкість видалення матеріалу, якість поверхні та час обробки. Параметри обробки, які зазвичай використовуються в електроерозійній обробці, можна умовно розділити на дві категорії: електронні та неелектронні параметри [11]. В даний час багато дослідників глибоко вивчили вплив електричних параметрів, таких як струм, напруга, час увімкнення та вимкнення імпульсів і багатьох інших, на підвищення ефективності електроерозійної обробки [12-14].

Китайські дослідники [15] розробили інтелектуальну систему для автоматичного визначення та оптимізації параметрів обробки в процесі електроерозійного прошивання за допомогою штучних нейронних мереж. Вона показала, що використання поточного пікового значення в якості основної характеристики є цілком корисним і дозволяє досягти хорошої швидкості обробки за умови забезпечення точності обробки. Одні дослідники змоделювали процес електроерозійної обробки штампом за допомогою запропонованої теоретичної теплової моделі. Прогнозовані результати запропонованої моделі

показали, що збільшення струму розряду, напруги дуги або тривалості іскри призводить до підвищення швидкості видалення матеріалу і покращенню шорсткості поверхні заготовки [16]. Інші дослідники ж запропонували інтелектуальну модель для процесу електроерозійної обробки з використанням методу скінченних елементів та штучних нейронних мереж. Ця інтелектуальна модель була розроблена для встановлення зв'язку між вхідними умовами обробки, такими як потужність розряду та час іскроутворення, та показниками продуктивності обробки, такими як швидкість видалення матеріалу та швидкість зносу дроту [17]. А згідно з дослідженням деяких індійських дослідників, струм і час між імпульсами є найбільш важливими параметрами обробки для швидкості видалення матеріалу в нержавіючій сталі. Але в суміжних дослідженнях також повідомляється, що збільшення часу між імпульсами не впливає позитивно на швидкість видалення матеріалу і шорсткість поверхні [18].

І вже в новітніх дослідженнях успішно розроблено інтелектуальну систему для підвищення ефективності електроерозійної обробки, яка автономно призначає операції видалення стружки на основі встановленої моделі прогнозованого видалення стружки замість використання попередньо встановленого параметра [19]. Для досягнення мети цієї статті вчені вперше спробували застосувати технології штучного інтелекту та комп'ютерного зору для аналізу потокових зображень кривої обробки на екрані верстата в режимі реального часу для створення прогнозованої моделі видалення стружки. Результат розробки показує, що створена модель прогнозування видалення матеріалу та відходів обробки (стружки) за допомогою Так моделі і подібні до неї можуть досягати точності 96,93% для 750 зображень кривих обробки в тестовому наборі даних. Для подальшої перевірки ефективності підвищення ефективності обробки, в тому числі за допомогою регулювання нахилу дроту в реальному часі, запропонована система може заощадити майже 38,60% часу (рис. 2.1) обробки для глибини обробки 6,45 мм в конкретних умовах обробки в порівнянні з використанням фіксованого шаблону поведінки заданого параметра видалення матеріалу і стружки.

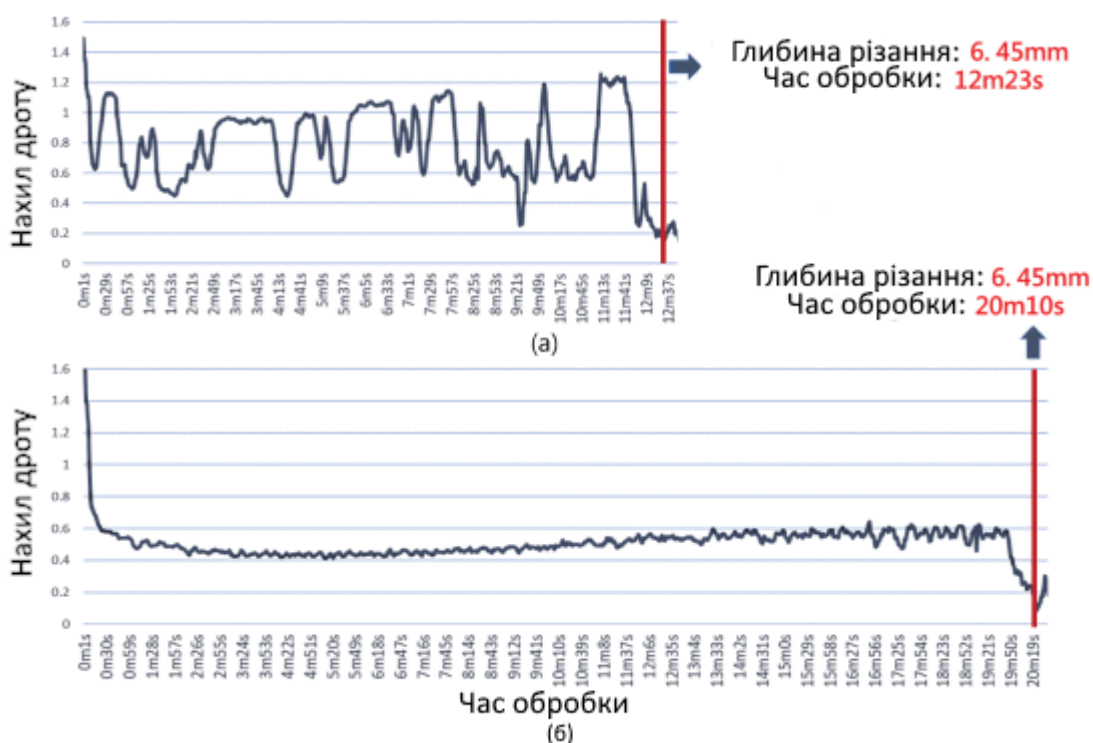


Рисунок 2.1 - Порівняння ефективності запропонованої інтелектуальної системи та використання заданої частоти видалення відходів при електроерозійній обробці: а – використання запропонованої інтелектуальної системи; б – використання попередньо встановленого параметра видалення відходів обробки. [19]

2.3 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою пристроїв реєстрації даних

Дослідження щодо автоматизації електроерозійної обробки в сфері розробки допоміжних пристроїв з реєстрації даних описують два ключові інструменти автоматизації: пристрій "EDM Automonitor" і мікропроцесорну систему адаптивного управління (PAC-EDM), а також їхній вплив на покращення ефективності обробки [20].

Основною проблемою, яку вирішують дослідники, є складність досягнення стабільності процесу електроерозійної обробки через значний вплив людського фактору. Цей процес вимагає постійного моніторингу оператором, що знижує продуктивність і може призводити до помилок через ручні коригування параметрів. Для вирішення цієї проблеми було розроблено пристрій «EDM Automonitor», який є універсальним засобом для збору даних з різних електроерозійних установок. Пристрій фіксує всі ключові параметри процесу, такі як стабільність, електричні сигнали, положення електрода і стан системи промивки. Зібрані дані аналізуються за допомогою спеціального програмного забезпечення, що дозволяє ідентифікувати проблеми, вплив оператора на процес і можливості для покращення параметрів обробки. Цей підхід дає змогу точно фіксувати всі деталі роботи електроерозійних-машин в умовах реального виробництва, що робить результати дослідження релевантними для промислового застосування.

Другим ключовим рішенням є система «PAC-EDM», яка замінює традиційний ручний контроль процесу на автоматизоване управління в реальному часі. Ця система керує всіма змінними електроерозійного-процесу за допомогою мікропроцесора, дозволяючи мінімізувати втручання оператора. «PAC-EDM» не лише контролює процес, але й оптимізує його, реалізуючи попередньо задані стратегії обробки. Завдяки програмному забезпеченню, яке легко оновлюється, система здатна адаптуватися до нових даних та вдосконалювати алгоритми оптимізації.

Дослідники також наголошують на важливості аналізу великих обсягів даних, отриманих за допомогою «EDM Automonitor». Використання інтерактивних графічних програм для обробки даних дозволяє виявляти закономірності, аналізувати ефективність процесу та розробляти більш складні стратегії управління. Аналіз цих даних дозволяє вдосконалювати роботу «PAC-EDM», що значно скорочує час обробки і покращує якість кінцевого продукту.

У висновках дослідники підкреслюють, що автоматизація EDM має великий потенціал для значного зменшення залежності від оператора, підвищення

стабільності параметрів і якості обробки. Поєднання інструментів збору даних і адаптивного управління закладає основу для подальших інновацій у виробництві, особливо у таких галузях, як аерокосмічна промисловість, інструментальне виробництво та загальне машинобудування. Завдяки такому підходу електроерозійні технології можуть зайняти важливе місце серед найсучасніших виробничих технологій.

2.4 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою інтегрування CAD/CAM/CAPP систем для проєктування електродів для обробки

Електроерозійна обробка також широко використовується у виробництві прес-форм для формування складних геометричних форм, які важко отримати за допомогою звичайного процесу механічної обробки. Через використання великої кількості електродів вартість і витрати часу на проєктування електродів і програмування з ЧПК стали слабким місцем у підвищенні продуктивності підприємств, що виробляють прес-форми. Хоча системи CAD (Computer-Aided Design) — комп'ютерне проєктування, CAM (Computer-Aided Manufacturing) — комп'ютеризоване виробництво, і системи автоматизованого проєктування (CAPP) широко використовуються, через складні форми і різноманітність електродів для створення технологічних планів і траєкторій руху інструменту для виготовлення електродів зазвичай застосовуються ручні операції, що є трудомістким і схильним до помилок процесом. Для того, щоб реалізувати інтелектуальне виробництво електродів у такій наукомісткій галузі, було розроблено підхід до інтеграції CAD/CAM/CAPP, що базується на функціональних можливостях. В цьому підході також було введено ієрархічну таксономію характеристик електродів і запропоновано гібридний метод розпізнавання ознак для побудови багаторівневого дерева ознак. Потім на основі знань про особливості та інновації в галузі здійснюється планування та

оптимізація процесу з подальшою автоматичною генерацією траєкторії руху інструменту, що має на меті точну та економічну обробку електрода. В рамках системної інтеграції створюється структурована модель виробу, яка фіксує та інкапсулює геометричні об'єкти, особливості обробки, технічну інформацію, технологічні плани та дані вимірювань похибок обробки для реалізації безперебійного потоку інформації між CAD/CAM/CAIP системами. Ефективність та результативність запропонованого підходу продемонстровано тематичними дослідженнями та промисловим впровадженням [21].

2.5 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою роботів

Для автоматизації виробництва із застосуванням електроерозійної обробки також розглядаються і успішно застосовуються роботи [22]. Так, нова конструкція системи управління дозволяють навіть невеликим шестикоординатним промисловим роботам (рис.2.2) з низькою жорсткістю точно обробляти важкооброблювані матеріали без шкідливих вібрацій.

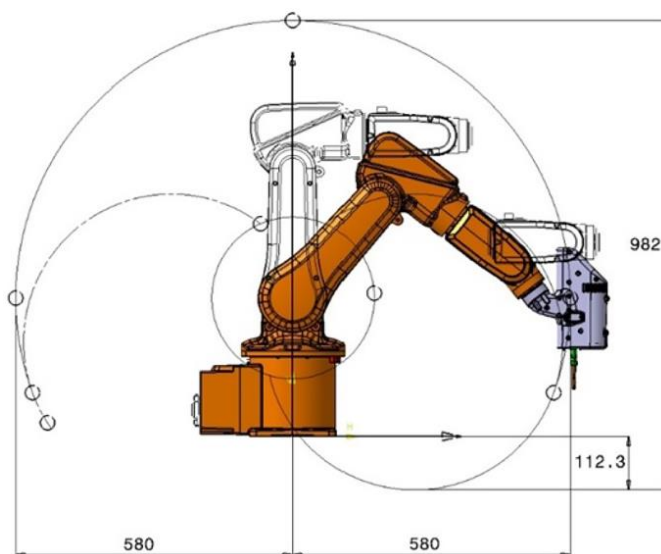


Рисунок 2.2 – Модель робота ABB IRB120 із електроерозійною установкою[22]

Розроблено та успішно впроваджено стратегію нечіткої логіки для адаптивного керування роботизованою електроерозійною обробкою, підтверджену експериментальними результатами (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Відстежування параметрів обробки в реальному часі - швидкості робота, частоти імпульсів, числа коротких замикань [22]

Цей результат представляє нову виробничу систему, яка може обробляти важкооброблювані заготовки складної форми в межах широких і складних можливостей промислових роботів, що працюють в робочому середовищі (рис. 2.4).

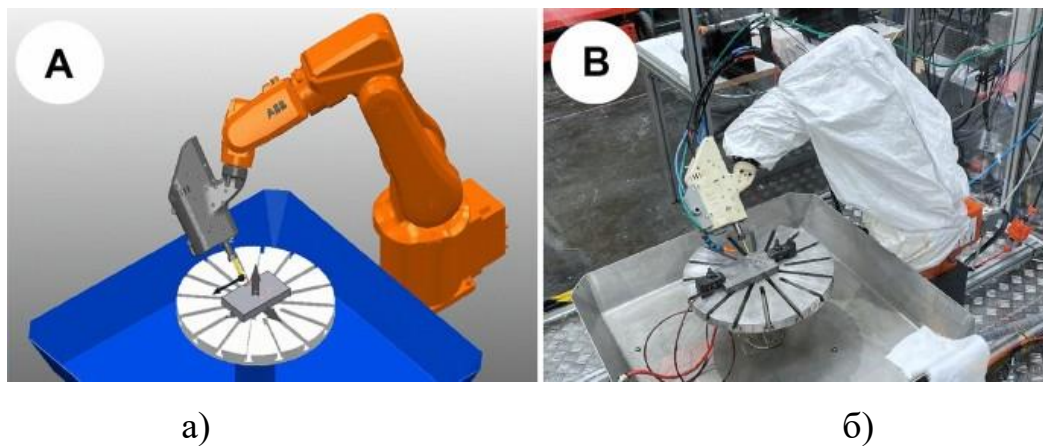


Рисунок 2.4 – Обробка за допомогою електроерозійного верстата з роботом [22]: а – моделювання обробки; б – безпосередньо процес обробки під кутом 45°

Надзвичайно складні проблеми вібрації та позиціонування робота вирішені, що робить роботизоване фрезерування за допомогою електроерозійної обробки чудовою технікою для подолання вібрацій робота під час обробки важкооброблюваних матеріалів(рис. 2.5).

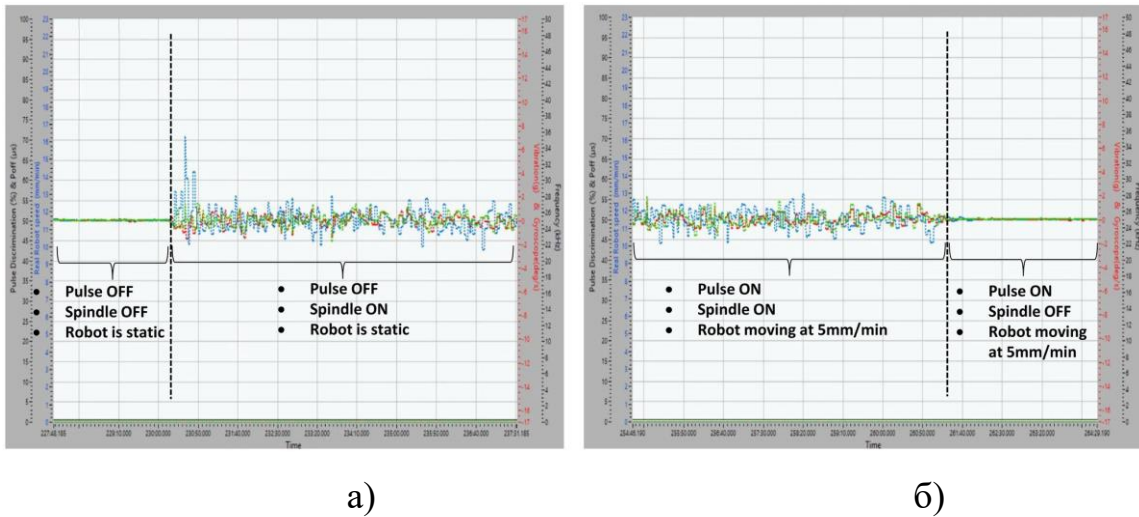


Рисунок 2.5 – Моніторинг вібрацій в режимі реального часу [22]:
а – вмикання роботи, початок обробки; б – кінець обробки, відвод роботи.

Експериментальні результати показують, що морфологія поверхні та точність електроерозійної обробки не погіршуються(рис. 2.6).

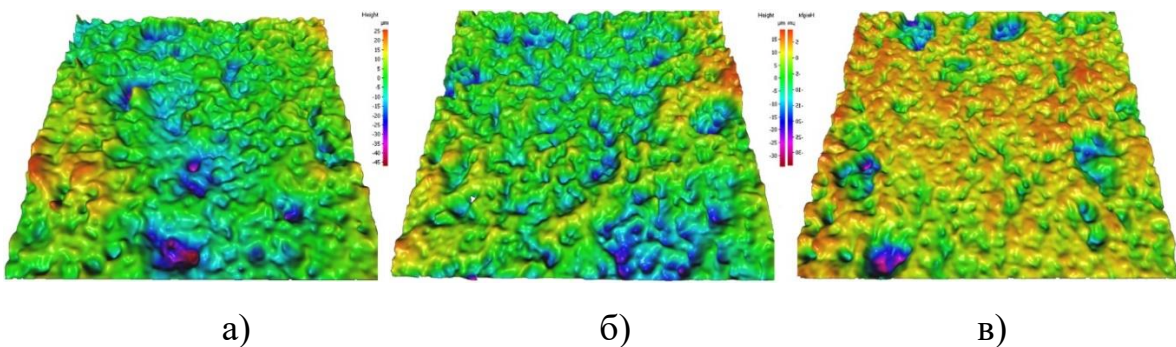


Рисунок 2.6 – Морфологія поверхні після електроерозійного фрезерування [22]:
а – під кутом 45°; б – під кутом 90°; в – під кутом 90° половиною діаметра електрода

Окрім того, використання коротших електродів і відповідне калібрування обертів можуть зменшити залишкові незначні вібрації та покращити точність обробки і якість поверхні (рис. 2.7).

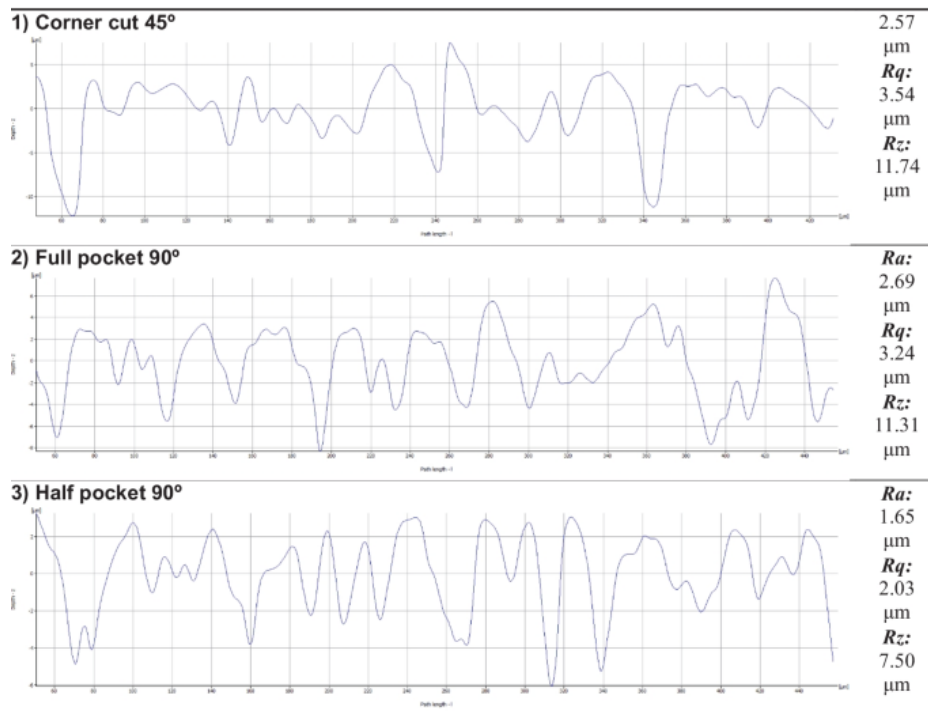


Рисунок 2.7 – Якість поверхні після калібрування [22]

Дослідження показують, що процес електроерозійної обробки не створює сил або вібрацій, що виходять за рамки низької жорсткості робота, навіть за наявності тиску діелектричної речовини для підтримки процесу електроерозійної обробки. Іншими словами, протікання діелектрика від центру електрода через зменшену відстань зазору в 20 мкм створює сили, які можуть відштовхнути електрод від заготовки, створюючи перешкоди або навіть перериваючи розряд. Крім того, можна дослідити можливість складних рухів робота для кращого наближення до оброблюваної ділянки, щоб подача діелектрика допомагала вимивати частинки видаленого матеріалу і покращувати швидкість обробки і якість поверхні. Було також виявлено вплив тиску подачі діелектрика в робочу зону на якість обробки. Так, як показано на рисунку 2.8, тиск діелектрика, що надходить з центру електрода, може створити достатню

силу, щоб відсунути електрод назад і порушити або навіть перервати іскріння при обробці.

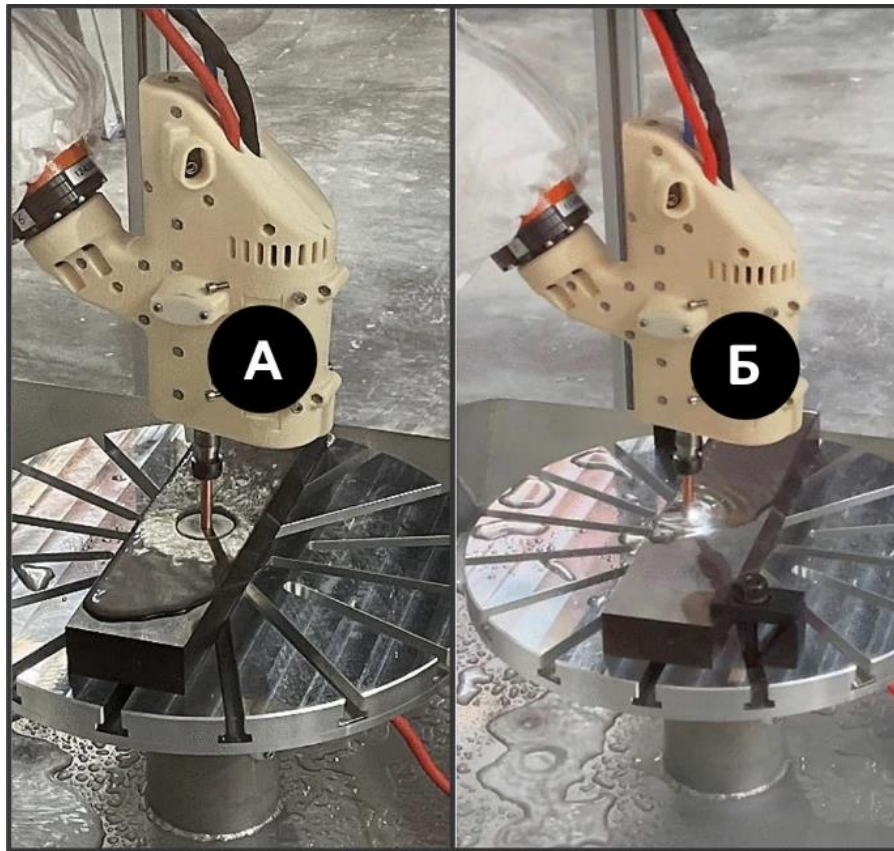


Рисунок 2.8 – Експерименти із тиском подачі діелектрика [22]:

а – із занадто великим тиском подачі діелектрика; б – із нормальним тиском подачі діелектрика.

Автономне програмування, включаючи компенсацію, виявилось ефективним. Оскільки цей виробничий процес є новим, жодне програмне забезпечення САМ не має постпроцесора для генерації необхідного коду управління роботом, придатного для цього дослідження. Таким чином, це відкриває можливість для розробки програмного забезпечення САМ для створення складних траєкторій різання фрезерного електроерозійного верстата з вбудованою компенсацією в якості перспективи для майбутніх досліджень.

Нарешті, незважаючи на те, що сучасні промислові роботи розроблені для швидких переміщень у тисячі міліметрів на секунду, виявилось можливим

працювати зі швидкістю електроерозійного різання 0,5 мм на хвилину. Крім того, обмеження часової реакції робота до 0,3 с затримки для виконання командного руху було визнано прийнятним для цілей електроерозійної обробки за умови застосування прогностичних аспектів моніторингу частоти та адаптивної онлайн-модуляції з урахуванням часу проходження імпульсів.

2.6 Автоматизація електроерозійної обробки за допомогою програмованих логічних контролерів

Програмовані логічні контролери (ПЛК) використовуються в усіх галузях промисловості для розширення та вдосконалення виробництва [23]. Там, де стара автоматизована система використовує сотні або тисячі реле, можна запрограмувати один ПЛК для їх заміни. Функціональність ПЛК розвивалася протягом багатьох років і включає в себе можливості, що виходять за рамки типового релейного управління: складне управління рухом, управління процесами, розподільчі системи управління і складні мережі тепер додані до переліку функцій ПЛК. ПЛК надають багато переваг, серед яких підвищена надійність, більша гнучкість, нижча вартість, можливість зв'язку з іншими контролерами/комп'ютерами для виконання таких функцій, як диспетчерське управління, збір даних, моніторинг пристроїв і параметрів процесу, швидший час відгуку і простота усунення несправностей.

На рисунку 2.9 зображено структурну схему інтерфейсу запропонованої системи ПЛК для електроерозійного обладнання.

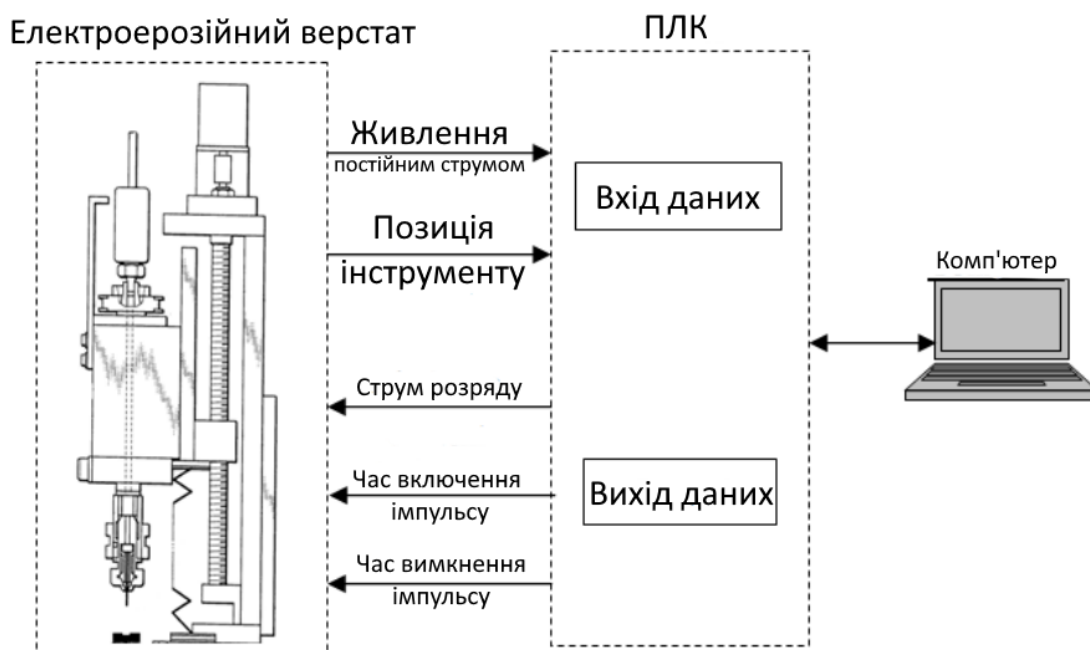


Рисунок 2.9 – Схема інтерфейсу системи електроерозійного обладнання і ПЛК [23]

У цій системі живлення постійного струму від конденсаторної батареї та положення інструменту існуючого електроерозійного верстата діятимуть як вхідні дані для ПЛК. Найбільш впливові параметри процесу електроерозійної обробки, струм розряду, час увімкнення та вимкнення імпульсу будуть подаватися на ПЛК через комп'ютер. Цей ПЛК підключений до послідовного порту комп'ютера через кабель RS232, для зв'язку з ПЛК буде використовуватися система диспетчерського контролю та збору даних (SCADA).

Система диспетчерського контролю та збору даних використовує стандартні протоколи для зв'язку, таким чином розподіляючи функціональність по локальній та глобальній мережі. Екран користувача буде розроблений з використанням людино-машинного інтерфейсу, де оператор машини буде вибирати/вводити назву електродів, необхідну обробку поверхні та глибину обробки. Інтерфейс буде пов'язаний з базою даних SCADA, звідки будуть генеруватися оптимізовані параметри процесу електроерозійної обробки для трьох режимів обробки, тобто чорнової, напівчистої та чистої операцій. Оператору буде надано право редагувати ці параметри, якщо це необхідно. Ці

параметри можуть бути передані на запропонований контролер одним натисканням кнопки. Контролер буде автоматично перемикатися з режиму чорнової обробки на режим напівчистої і, нарешті, чистої обробки в залежності від входження інструменту в матеріал заготовки.

У подальших дослідженнях в цю систему ПЛК для електроерозійного обладнання можуть бути інтегровані стандартні програмні забезпечення САМ/САМ та системою СІМ.

На рисунку 2.10 показано дослідження, проведені в різних сферах процесу електроерозійної обробки з метою покращення його показників ефективності.

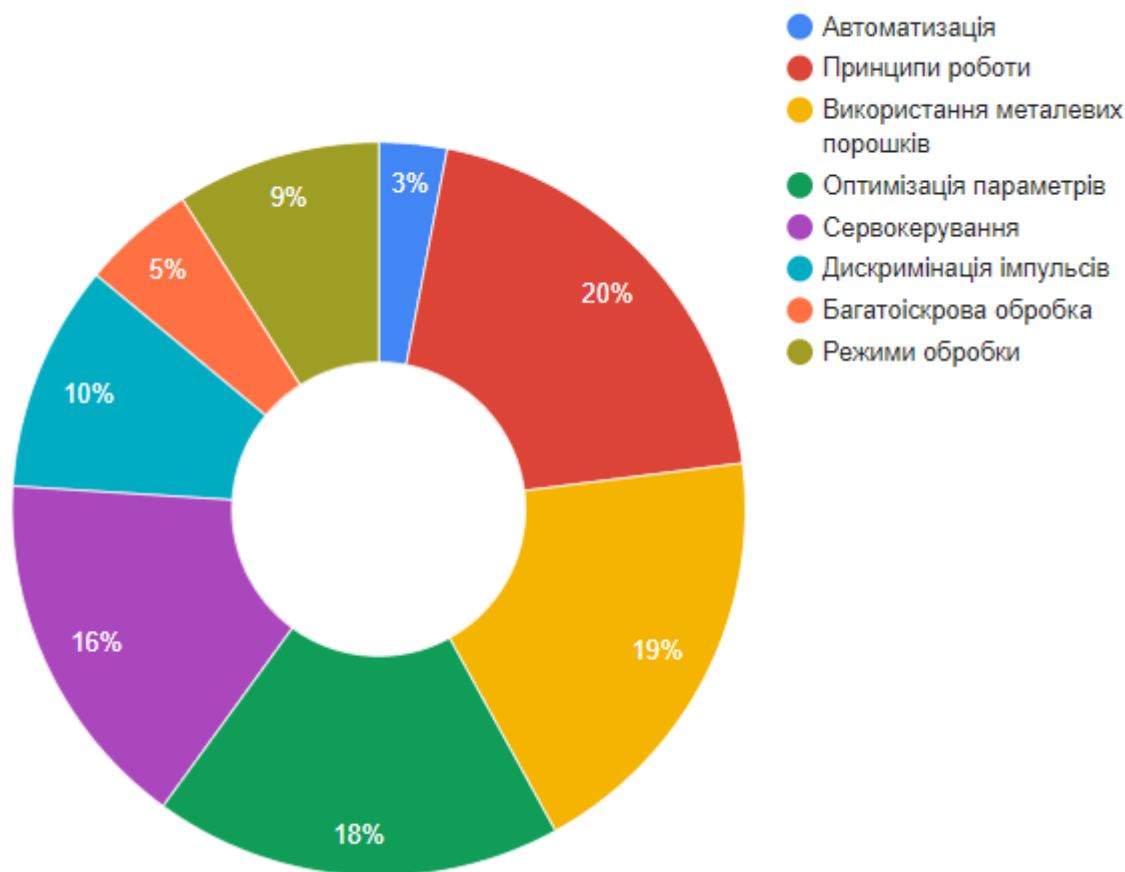


Рисунок 2.10 – Різні методи покращення ефективності електроерозійної обробки

Видно, що 20% опитаних робіт описують принцип роботи електроерозійної обробки, 19% - додавання металевих порошоків у діелектрик, 18% робіт зосереджені на оптимізації параметрів процесу, 16% - на сервоуправлінні, 10% - на дискримінації імпульсів і 5% - на багатоіскровому режимі для підвищення продуктивності верстата. Чітко видно, що лише 3% опитаних робіт намагалися автоматизувати процес електроерозійної обробки. Отже, існує потреба зменшити залежність від оператора та поєднати існуючий електроерозійний верстат для висікання штампів з гнучким контролером верстата, щоб його можна було інтегрувати в середовище комп'ютерно-інтегрованої обробки, що є необхідною умовою гнучкого виробництва.

2.7 Інноваційні методи автоматизації та оптимізація електроерозійної обробки на основі впровадження ройового штучного інтелекту

Як одна з п'яти основних інтелектуальних форм, спрямованих на розвиток нового покоління штучного інтелекту, ройовий інтелект має важливі перспективи застосування як у цивільній, так і у військовій сферах [24]. В даний час ройовий інтелект все ще перебуває в зародковому стані в базовій теорії, інноваціях механізмів та ключових технологічних додатках, і різні алгоритми все ще потребують постійного вивчення, вдосконалення та розширення сфери застосування. Особливо в області оптимізації параметрів процесу електричного розряду, ройовий інтелект все ще має широке застосування і простір для розвитку. Інтеграція різних алгоритмів ройового інтелекту для оптимізації параметрів процесу електричного розряду та кращого пошуку глобальних оптимальних рішень може бути майбутнім напрямком розвитку.

Існуюча оптимізація параметрів процесу електроерозійної обробки в основному орієнтована на продуктивність обробки, таку як зняття матеріалу, шорсткість, швидкість обробки, точність обробки, тощо. Оскільки все більше

уваги приділяється сталому виробництву, екологічно чиста обробка стане ключовою особливістю в майбутньому. Реакція результату обробки включає не тільки продуктивність обробки, але й вплив на навколишнє середовище, наприклад, викиди токсичних газів, шум при обробці, «зелений» діелектрик, тощо. Отже, цілей для оптимізації буде більше, а складність зростатиме.

Ройовий інтелект - це евристичний алгоритм пошуку, заснований на поведінці різних популяцій для пошуку оптимізації для заданої мети, і зосереджений на здатності популяції простих особин досягти більш складної функції шляхом простої співпраці між ними. Існує багато існуючих алгоритмів ройового інтелекту, таких як ACO (Ant Colony Optimization – оптимізація за подібністю колоній мурах), ABC (Artificial Bee Colony – штучна бджолина колонія), GSO (Glowworm Swarm Optimization – Оптимізація на основі рою світлячків), тощо. Ці алгоритми будуть вдосконалюватися в міру їх застосування, і вважається, що майбутній штучний інтелект також створить більше нових алгоритмів, такі алгоритми оптимізації будуть також застосовуватись при роботі з електроерозійним обладнанням.

З швидким розвитком технологій машинне навчання знайшло широке застосування в різних галузях, включаючи промислове тестування, медичну діагностику і загальні медико-біологічні науки.. Вчені вже досить тривалий час як створили модель прогнозування структури білка за допомогою машинного навчання, яка може передбачати властивості білків на основі послідовностей генів і досягає 98,5% точності структури людських білків [25]. З попереднім штучним інтелектом, поєднання методів машинного навчання з алгоритмами ройового інтелекту для досягнення автономного налаштування параметрів, динамічного коригування напрямків пошуку тощо може стати фокусом досліджень у майбутньому, з ціллю оптимізації та автоматизації більшості напрямків в машинобудуванні.

Метод PSO (Particle Swarm Optimization – оптимізація рою частинок), який часто використовується для оптимізації подібності, індивідуальності да взаємодоповнюваності є основним репрезентативним алгоритмом ройового

інтелекту для електроерозійної обробки. Фундаментальна ідея, яка шукає найкраще рішення через індивідуальну співпрацю, походить з досліджень поведінки пташиних зграй, що рухаються в групах. Спочатку розроблений для графічного представлення безтілесних і хаотичних рухів зграй птахів у двох вимірах, пізніше був поширений на багатовимірний простір і використаний для вирішення оптимізаційних задач. Метод АСО, який використовує колективну оптимізаційну здатність біологічних мурашиних колоній, здатних знаходити найкоротший шлях від мурашиного гнізда до їжі за допомогою прямого обміну інформацією між особинами, є ще одним прикладом репрезентативного алгоритму ройового інтелекту.

Подібні характеристики ройового інтелекту можна підсумувати наступним чином: По-перше, оскільки контроль децентралізований, а не централізований, система краще адаптується до мережі і з меншою ймовірністю зазнає негативного впливу від виходу з ладу одного або декількох елементів системи. По-друге, завдяки опосередкованій комунікації кожен «член групи» має можливість впливати на навколишнє середовище, поширювати знання та працювати разом. По-третє, оскільки кожен «член групи» володіє базовими навичками або поведінковими нормами, груповий інтелект простіше і легше використовувати. І, нарешті, завдяки своїй здатності до самоорганізації, групи демонструють складні дії, які є результатом інтелекту, що розвивається через взаємодію так званих індивідів.

Наразі математична та теоретична база алгоритмів ройового інтелекту є відносно слабкою. Наприклад, не існує точної теоретичної бази для налаштування параметрів відповідних алгоритмів, які суттєво залежать від конкретних завдань і середовища застосування. Для кращого вирішення практичних інженерних задач, таких як оптимізація параметрів процесу електроерозійної обробки, для оптимізації можна використовувати різні типи алгоритмів ройового інтелекту, тим самим підвищуючи ймовірність отримання глобального оптимального рішення. Крім того, існуючих порівняльних досліджень з оптимізації параметрів процесу електроерозійної обробки

недостатньо, а також бракує стандартних тестових наборів для оцінки продуктивності. Це означає, що немає абсолютної достовірності або ризику застосування. Тому необхідно створити різноманітну та уніфіковану платформу оцінювання, щоб полегшити взаємодоповнююче застосування алгоритмів ройового інтелекту та покращити здатність інженерних додатків вирішувати практичні проблеми в машинобудівній та інших галузях.

2.8 Сучасні тенденції та дослідження з оптимізації та автоматизації електроерозійної обробки

Сучасні тенденції у розвитку електроерозійної обробки спрямовані на підвищення продуктивності, зменшення витрат, покращення якості поверхні та інтеграцію з інноваційними технологіями [26], в тому числі з ціллю автоматизації. Одним із ключових напрямків є гібридні електроерозійні-процеси, такі як Powder-Mixed EDM (PMEDM), де до діелектричної рідини додаються порошки (алюмінію, міді, графіту), що покращує якість поверхні, підвищує швидкість видалення матеріалу та зменшує товщину повторного шару. Також ультразвукова підтримка (Ultrasonic-Assisted EDM) дозволяє підвищити ефективність очищення зони обробки, зменшити шорсткість поверхні та уникнути мікротріщин. Використання сухого EDM із газовими діелектриками (наприклад, аргон чи кисень) зменшує забруднення і підвищує точність, що особливо корисно для мікродеталей.

Ще одним важливим напрямком є моделювання та оптимізація процесів. Застосування нейронних мереж, нечіткої логіки, методології та аналізу дозволяє прогнозувати оптимальні параметри обробки, автоматично налаштовувати процес і забезпечувати стабільність роботи. Метод скінченних елементів (FEM) використовується для аналізу температурних процесів у зоні обробки, що допомагає зменшити теплові пошкодження матеріалу.

Прецизійна та мікрообробка (Micro-EDM) також є важливими аспектами. Micro-EDM дозволяє виготовляти деталі розміром до 999 мікрон, що особливо актуально для медичних пристроїв, електроніки та оптичних компонентів. Технологія дозволяє створювати мікроотвори з високим співвідношенням параметрів, наприклад, отвори діаметром менше 0,2 мм з глибиною до 15 разів більшою за діаметр.

SCADA – це система збору, моніторингу та управління даними в реальному часі, яка використовується для керування промисловими процесами. Вона забезпечує дистанційний доступ до даних, дозволяючи операторам спостерігати за роботою обладнання і контролювати його. HMI – це інтерфейс між оператором і машиною (або системою SCADA), який забезпечує візуалізацію процесу та інтерактивне управління. Інтеграція EDM із сучасними технологіями, такими як CAD/CAM-системи, забезпечує автоматичне генерування траєкторій інструментів, моніторинг у реальному часі та зручний інтерфейс для оператора. Роботизація EDM дозволяє автоматизувати заміну електродів і заготовок, інтегруючи EDM у гнучкі виробничі системи (CIM).

Інновації в матеріалах електродів також відіграють значну роль. Використання графіту, мідно-вольфрамових сплавів та латуні покращує стабільність розрядів і швидкість обробки. Електроди зі змінною геометрією, наприклад, ротаційні, забезпечують ефективніше видалення відходів і вищу продуктивність.

Сучасні дослідження також спрямовані на зменшення негативного впливу на екологію. Використання сухих EDM-процесів із газовими діелектриками, біорозкладних рідин та вдосконалених систем фільтрації мінімізує екологічний вплив. Загалом, EDM демонструє значний прогрес у напрямку автоматизації, підвищення точності, зменшення екологічного навантаження та розширення можливостей для обробки складних матеріалів і мікродеталей.

2.9 Висновок

В цьому розділі було розглянуто автоматизацію процесів електроерозійної обробки (EDM) і розглянуто сучасні технологічні рішення для оптимізації цього процесу. Автоматизація є ключовим інструментом для підвищення ефективності, точності та стабільності EDM. Використання інтелектуальних систем керування, програмованих логічних контролерів (PLC), CAD/CAM, SCADA, а також методів машинного навчання дозволяє знизити залежність від оператора, оптимізувати параметри процесу в реальному часі, скоротити тривалість обробки та зменшити знос електродів.

Серед основних підходів до автоматизації виділяють інтелектуальні системи, які базуються на штучних нейронних мережах (ANN) для прогнозування та оптимізації параметрів EDM, автоматичне коригування параметрів обробки на основі аналізу даних, а також інтеграцію SCADA та HMI. SCADA забезпечує моніторинг і управління в реальному часі, а HMI надає оператору зручний інтерфейс для налаштування параметрів і доступу до бази даних. Програмовані логічні контролери (PLC) замінюють ручне управління автоматизованим, контролюючи змінні EDM-процесу, такі як струм розряду, час імпульсу та зазор.

Роботизація також є важливим елементом автоматизації, що дозволяє замінювати електроди та обробляти складні форми без вібрацій. Роботи інтегруються у гнучкі виробничі системи (CIM), покращуючи продуктивність і стабільність процесу. Інтеграція CAD/CAM забезпечує автоматичне генерування траєкторій інструментів для проектування та обробки електродів, підвищуючи точність і економічність.

Серед інновацій у EDM важливе місце займають гібридні процеси, такі як Powder-Mixed EDM (PMEDM), що використовує порошки у діелектрику для покращення шорсткості поверхні та швидкості обробки, Ultrasonic-Assisted EDM, який очищує зону обробки та запобігає появі мікротріщин, а також Dry

EDM із газовими діелектриками для екологічної обробки. Інноваційні матеріали електродів, зокрема графіт, мідно-вольфрамові сплави та ротаційні електроди, забезпечують стабільність розрядів і ефективніше видалення відходів.

Сучасні виклики EDM включають впровадження ройового інтелекту (алгоритми ACO, PSO) для оптимізації параметрів процесу, зменшення екологічного впливу через використання біорозкладних діелектриків та вдосконалення систем фільтрації. Для подальшого прогресу необхідно створити універсальні платформи для тестування і порівняння алгоритмів оптимізації.

Автоматизація EDM відкриває нові можливості для таких галузей, як аерокосмічна промисловість, виробництво прес-форм, інструментальне машинобудування. Вона дозволяє підвищити конкурентоспроможність, скоротити витрати та забезпечити сталість якості продукції. Інтеграція новітніх технологій і автоматизація є майбутнім EDM, що забезпечить її актуальність у швидкозмінному світі виробництва.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Опис конструкції і службового призначення деталі

Диск 0 ступені компресора високого тиску (КВТ) (рис. 3.1) є ключовим компонентом газотурбінного двигуна, що виконує функцію кріплення робочих лопаток і забезпечує початкову компресію повітря, необхідну для ефективного згорання палива. Для його виготовлення використовуються високотемпературні сплави, такі як титан або нікелеві суперсплави, що забезпечують високу міцність, жаростійкість і корозійну стійкість. Основне завдання диска — передача обертального моменту від валу компресора до лопаток, витримуючи при цьому значні механічні навантаження, викликані відцентровими силами, а також екстремальні температурні перепади.

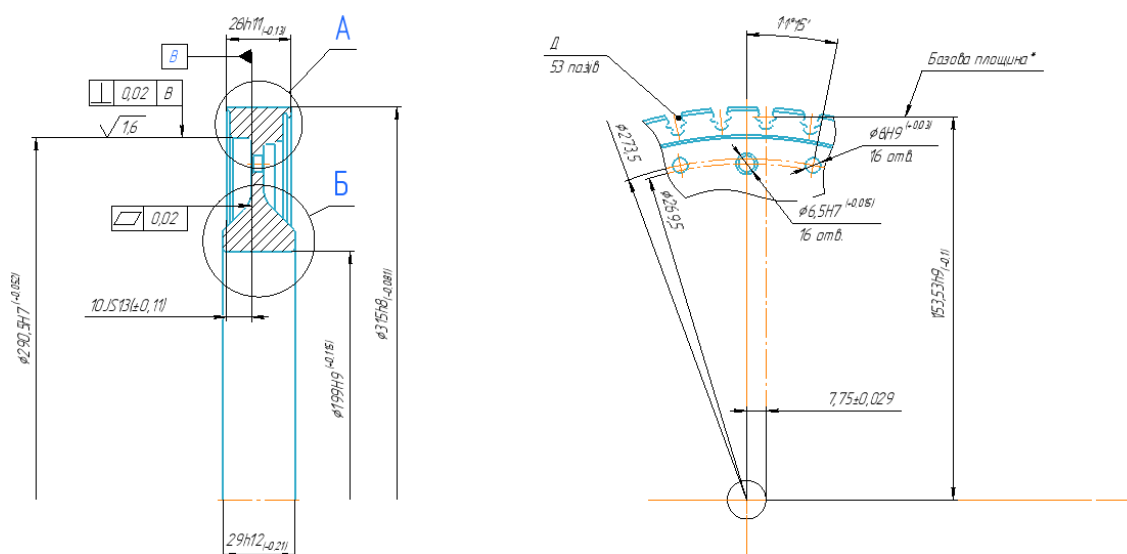


Рисунок 3.1 – Ескіз деталі «Диск 0 ступені КВТ»

Конструкція диска має складну геометрію, яка сприяє рівномірному розподілу навантаження та мінімізації ризику утворення тріщин. Кріплення лопаток виконується через спеціальні пази або замки, що дозволяє легко замінювати зношені елементи. Під час експлуатації диск працює у

високотемпературних умовах (400–700 °С і більше) і витримує високу швидкість обертання, яка може сягати десятків тисяч обертів за хвилину.

До технічних вимог для диска входять висока стійкість до втомного руйнування, точність виготовлення для забезпечення балансу та мінімізації вібрацій. Його конструкція повинна гарантувати ефективну компресію повітря з мінімальними втратами, а використання титанових сплавів дозволяє зменшити вагу двигуна. Однак складність виготовлення, висока вартість матеріалів і технологій обробки є основними обмеженнями.

Резюмуючи, диск 0 ступені КВТ є критично важливим компонентом для забезпечення надійності та ефективності роботи газотурбінного двигуна, поєднуючи в собі інноваційні матеріали, точну конструкцію та високотехнологічне виготовлення.

Матеріал деталі – титановий сплав ВТ8.

Диск служить базовою деталлю для закріплення робочих лопаток першого ступеня компресора, приймає обертовий момент від валу компресора і передає його на лопатки.

Хімічний склад матеріалу деталі надається в таблиці 3.1, а механічні властивості - в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад ВТ8 за ОСТ 1-90013-81 у відсотках.

Fe	C	Si	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	Sn	H	Інше
>0,02	>0,08	0,1- 0,25	2,8- 3,8	>0,03	85,37- 90,1	5,8- 6,8	0,5- 1,5	0,15	0,4- 1,5	>0,015	>0,03

Таблиця 3.2 – Механічні властивості матеріалу ВТ8 за ОСТ 1-90013-81

Межа міцності при розтязі σ_b , МПа	Відносне видовження δ , %	Твердість, НВ
1100	12	320

Технологічні властивості матеріалу ВТ8:

Титановий сплав ВТ8 характеризується високими механічними властивостями, стійкістю до корозії та жароміцністю, що робить його придатним для використання в авіаційній та космічній промисловості. Цей сплав має високу міцність та помірну пластичність, що забезпечує його надійність в умовах динамічних і статичних навантажень. ВТ8 добре зберігає свої властивості при температурах до 400–450 °С, що дозволяє його використовувати в деталях, що працюють в умовах нагрівання. Матеріал відрізняється малою густиною (приблизно 4,51 г/см³), що сприяє зменшенню ваги конструкцій, а також високою зварюваністю, що полегшує його використання у складних з'єднаннях. Обробка ВТ8 ускладнена через підвищену зносостійкість і твердість, тому для його механічної обробки рекомендуються спеціальні інструменти, режими різання, або види обробки, наприклад електрохімічна чи електроерозійна обробка.

3.2 Вибір типу виробництва і форми організації робіт

Щоб визначити тип виробництва та форму організації робіт, необхідно обчислити масу деталі. Для спрощення цього процесу використовуємо програмне забезпечення NX CAM. Створюємо 3D-модель деталі та визначаємо її масу, враховуючи густину сплаву ВТ8 по ОСТ 1-90013-81 ~4,51 г/см³ (рис. 3.2).

Отже, згідно розрахункам проведеним за допомогою NX CAM обчислили масу деталі – $m=2,71$ кг.

Тип виробництва визначається на основі двох основних параметрів: річного обсягу випуску продукції та маси окремої деталі. У цьому випадку, згідно з рекомендаціями, наведеними у [27, с. 15, т. 1.1], тип виробництва визначено як середньо-серійний.

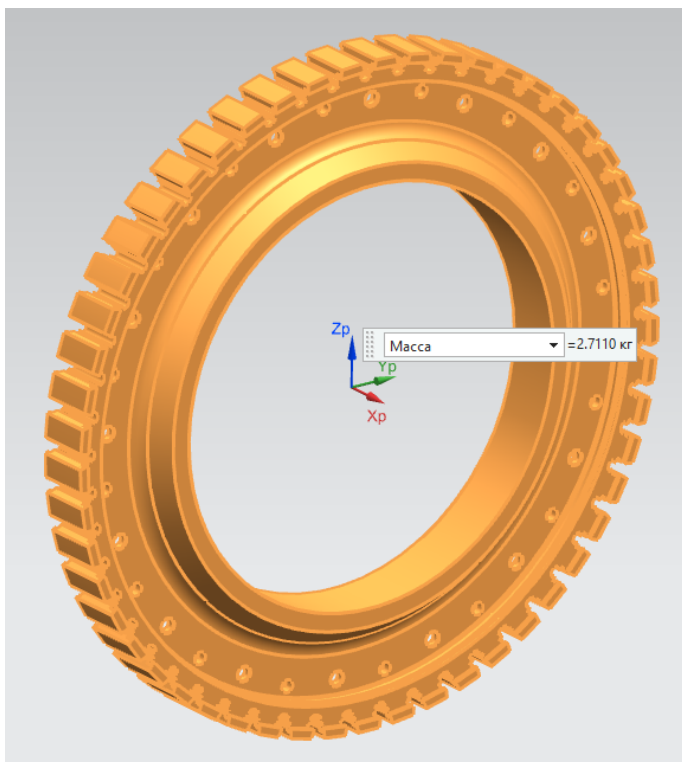


Рисунок 3.2 – 3-D модель деталі із виміром маси

Форма організації виробничого процесу визначається як непотокова, зокрема змінно-потокова [27, с. 18]. Цей підхід до організації робіт є типовим для середньо-серійного виробництва, оскільки дозволяє забезпечити гнучкість у плануванні виробничих завдань та раціональне використання обладнання. Змінно-потокова форма організації передбачає часткове застосування елементів потокового виробництва, що сприяє підвищенню ефективності праці при змінних обсягах виготовлення деталей.

3.3 Вибір виду і способу отримання заготовки з економічним обґрунтуванням

Кожен обраний метод виготовлення заготовки повинен відповідати низці вимог, а саме:

- забезпечувати такі властивості заготовки, які дозволять деталі виконувати свої функції в заданих умовах експлуатації;

- забезпечувати можливість виготовлення заготовок із потрібного матеріалу та за заданою конструкцією;

- гарантувати продуктивність процесу з урахуванням встановленої програми випуску.

Якщо кілька методів, таких як лиття, гаряче штампування або прокат, відповідають цим вимогам, а також якщо кожен з них має кілька варіантів виконання, слід обрати найбільш економічно вигідний. Для цього використовуються два основні критерії:

- вартість виготовлення заготовки;
- коефіцієнт використання матеріалу.

Маса деталі $m = 2,71$ кг (рис. 3.2).

Матеріал ВТ8, густина $\rho = 4.51$ г/см³. Річна програма випуску $N = 5000$ шт, дрібносерійне. Необхідно економічно обґрунтувати використання одного із двох способів отримання заготовки «Диск 0 ступеня КВТ»:

- 1) Кривошипно-гойдалковий штампувальний прес (КГШП)
- 2) Горизонтально-кувальна машина (ГКМ)

Розраховуємо масу заготовок, отриманих кожним способом.

3.3.1 Отримання заготовки за допомогою КГШП

Клас точності – Т5; Група сталі – М3; Ступінь складності – С2; Вихідний індекс – 17.

Для економічної ефективності необхідно розрахувати масу заготовки отриманої на КГШП. Тому за ГОСТ 7505-89 обираємо припуски і заносимо до таблиці 3.3. Робимо креслення заготовки (рис. 3.3), а після будуємо 3D-модель враховуючи нахили і радіуси (рис. 3.4).

Таблиця 3.3 – Припуски на поверхні при виготовленні заготовки на КГШП

Номинальний розмір деталі, мм	Шорсткість поверхні деталі Ra, мкм	Основний припуск, мм	Розрахунок фактичного розміру поковки, мм	Допустимі граничні	Фактичний розмір поковки, мм
1	2	3	4	5	6
Ø199	1,6	2,6	$199+2\cdot 2,6=193,8$	$+1,7$ $-3,3$	$\text{Ø}193,8^{+1,7}_{-3,3}$
Ø315	1,6	2,8	$315+2\cdot 2,8=320,7$	$+3,7$ $-1,9$	$\text{Ø}320,7^{+3,7}_{-1,9}$
29	1,6	2,2	$29+2\cdot 2,2=33,4$	$+2,4$ $-1,2$	$\text{Ø}33,4^{+2,4}_{-1,2}$

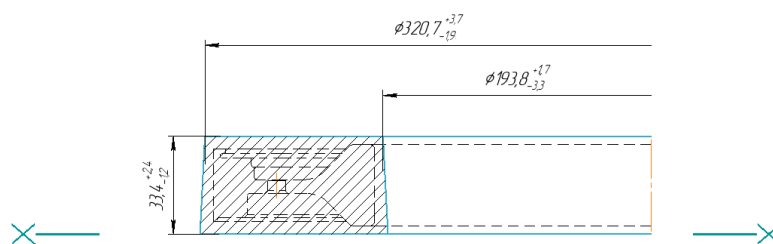


Рисунок 3.3 – Попередній ескіз заготовки при виготовленні на КГШП

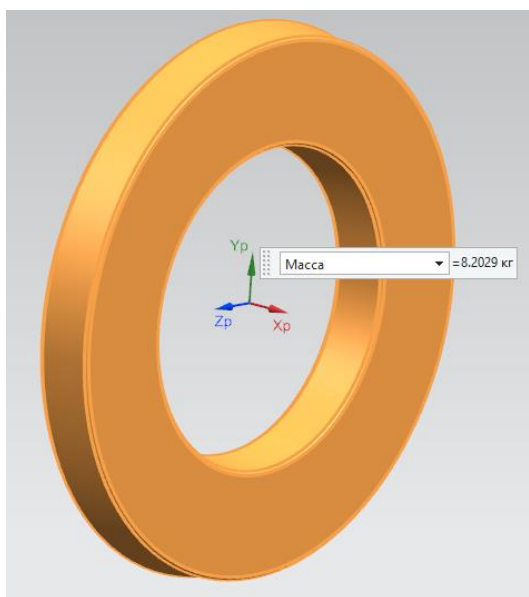


Рисунок 3.4 – Модель і маса заготовки отриманої при КГШП

Виходячи з розрахунків проведених за допомогою NX CAM маса заготовки отриманої за допомогою КГШП дорівнює 8.2 кг.

3.3.1 Отримання заготовки за допомогою ГKM

Клас точності – Т4; група сталі – М3; ступінь складності – С2; вихідний індекс – 15.

Для економічної ефективності необхідно розрахувати масу заготовки отриманої на ГKM. Тому за ГОСТ 7505-89 обираємо припуски і заносимо дані до таблиці 3.4. Робимо креслення заготовки (рис. 3.5), а після будуємо 3D-модель враховуючи нахили і радіуси (рис. 3.6).

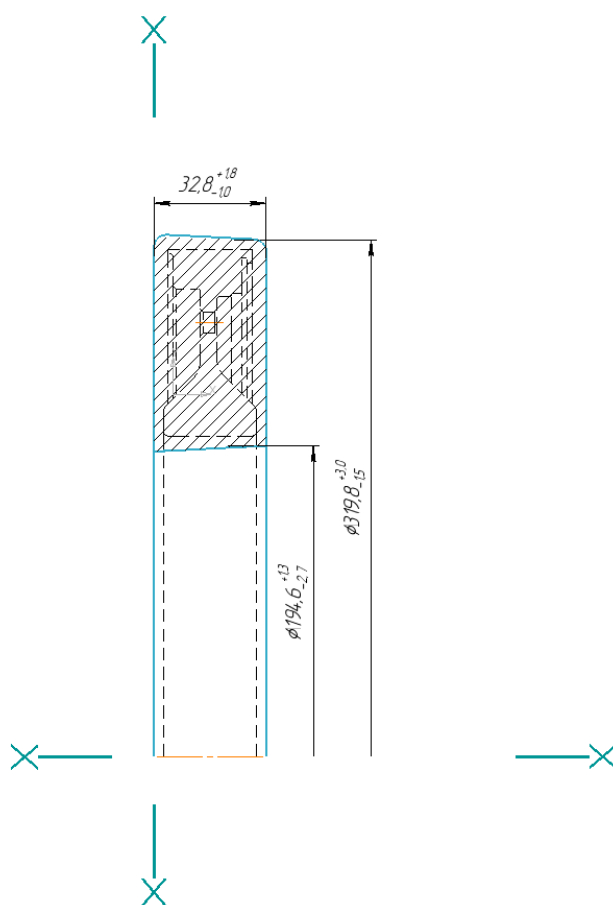


Рисунок 3.5 – Ескіз заготовки при виготовленні на ГKM

Таблиця 3.4 – Припуски на поверхні при виготовленні заготовки на ГКМ

Номинальний розмір деталі, мм	Шорсткість поверхні деталі Ra, мкм	Основний припуск, мм	Розрахунок фактичного розміру поковки, мм	Допустимі граничні	Фактичний розмір поковки, мм
1	2	3	4	5	6
Ø199	1,6	2,2	$199 - 2 \cdot 2,2 = 194,6$	$\begin{matrix} +1,3 \\ -2,7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{Ø}194,6^{+1,3} \\ -2,7 \end{matrix}$
Ø315	1,6	2,4	$315 + 2 \cdot 2,4 = 319,8$	$\begin{matrix} +3,0 \\ -1,5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{Ø}319,8^{+3,0} \\ -1,5 \end{matrix}$
29	1,6	1,9	$29 + 2 \cdot 1,9 = 32,8$	$\begin{matrix} +1,8 \\ -1,0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{Ø}32,8^{+1,8} \\ -1,0 \end{matrix}$

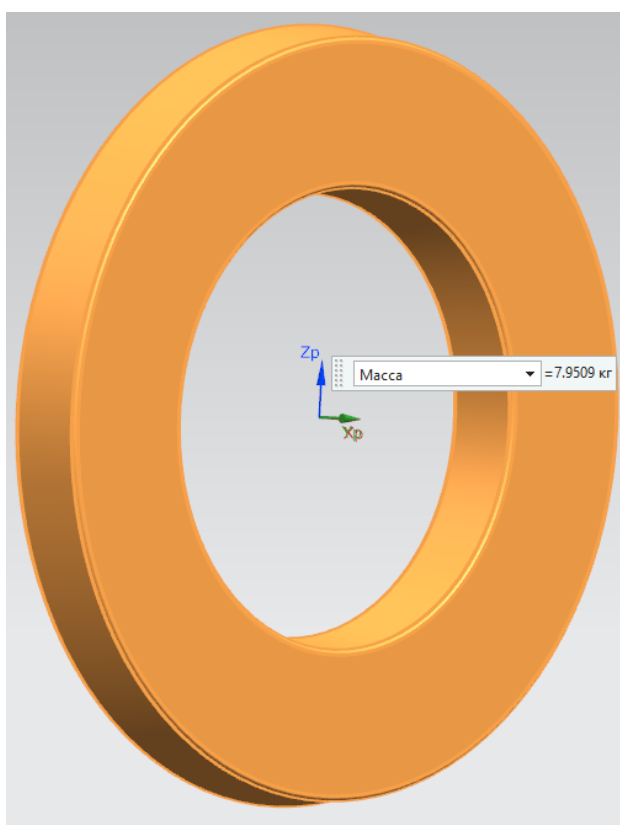


Рисунок 3.6 – Модель і маса заготовки при виготовленні на ГКМ

Виходячи з розрахунків проведених за допомогою NX CAM маса заготовки отриманої за допомогою КГШП дорівнює 7,95 кг.

3.3.2 Розрахунок економічної ефективності для обох методів отримання заготовки

Розраховуємо коефіцієнт використання матеріалу за формулою:

$$\eta = \frac{q}{Q_{\text{заг}}}, \quad (3.1)$$

де q – маса деталі, кг;

$Q_{\text{заг}}$ – маса заготовки, кг.

Розраховуємо η_1 для варіанту отримання заготовки за допомогою КГШП за формулою (1):

$$\eta_1 = \frac{2,71}{8,2} = 0,33$$

Розраховуємо η_2 для варіанту отримання заготовки за допомогою ГКМ за формулою (1):

$$\eta_2 = \frac{2,71}{7,95} = 0,34$$

Вартість однієї заготовки можна розрахувати за наступною формулою [28, с.6]

$$B = B_B \cdot Q \cdot K_T K_M K_B K_C K_{\Pi} - (Q - q) \cdot B_{\text{від}}, \quad (3.2)$$

де B_B – базова вартість виготовлення 1 кг заготовок, грн [29];

Q і q – маса заготовки і деталі, кг;

K_T, K_M, K_B, K_C і K_{Π} – коефіцієнти, що враховують відповідно клас точності, матеріал, групу складності, масу заготовки, програму випуску [28, с.18-19];

$B_{\text{від}}$ – вартість 1 кг відходів/лому, грн [30].

Звідси, дані для заготовки на КГШП наступні:

$B_{B1} = 950$ грн; $Q_1 = 8,2$ кг; $B_{\text{від}} = 45$ грн/кг.

Дані для заготовки на ГКМ наступні:

$B_{B2} = 950$ грн; $Q_2 = 7,95$ кг; $B_{\text{від}} = 45$ грн/кг.

Розраховуємо B_1 , грн для варіанту заготовки отриманої на КГШП за формулою (3.2):

$$B_1 = 950 \cdot 8,2 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 0,9 \cdot 1,12 \cdot 1 - (8,2 - 2,71) \cdot 45 = 12473,7 \text{ грн}$$

Розраховуємо B_2 , грн для базового варіанту (ГКМ) за формулою (3.2):

$$\begin{aligned} B_2 &= 950 \cdot 7,95 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 0,9 \cdot 1,12 \cdot 1 - (7,95 - 2,71) \cdot 45 = \\ &= 12097,13 \text{ грн} \end{aligned}$$

Тепер можемо розрахувати річні заощадження за вартістю виготовлення заготовок E_B , грн [28, с.6] за допомогою формули (3.3):

$$E_B = (B_1 - B_2) \cdot N \quad (3.3)$$

$$E_B = (12473,7 - 12097,13) \cdot 5000 = 1882850 \text{ грн}$$

А річні заощадження матеріалу [28, с.7] можна розрахувати за формулою (3.4):

$$M = \frac{q(\eta_2 - \eta_1)}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot N \quad (3.4)$$

$$M = \frac{2,71(0,34 - 0,33)}{0,34 \cdot 0,33} \cdot 5000 = 1207,66 \text{ кг}$$

Так як вихідні дані окрім витрат матеріалу однакові для обох способів отримання заготовки, то додаткові витрати матеріалу дорівнюють річним заощадженням за вартістю виготовлення заготовок.

Довідкові та розрахункові величини вносимо до зведеної таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Зведена таблиця результатів розрахунку економічної доцільності отримання заготовок різними методами

Показник	Позначення	Одиниці виміру	Метод отримання заготовки	
			КГШП	ГКМ
Вага заготовки	Qзаг	кг	8,2	7,95
Ціна 1кг заготовки	Вб	грн	950	950
Коефіцієнти	Кт	-	0,9	0,9
	Км	-	1,8	1,8
	Кс	-	0,9	1,29
	Кв	-	1,12	1,12
	Кп	-	1	1
Ціна 1кг стружки	Ввід	грн	45	45
Ціна однієї заготовки	В	грн	12473,7	12097,13
Квм	η	-	0,33	0,34

Порівняння двох способів отримання заготовки показало, що виготовлення на ГКМ є більш вигідним. Вартість виробництва заготовки на ГКМ виявилася нижчою, ніж при використанні кривошипно-гойдалкового преса. Крім того, коефіцієнт використання матеріалу при застосуванні ГКМ хоч і не набагато, але є вищим, що свідчить про більш ефективне витрачання сировини.

Таким чином, аналіз усіх розрахунків дозволяє дійти висновку, що спосіб отримання заготовки за допомогою ГKM є кращим за всіма основними показниками. Важливо також враховувати, що максимальні зусилля, які можна реалізувати на ГKM, перевищують ті, що досягаються на КГШП. Це має вирішальне значення при виготовленні заготовок із високоміцних матеріалів, зокрема, з титанових сплавів. Завдяки таким технічним перевагам ГKM забезпечує не лише якісніше формування заготовок і надання необхідних властивостей деталі, але й їхню відповідність вимогам, що висуваються до сучасних матеріалів і виробничих процесів, особливо при роботі із складнопрофільними авіаційними деталями.

З огляду на всі переваги, остаточним вибором методу отримання заготовки є штампування на ГKM.

3.4 Проектування технологічного маршруту обробки деталі

3.4.1 Аналіз конструкції деталі на технологічність

У загальному розумінні конструкція деталі вважається технологічною, якщо вона сприяє простому та економічно вигідному процесу виготовлення. Основними критеріями технологічності деталі є абсолютні показники: трудомісткість (Т) та технологічна собівартість (С) її виробництва. Але для спрощення розуміння того чи є деталь конструктивно технологічною на етапі розробки можна виконати перевірочні розрахункові коефіцієнти [31, с. 26-28]. Перший такий коефіцієнт буде вказувати на те, чи є деталь конструктивно технологічною за коефіцієнтом використання матеріалу, який можна визначити за допомогою формули (3.1):

$$\eta = \frac{2,71}{7,79} = 0,34$$

$$0,34 < 0,8$$

За коефіцієнтом використання матеріалу спроектована деталь не є технологічною.

Наступним коефіцієнтом буде коефіцієнт, що вказує на технологічність конструкції деталі за кількістю уніфікованих елементів деталі. Його можна розрахувати за формулою:

$$K_{ке} = \frac{Q_{ує}}{Q_3} \geq 0,6, \quad (3.5)$$

де $Q_{ує}$ – кількість уніфікованих конструктивних елементів, тобто таких, які можна отримати за допомогою стандартного інструмента;

Q_3 – загальна кількість конструктивних елементів, серед яких можуть бути різного формату поверхні (площини, фасонні поверхні, конічні або циліндричні), різі, галтелі, канавки, шліци, фаски, тощо.

Згідно за кресленням, загальна кількість конструктивних елементів в деталі «Диск 0 ступені КВТ» дорівнює 21. З них уніфікованих 20. А отже коефіцієнт уніфікації розраховуємо за формулою 3.6:

$$K_{ке} = \frac{20}{21} = 0,95$$

$$0,95 > 0,6$$

За коефіцієнтом уніфікації конструкцію деталі можна вважати технологічною.

Наступним показником, за яким можна оцінити технологічність конструкції є коефіцієнт точності обробки. Цей коефіцієнт можна розрахувати за формулою:

$$K_{\text{то}} = 1 - \frac{1}{A_{\text{ср}}} > 0,8, \quad (3.6)$$

де $A_{\text{ср}}$ – середнє значення квалітету точності розмірів.

$$A_{\text{ср}} = \frac{13 * 2 + 12 * 7 + 11 * 5 + 10 * 4 + 8 + 7 * 2}{21} = 10,8$$

Звідси, розраховуємо коефіцієнт точності обробки за формулою (3.6):

$$K_{\text{то}} = 1 - \frac{1}{10,8} = 0,9$$

$$0,9 > 0,8$$

За коефіцієнтом точності обробки конструкція деталі є технологічною.

Останнім показником оцінки технологічності конструкції деталі є коефіцієнт шорсткості, який можна визначити за формулою:

$$K_{\text{ш}} = 1 - \frac{1}{B_{\text{ср}}} > 0,32, \quad (3.7)$$

де $B_{\text{ср}}$ – середнє значення шорсткості Ra , яке можна розрахувати за формулою:

$$B_{\text{ср}} = \frac{\sum Ra}{n}, \text{ де} \quad (3.8)$$

n – кількість параметрів шорсткості.

Визначаємо $B_{\text{ср}}$ за формулою (3.8):

$$B_{\text{ср}} = \frac{3,2 * 15 + 1,6 * 5}{21} = 2,66$$

Коефіцієнт шорсткості визначаємо за формулою (3.7):

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{2,66} = 0,62$$
$$0,62 > 0,32$$

За коефіцієнтом шорсткості конструкція деталі не є технологічною.

Визначивши всі коефіцієнти, можна дійти до висновку що конструкція деталі не є технологічною, хоча таке явище вважається нормальним при проєктуванні авіаційних деталей, а особливо складнопрофільних.

3.4.2 Проєктування маршруту обробки поверхні

Маршрут обробки поверхні (МОП) – це послідовність операцій, які виконуються для досягнення заданих параметрів поверхні, визначених кресленням деталі. Формування МОП залежить від кількох основних чинників. По-перше, це вимоги до точності розмірів і взаємного розташування поверхонь: чим суворіші ці вимоги, тим більше операцій необхідно виконати. По-друге, навіть якщо попередня обробка відповідає вимогам точності, вона може не забезпечити необхідної шорсткості поверхні, що потребує додаткових операцій, таких як шліфування, притирання, суперфініш або полірування. По-третє, термічна обробка (наприклад, цементация, відпуск, гартування чи азотування) може значно впливати на МОП, оскільки здатна погіршувати досягнуті показники точності, що вимагає додаткових переходів для їх відновлення. По-четверте, якість заготовки також відіграє важливу роль: чим нижчі початкові показники точності, форми та розташування поверхонь, тим більше операцій необхідно для забезпечення потрібної якості деталі. Зазначені чинники визначають кількість технологічних переходів, а їх достатність можна

перевірити за допомогою поняття «необхідні уточнення» [31, с.31], які обчислюються за відповідними формулами:

$$\varepsilon_{do} = \frac{Td_1}{Td_k}, \quad (3.9)$$

де Td_1 і Td_k – допуск геометричного розміру відповідно деталі і заготовки.

$$\varepsilon_{\Delta o} = \frac{\Delta_1}{\Delta_k}, \quad (3.10)$$

де Δ_1 і Δ_k – похибка форми і взаємного розташування відповідно деталі і заготовки.

$$\varepsilon_{Ra o} = \frac{Ra_1}{Ra_k}, \quad (3.111)$$

де Rz_1 і Rz_k – шорсткість деталі і заготовки.

Розрахунок МОП будемо проводити на внутрішню циліндричну поверхню $\emptyset 199H9^{(+0,115)}$, $Td_d = 0,115$ мм, 10-ий квалітет точності з шорсткістю $Ra_{3,2}$ мкм.

Відхилення на заготівці: $ES = +1,3$ мм, $EI = -2,7$ мм. Такі показники відхилень свідчать про точність із 16-им квалітетом точності.

Для подальшого розрахунку МОП необхідно розрахувати загальне уточнення за допуском та за шорсткістю., і визначити яка з цих величин потребує найбільшого уточнення.

Визначаємо загальне уточнення допуску за формулою (3.9), перерахувавши мм в мкм:

$$\varepsilon_{do} = \frac{4000}{115} = 34,78$$

Тепер визначаємо загальне уточнення шорсткості за формулою (3.111)

$$\varepsilon_{Ra0} = \frac{50}{3,2} = 15,62$$

Згідно отриманих результатів розрахунків, можна дійти до висновку що найбільшого уточнення потребує точність. Тож розраховуємо необхідну кількість переходів за формулою [31, с.32]:

$$k_i = 2 \lg \varepsilon_{Td} \quad (3.12)$$

$$k_i = 2 \cdot \lg 34,78 = 3,06$$

Тобто, необхідна кількість переходів для отримання необхідної точності $k = 3$.

Звідси, отримуємо наступний МОП: заготівка, точіння чорнове, точіння напівчистове, точіння чистове.

Тепер необхідно визначитись із ступенями показників точності та якості поверхні, які забезпечуватимуться на кожному з наступних переходів, враховуючи розраховану кількість переходів K . Тож розраховуємо послідовність показників точності та якості (ППТЯ):

$$\Delta = 16 - 10 = 6 \rightarrow 3 + 2 + 2$$

$$IT16 \rightarrow IT13 \rightarrow IT11 \rightarrow H9$$

$$Ra50 \rightarrow Ra12,5 \rightarrow Ra6,3 \rightarrow Ra3,2$$

$$\varepsilon_{Td1} = \frac{4000}{810} = 4,938$$

$$\varepsilon_{Td2} = \frac{810}{290} = 2,793$$

$$\varepsilon_{Td3} = \frac{290}{115} = 2,522$$

$$\varepsilon_{Ra1} = \frac{50}{12,5} = 4$$

$$\varepsilon_{Ra2} = \frac{12,5}{6,3} = 1,984$$

$$\varepsilon_{Ra3} = \frac{6,3}{3,2} = 1,969$$

Обраний та розрахований МОП буде забезпечувати необхідну точність та шорсткість за умови:

$$\prod_{j=1}^k \varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{oi} \quad (3.13)$$

Тож перевіряємо умову за точністю за формулою (3.13):

$$4.938 \cdot 2,793 \cdot 2,522 \geq 34,78$$

$$2,522 > 34,78$$

За шорсткістю:

$$4 \cdot 1,984 \cdot 1,969 \geq 15,62$$

$$15,625 > 15,62$$

Згідно проведеним розрахункам умову можна вважати виконаною, а призначений маршрут обробки зовнішньої циліндричної поверхні $\varnothing 199H9^{(+0,115)}$ правильним.

Результати розрахунків заносимо до таблиці 3.6

Таким же чином виконується розрахунок МОП на інші поверхні, а результат прискореного розрахунку заноситься до таблиці 3.7

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків МОП

Поверхня	Показник J	Уточнення ε0	Кількість переходів		МОП Метод обробки	Квалітет	Допуск Td, мм	Шорсткість Ra, мкм	Уточнення	
			Розраховане	Прийняте					По Td, мм	По Ra, мкм
Поверхня 1 – внутрішня циліндрична поверхня Ø199H9	Td	27,02	3	3	Заготівельна	IT16	4000	50	-	-
					Точіння чорнове	IT13	810	12,5	6,172	4
	Ra	15,62	3	3	Точіння напівчистове	IT11	290	6,3	2,793	1,984
					Точіння чистове	H9	115	3,2	2,522	1,968
Загальне уточнення									34,78	15,62

Таблиця 3.7 – Прискорений МОП

Поверхня	Кількість переходів	ППТЯ	Метод обробки	Квалітет	Допуск Td, мкм	Шорсткість Ra, мкм
Поверхня 2 - зовнішня циліндрична поверхня Ø315h8	3	$\Delta=16-8=8 \rightarrow 4+2+2$ IT16→IT12→IT10→h8 Ra50→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготовка	IT16	2000	50
			2. Точіння чорнове	IT12	350	12,5
			3. Точіння чистове	IT9	87	6,3
			4. Точіння тонке	H8	54	3,2
Поверхня 5 - внутрішня циліндрична поверхня Ø285.5H7	4	$\Delta=16-7=9 \rightarrow 4+2+2+1$ IT16→IT12→IT10→IT8→H7 Ra50→Ra25→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3200	50
			2. Точіння чорнове	IT12	520	25
			3. Точіння напівчистове	IT10	210	12.5
			4. Точіння чистове	IT8	81	6.3
			5. Точіння тонке	H7	52	3,2

Продовження таблиці 3.7

Поверхня	Кількість переходів	ППТЯ	Метод обробки	Квалітет	Допуск Td, мкм	Шорсткість Ra, мкм
Поверхня 2 - зовнішня циліндрична поверхня Ø315h8	3	$\Delta=16-8=8 \rightarrow 4+2+2$ IT16→IT12→IT10→h8 Ra50→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3600	50
			2. Точіння чорнове	IT12	570	12,5
			3. Точіння чистове	IT10	230	6,3
			4. Точіння тонке	h8	81	3,2
Поверхня 3 - внутрішня циліндрична поверхня Ø312H12	3	$\Delta=16-12=4 \rightarrow 2+1+1$ IT16→IT14→IT13→H12 Ra50→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3200	50
			2. Точіння чорнове	IT14	1300	12,5
			3. Точіння чистове	IT13	810	6,3
			4. Точіння тонке	H12	520	3,2

Продовження таблиці 3.7

Поверхня	Кількість переходів	ППТЯ	Метод обробки	Квалітет	Допуск Td, мкм	Шорсткість Ra, мкм
Поверхня 5 - внутрішня циліндрична поверхня Ø290.5H7	4	$\Delta=16-7=9 \rightarrow 4+2+2+1$ IT16→IT12→IT10→IT8→H7 Ra50→Ra25→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3200	50
			2. Точіння чорнове	IT12	520	25
			3. Точіння напівчистове	IT10	210	12.5
			4. Точіння чистове	IT8	81	6.3
			5. Точіння тонке	H7	52	3,2
Поверхня 8 - внутрішня циліндрична поверхня Ø306.4H10	3	$\Delta=16-12=4 \rightarrow 3+2+1$ IT16→IT13→IT11→H10 Ra50→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3200	50
			2. Точіння чорнове	IT13	810	12,5
			3. Точіння чистове	IT11	320	6,3
			4. Точіння тонке	H10	210	3,2

Продовження таблиці 3.7

Поверхня	Кількість переходів	ППТЯ	Метод обробки	Квалітет	Допуск Td, мкм	Шорсткість Ra, мкм
Поверхня 9 - внутрішня циліндрична поверхня Ø310H10	3	$\Delta=16-12=4 \rightarrow 3+2+1$ IT16→IT13→IT11→H10 Ra50→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3200	50
			2. Точіння чорнове	IT13	810	12,5
			3. Точіння чистове	IT11	320	6,3
			4. Точіння тонке	H10	210	3,2
Поверхня 11 - внутрішня циліндрична поверхня Ø287.6H10	3	$\Delta=16-12=4 \rightarrow 3+2+1$ IT16→IT13→IT11→H10 Ra50→Ra12,5→Ra6,3→ →Ra3,2	1. Заготівка	IT16	3200	50
			2. Точіння чорнове	IT13	810	12,5
			3. Точіння чистове	IT11	320	6,3
			4. Точіння тонке	H10	210	3,2

3.4.3 Маршрут виготовлення деталі

Під час розробки маршруту виготовлення деталі «Диск 0 ступені КВТ» було прийнято рішення вдосконалити технологічний процес виготовлення складнопрофільних пазів «Д» шляхом заміни кількох фрезерувальних операцій на одну електроерозійну.

Враховуючи механічні властивості матеріалу деталі – сплаву ВТ8, такий вибір обумовлено також складністю механічної обробки твердих титанових сплавів. Однак, електропровідні властивості такого матеріалу дозволяють застосовувати електроерозійну обробку, в тому числі з застосуванням дротяного обладнання.

Звертаючи увагу на складність профілю пазів, обробка на електроерозійному обладнанні дозволяє знизити вимоги до кваліфікації персоналу. Окрім того, особливості дротяної електроерозійної обробки дозволяють одночасно обробляти кілька деталей, що значно скорочує загальний час обробки, що позитивно впливає на витрати підприємства, зменшуючи собівартість виготовлення деталей. Крім того, одночасна обробка одразу кількох деталей дозволяє забезпечити максимальну ідентичність деталей, що є особливо важливим в авіаційній промисловості. Крім того, скорочення тривалості обробки на електроерозійному обладнанні позитивно впливає на витрати підприємства та дозволяє забезпечити максимальну ідентичність деталей, особливо в авіаційній промисловості, де точність та якість є критичними показниками.

Обробка таких пазів потребує досить високої точності та нерідко високої якості поверхні. Це не є проблемою, оскільки сучасне електроерозійне обладнання дозволяє досягати точності в $\pm 0,002$ мм і шорсткості $Ra_{0,25-32}$, що цілком задовольняє вимоги до точності та якості поверхні при виготовленні пазів «Д» деталі «Диск 0 ступеня КВТ».

Детальний МВД надається на А1 включно з операційними ескізами.

3.5 Розрахунок припусків і технологічних розмірів

Розрахунок припусків на поверхню 1 – внутрішню циліндричну поверхню $\text{Ø}199\text{H}9^{(+0,115)}$ буде проведений за допомогою методу розмірних ланцюгів.

Розрахунок припусків та визначення виконавчих розмірів потребує визначення допусків на переходи, що було визначено і вказано в таблиці 3.6.

$$Td_3 = Td_1 = 4 \text{ мм}$$

$$Td_2 = 0,81 \text{ мм}$$

$$Td_3 = 0,29 \text{ мм}$$

$$Td_4 = 0,115 \text{ мм}$$

Визначаємо та призначаємо припуски табличним методом за [33, с.44, т.4.4.] для чорнового, та за [33, с.41, т.4.3.] для напівчистового і тонкого точіння:

- точіння чорнове: $2Z_2^{min} = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ мм};$
- точіння напівчистове: $2Z_3^{min} = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ мм};$
- точіння чистове: $2Z_4^{min} = 0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ мм};$

Технологічні розміри визначаємо за допомогою метода розмірних ланцюгів. Для цього слід визначити верхнє та нижнє відхилення заготовки:

$$EI_3 = +1,3$$

$$ES_3 = -2,7$$

Визначаємо мінімальний діаметр поверхні деталі, тобто останнього переходу:

$$D_{дет}^{min} = D_4^{min} = D_{4ном} + EI_{D4} = 199 + 0 = 199$$

Розрахункові мінімальні розміри [31, с.59] знаходимо за формулою (3.14):

$$D_{min} = D_{i+min} - 2Z_{i+1}^{min} - T_{Di} \quad (3.14)$$

$$D_3^{min} = D_4^{min} - 2Z_4^{min} - T_{D3} = 199 - 0,4 - 0,29 = 198,31$$

$$D_2^{min} = D_3^{min} - 2Z_3^{min} - T_{D2} = 198,31 - 0,6 - 0,81 = 196,9$$

$$D_1^{min} = D_2^{min} - 2Z_2^{min} - T_{D1} = 196,9 - 5 - 4 = 187,9$$

Визначаємо максимальні значення розмірів для переходів за формулою (3.14):

$$D_i^{max} = D_i^{min} + T_{Di} \quad (3.15)$$

$$D_1^{max} = 187,9 + 4 = 191,9$$

$$D_2^{max} = 196,9 + 0,81 = 197,71$$

$$D_3^{max} = 198,31 + 0,29 = 198,6$$

$$D_4^{max} = 199 + 0,115 = 199,115$$

Розраховуємо максимальні значення припусків для переходів [31, с.67] за формулою (3.15):

$$2Z_i^{max} = D_i^{max} - D_{i-1}^{min} \quad (3.16)$$

$$2Z_4^{max} = D_4^{max} - D_3^{min} = 199,115 - 198,31 = 0,805$$

$$2Z_3^{max} = D_3^{max} - D_2^{min} = 198,6 - 196,9 = 1,7$$

$$2Z_2^{max} = D_2^{max} - D_1^{min} = 197,71 - 187,9 = 9,81$$

Далі необхідно виконати перевірочний розрахунок [31, с.67] за допомогою правила (3.17):

$$TZ_0 = 2Z_0^{max} - 2Z_0^{min} = T_{D_{заг}} + T_{D_{дет}}, \quad (3.17)$$

$$\text{де } 2Z_0^{max} = D_4^{max} - D_1^{min} = 199,115 - 187,9 = 11,215$$

$$2Z_0^{min} = D_4^{min} - D_1^{max} = 199 - 191,9 = 7,1$$

Тепер виконуємо перевірочний розрахунок за допомогою формули (3.17):

$$11,215 - 7,1 = 4 + 0,115$$

$$4,115 = 4,115$$

Технологічні виконавчі розміри:

- заготівка: $\text{Ø}187,9^{+4,0}$ мм;
- точіння чорнове: $\text{Ø}196,9^{+0,81}$ мм;
- точіння напівчистове: $\text{Ø}198,31^{+0,29}$ мм;
- точіння чистове: $D_4 = \text{Ø}199^{+0,185}$ мм.

Результати розрахунків заносимо до таблиці 3.8. Схема припусків зображена на рисунку 3.7. Таким же чином розраховуються припуски на інші циліндричні поверхні

Припуски на лінійні розміри визначаються табличним методом за [33, с.45-46, т.4.9-4.10].

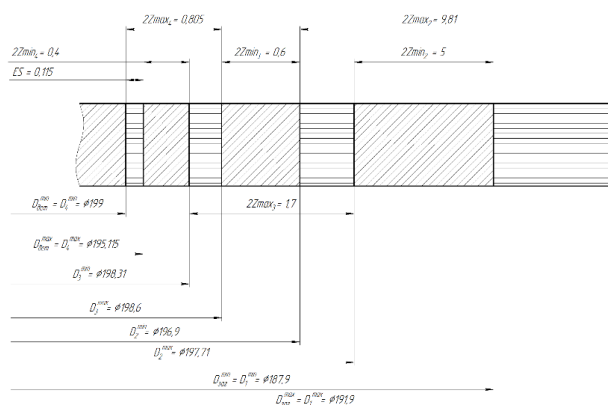


Рисунок 3.7 – Схема припусків для обробки поверхні 1 – внутрішньої циліндричної $\text{Ø}199^{+0,115}$

Таблиця 3.8 – Результати розрахунків припусків за переходами

Поверхня	Перехід	Допуск Td, мм	Припуски, мм		Діаметри обробки d, мм		Виконавчий розмір, мм
			2Zmin	2Zmax	min	max	
Внутрішня циліндрична поверхня Ø199H9	1. Заготівка	4			187,9	191.9	Ø187,9 ^{+4,0}
	2. Розточування чорнове	0.81	5	9.81	196,9	197.71	Ø196,9 ^{+0,81}
	3. Розточування напівчистове	0.29	0.6	1.7	198,31	198.6	Ø198,31 ^{+0,29}
	4. Розточування чистове	0.115	0.4	0.875	199	199.115	Ø199 ^{+0,185}

3.6 Розрахунок режимів різання

Розрахунок режимів різання буде виконаний для операції 015 Токарної з ЧПК, ціль якої створити бази для обробки інших поверхонь. Розрахунок буде виконано таблично-аналітичним методом.

Для обробки зовнішнього діаметру і підрізки торцю обираємо різець CoroTurn 107 C3-SDJCL-22040-11C1. Його геометрія та матеріал добре підходять для такого виду обробки деталей з міцних сплавів. А пластини обираємо із покриттям TiAlN, а саме серії GC1130, спеціально розробленої для обробки титанових і жароміцних сплавів

1. Перший перехід – чорнове точіння зовнішньої поверхні 1 – $\text{Ø}315\text{h}8$ (рис. 3.8).

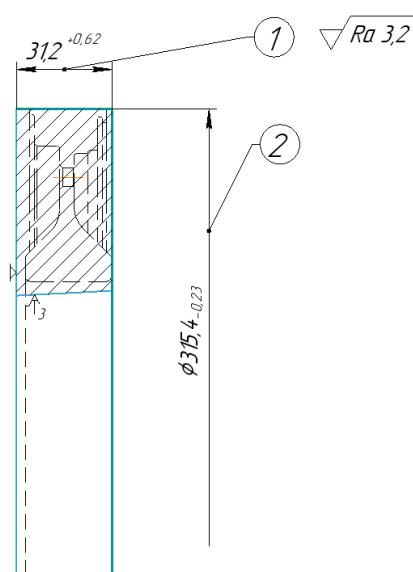


Рисунок 3.8 – Операційний ескіз для операції 015 Токарної з ЧПК

Для початку необхідно визначити припуск на цей перехід h , мм за формулою (3.18):

$$h = D_{\text{заг}} - D_{\text{дет}} \quad (3.18)$$

$$h = 319,8 - 315 = 4,8 \text{ мм}$$

Тепер необхідно розрахувати глибину різання, яка дорівнює припуску на сторону, мм за формулою (3.19):

$$t = \frac{h}{2} \quad (3.19)$$

$$t = \frac{4,8}{2} = 2,4 \text{ мм}$$

Але слід врахувати, що на цій операції ми не обробляємо поверхню до розмірів деталі, а лише підготовлюємо як базу для обробки інших поверхонь. Тому залишаємо 0,4 мм на чистову обробку в кілька проходів. Звідси припуск на сторону дорівнює $t = 2$ мм.

Сучасне обладнання дозволяє обробляти титан із доволі великою глибиною різання, а якість поверхні при чорновому переході не важлива, тому для виконання переходу вистачить одного проходу i , а отже глибина різання за прохід t , мм дорівнюватиме:

Табличним методом за [35, с.237, т.27] обираємо та призначаємо подачу $S_{oT} = 0,88$ мм/об. Корегуємо її за допомогою поправочного коефіцієнта K_{So} [35, с.240], який знаходимо за наступною формулою:

$$K_{So} = K_{Sn} K_{Si} K_{S\phi} K_{S3} K_{Sж} K_{Sm}, \quad (3.20)$$

де $K_{Sn} = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує стан оброблюємої поверхні [35, с.239, т.30];

$K_{Si} = 1$ – коефіцієнт, що враховує матеріал інструмента [35, с.239, т.30];

$K_{S\phi} = 0,85$ – коефіцієнт, що враховує форму оброблюємої поверхні [35, с.239, т.30];

$K_{S3} = 0,5$ – коефіцієнт, що враховує вплив гартування [35, с.239, т.30];

$K_{S_{ж}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує жорсткість технологічної системи [35, с.239, т.30];

$K_{S_{м}} = 0,85$ – коефіцієнт, що враховує матеріал деталі [35, с.239, т.30].

Розраховуємо поправочний коефіцієнт для подачі за формулою (3.20):

$$K_{S_o} = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,85 = 0,289$$

Корегуємо табличне значення подачі, та визначаємо дійсне S_o за формулою (3.21):

$$S_o = S_{oT} \cdot K_{S_o} \quad (3.21)$$

$$S_o = 0,88 \cdot 0,289 = 0,25 \text{ мм/об}$$

Табличне значення швидкості різання приймаємо за $V_T = 74 \text{ м/хв}$ [35, с.249, т.46]. Тепер необхідно скорегувати значення швидкості різання за допомогою поправочного коефіцієнта K_V [35, с.240] за формулою (3.22):

$$K_V = K_{V_{м}} \cdot K_{V_{и}} \cdot K_{V_{\phi}} \cdot K_{V_{т}} \cdot K_{V_{ж}} \cdot K_{V_{п}} \cdot K_{V_{o}}, \quad (3.22)$$

де $K_{V_{м}} = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує те, як добре оброблюється матеріал деталі [35, с.249, т.48];

$K_{V_{и}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує матеріал інструмента [35, с.249, т.48];

$K_{V_{\phi}} = 0,92$ – коефіцієнт, що враховує кут у плані [35, с.249, т.48];

$K_{V_{т}} = 0,9$ – коефіцієнт, що враховує вид обробки [35, с.249, т.48];

$K_{V_{ж}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує жорсткість технологічної системи [35, с.249, т.48];

$K_{V_{п}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує стан поверхні що обробляється [35, с.249, т.48];

$K_{V_{o}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує наявність ЗОР [35, с.249, т.48].

Розраховуємо поправочний коефіцієнт для швидкості різання за формулою (3.22):

$$K_V = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,92 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,6624$$

Визначаємо дійсну швидкість різання V , м/хв за формулою (3.23):

$$V = V_T \cdot K_V \quad (3.23)$$

$$V = 99 \cdot 0,6624 = 49,01 \text{ м/хв}$$

Визначаємо частоту обертання шпинделя за емпіричною формулою n , об/хв:

$$n = \frac{1000V}{\pi D} \quad (3.24)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 49,01}{3,14 \cdot 315} \approx 50 \text{ об/хв}$$

Так як при виробництві використовується верстат з ЧПК та безступінчастим регулюванням обертів, немає потреби корегувати значення за паспортом верстата. А отже, визначаємо силу різання P_z , Н [34, с.271] за формулою (3.25):

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (3.25)$$

де $C_p = 350$, $x = 1$, $y = 0,75$, $n = -0,15$ – постійна і показники степенів що враховують конкретні умови обробки [34, с.273, т.22];

K_p – поправочний коефіцієнт, що складається з ряду інших коефіцієнтів [34, с.271], та визначається за формулою:

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{rp}, \quad (3.26)$$

де $K_{\varphi p} = 0,94$ – коефіцієнт, що враховує кут різця φ [34, с.275, т.23];

$K_{\gamma p} = 1$ – коефіцієнт, що враховує кут різця γ [34, с.275, т.23];

$K_{\lambda p} = 1$ – коефіцієнт, що враховує кут різця λ [34, с.275, т.23];

$K_{rp} = 0,87$ – коефіцієнт, що враховує радіус вершини різця [34, с.275, т.23];

K_{mp} – коефіцієнт що враховує матеріал деталі і при $n = 0,75$ (коефіцієнт що враховує матеріал ріжучої пластини, а саме твердого сплаву [34, с.264, т.9]) визначається за формулою:

$$K_{mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750} \right)^n \quad (3.27)$$

$$K_{mp} = \left(\frac{1100}{750} \right)^{0,75} = 1,33$$

Розраховуємо поправочний коефіцієнт K_p за формулою (3.26):

$$K_p = 1,33 \cdot 0,94 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,87 = 1,08$$

Визначаємо силу різання P_z , Н за формулою (3.25):

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 2^1 \cdot 0,25^{0,75} \cdot 49,01^{-0,15} \cdot 1,08 = 1274 \text{ Н}$$

Звідси, визначаємо потужність обробки за емпіричною формулою:

$$N = \frac{V \cdot P_z}{1020 \cdot 60} \quad (3.28)$$

$$N = \frac{49,01 \cdot 1274}{1020 \cdot 60} = 1,02 \text{ кВт}$$

Визначаємо довжину обробки за формулою:

$$L = l_{\text{р.х.}} + y + \Delta, \quad (3.29)$$

де $l_{\text{р.х.}} = 32,8$ мм – довжина оброблюємої поверхні;

$y + \Delta = 3$ мм – довжина врізання і перебігу інструмента.

Розраховуємо довжину обробки за формулою (3.29):

$$L = 32,8 + 3 = 35,8 \text{ мм}$$

Розраховуємо машинний час T_0 , хв за допомогою формули (3.30):

$$T_0 = \frac{L}{S_0 \cdot n} \cdot i \quad (3.30)$$

$$T_0 = \frac{35,8}{0,25 \cdot 50} \cdot 1 = 2,86 \text{ хв}$$

2. Другий перехід – підрізка торцю, поверхня 2 (рис. 3.8).

Для початку необхідно визначити припуск на цей перехід:

$$h = 32,8 - 29 = 3,8 \text{ мм}$$

Для того щоб видалити всі нерівності після штампування, розподілимо припуск підрізки торцю на дві операції. Тоді припуск на дану операцію буде:

$$h = \frac{3,8}{2} = 1,9$$

Також слід пам'ятати, що дана операція призначення для підготовки поверхонь як баз, а не на розміри деталі, тому залишаємо 0,4 мм для чистової обробки торцю. Тоді припуск на даний перехід буде дорівнювати $h = 1,5$ мм. Для

виконання переходу вистачить одного прохода i , а отже глибина різання за прохід t , мм дорівнюватиме:

$$t = \frac{1,5}{1} = 1,5$$

Табличним методом за [35, с.237, т.27] обираємо та призначаємо подачу $S_{oT} = 0,88$ мм/об. Корегуємо її за допомогою поправочного коефіцієнта K_{So} , який знаходимо за формулою (3.20):

$K_{Sn} = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує стан оброблюємої поверхні [35, с.239, т.30];

$K_{Si} = 1$ – коефіцієнт, що враховує матеріал інструмента [35, с.239, т.30];

$K_{Sф} = 0,85$ – коефіцієнт, що враховує форму оброблюємої поверхні [35, с.239, т.30];

$K_{Sз} = 0,5$ – коефіцієнт, що враховує вплив гартування [35, с.239, т.30];

$K_{Sж} = 1$ – коефіцієнт, що враховує жорсткість технологічної системи [35, с.239, т.30];

$K_{Sm} = 0,85$ – коефіцієнт, що враховує матеріал деталі [35, с.239, т.30].

$$K_{So} = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,85 = 0,289$$

Корегуємо табличне значення подачі, та визначаємо дійсне S_o за формулою (3.21):

$$S_o = 0,88 \cdot 0,289 = 0,25 \text{ мм/об}$$

Табличне значення швидкості різання приймаємо за $V_T = 74$ м/хв [35, с.249, т.46]. Тепер необхідно скорегувати значення швидкості різання за допомогою поправочного коефіцієнта K_V за формулою (3.22). Для даного переходу вихідні для розрахунку наступні:

$K_{V_M} = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує те, як добре оброблюється матеріал деталі [35, с.249, т.48];

$K_{V_{И}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує матеріал інструмента [35, с.249, т.48];

$K_{V_{\Phi}} = 0,92$ – коефіцієнт, що враховує кут у плані [35, с.249, т.48];

$K_{V_T} = 0,9$ – коефіцієнт, що враховує вид обробки [35, с.249, т.48];

$K_{V_{Ж}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує жорсткість технологічної системи [35, с.249, т.48];

$K_{V_{П}} = 1$ – коефіцієнт, що враховує стан поверхні що обробляється [35, с.249, т.48];

$K_{V_0} = 1$ – коефіцієнт, що враховує наявність ЗОР [35, с.249, т.48].

$$K_V = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,92 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,6624$$

Визначаємо дійсну швидкість різання V , м/хв за формулою (3.23):

$$V = 99 \cdot 0,6624 = 49,01 \text{ м/хв}$$

Визначаємо частоту обертання шпинделя за емпіричною формулою n , об/хв за формулою (3.24):

$$n = \frac{1000 \cdot 49,01}{3,14 \cdot 315} \approx 50 \text{ об/хв}$$

Так як при виробництві використовується верстат з ЧПК та безступінчастим регулюванням обертів, немає потреби корегувати значення за паспортом верстата. А отже, визначаємо силу різання P_z , Н за формулою (3.25). Вихідні дані на даному переході для розрахунку наступні:

$C_p = 350$, $x = 1$, $y = 0,75$, $n = -0,15$ – постійна і показники степенів що враховують конкретні умови обробки [34, с.273, т.22];

K_p – поправочний коефіцієнт, що складається з ряду інших коефіцієнтів, та визначається за формулою (3.26);

$K_{\varphi p} = 0,94$ – коефіцієнт, що враховує кут різця φ [34, с.275, т.23];

$K_{\gamma p} = 1$ – коефіцієнт, що враховує кут різця γ [34, с.275, т.23];

$K_{\lambda p} = 1$ – коефіцієнт, що враховує кут різця λ [34, с.275, т.23];

$K_{r p} = 0,87$ – коефіцієнт, що враховує радіус вершини різця [34, с.275, т.23];

$K_{m p}$ – коефіцієнт що враховує матеріал деталі визначається за формулою [34, с.264, т.9];

$n = 0,75$ – коефіцієнт що враховує матеріал різця [34, с.264, т.9].

Визначаємо коефіцієнт $K_{m p}$ за формулою (3.27):

$$K_{m p} = \left(\frac{1100}{750} \right)^{0,75} = 1,33$$

Розраховуємо поправочний коефіцієнт K_p за формулою (3.26):

$$K_p = 1,33 \cdot 0,94 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,87 = 1,08$$

Визначаємо силу різання P_z , Н за формулою (3.25):

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 1,5^1 \cdot 0,25^{0,75} \cdot 49,01^{-0,15} \cdot 1,08 = 955 \text{ Н}$$

Звідси, визначаємо потужність обробки за емпіричною формулою (3.28):

$$N = \frac{49,01 \cdot 955}{1020 \cdot 60} = 0,76 \text{ кВт}$$

Визначаємо довжину обробки за формулою (3.29):

$l_{p.x} = 120,8$ мм – довжина оброблюємої поверхні, мм;

$y + \Delta = 3$ мм – довжина врізання і перебігу інструмента, мм.

$$L = 120,8 + 3 = 123,8 \text{ мм}$$

Розраховуємо машинний час T_0 , хв за допомогою формули (3.30):

$$T_0 = \frac{123,8}{0,25 \cdot 50} \cdot 1 = 9,9 \text{ хв}$$

3.7 Технічне нормування операції

Технічне нормування операції виконуватиметься для операції 015 Токарної з ЧПК. Визначаємо загальний основний машинний час t_o , хв:

$$\begin{aligned} t_o &= t_{o1} + t_{o2} = \\ t_o &= 2,86 + 9,9 = 12,76 \text{ хв} \end{aligned}$$

Допоміжний час при роботі на токарному верстаті с ЧПК:

$$t_{\text{доп}} = t_y + t_{\text{упр}} + t_{\text{контр}} + t_{\text{пр.пер}}, \quad (3.31)$$

де $t_y = 0,3$ хв – час на установку і зняття при роботі з самоцентруючим патроном [36, с.148];

$t_{\text{упр}} = 0,015$ хв – час на управління верстатом (увімкнути верстат кнопкою) [36, с.156]

$t_{\text{контр}} = 0,16 \cdot 2 = (0,32)$ хв – час на контроль штангенциркулем двох розмірів [36, с.160]. Цей час перекривається основним і тому в норму штучного часу не входить.

$t_{\text{пр.пер}} = 0,05 \cdot 2 = 0,1$ хв – час прискореного підводу та відводу різця. При роботі на верстаті з ЧПК час не зміну режимів не враховується.

Визначаємо допоміжний час $t_{\text{доп}}$, хв за формулою (3.31):

$$t_{\text{доп}} = 0,3 + 0,015 + (0,32) + 0,1 = 0,415 \text{ хв}$$

Розраховуємо оперативний час:

$$t_{\text{оп}} = t_0 + t_{\text{доп}}$$

$$t_{\text{оп}} = 12,76 + 0,415 = 13,175$$

Додатковий час визначається за формулою:

$$t_{\text{дод}} = \alpha \cdot t_{\text{оп}}, \quad (3.32)$$

де $\alpha = 10\%$ – час на відпочинок, обслуговування робочого місця і особисті потреби [36, с. 136].

Визначаємо додатковий час $t_{\text{дод}}$, хв за формулою (3.32):

$$t_{\text{дод}} = 0,1 \cdot 13,175 = 1,317 \text{ хв}$$

Знаходимо штучний час $t_{\text{шт}}$, хв за формулою:

$$t_{\text{шт}} = t_{\text{оп}} + t_{\text{дод}} \quad (3.33)$$

$$t_{\text{шт}} = 13,175 + 1,317 = 14,492 \text{ хв}$$

Визначаємо підготовчо-заклучний час $t_{п-з}$, хв [36, с.135-136]. Підготовчо-заклучний час складається з нормативу на наладку верстата, інструмента і пристосування – 16 хв, норматива часу на додаткові прийоми – 3 хв на установку різців, та нормативу на отримання інструменту і пристосування до початку роботи і здачі після роботи – 10 хв. А отже:

$$t_{п-з} = 16 + 3 + 10 = 29 \text{ хв}$$

Кількість деталей в партії $n = 417$ шт. Тепер розраховуємо штучно-калькуляційний час за наступною формулою:

$$t_{ш-к} = t_{шт} + \frac{t_{п-з}}{n} \tag{3.34}$$
$$t_{ш-к} = 14,492 + \frac{29}{417} = 14,561 \text{ хв}$$

3.8 Розробка керуючої програми

Розробка керуючої програми буде відбуватися за допомогою САМ програми NX 10 для операції 015 Токарної з ЧПК, де відбувається підготовка наружного діаметра і торця в якості баз для подальшої обробки. Перед початком безпосередньої розробки керуючої програми, необхідно виконати низку дій для підготовки. Перш за все потрібно створити новий файл вибравши в меню «Manufacturing» програму «Mill Turn (Express)» (рис.3.9), після чого додати модель деталі та заготівки і вказати їх (рис. 3.10)

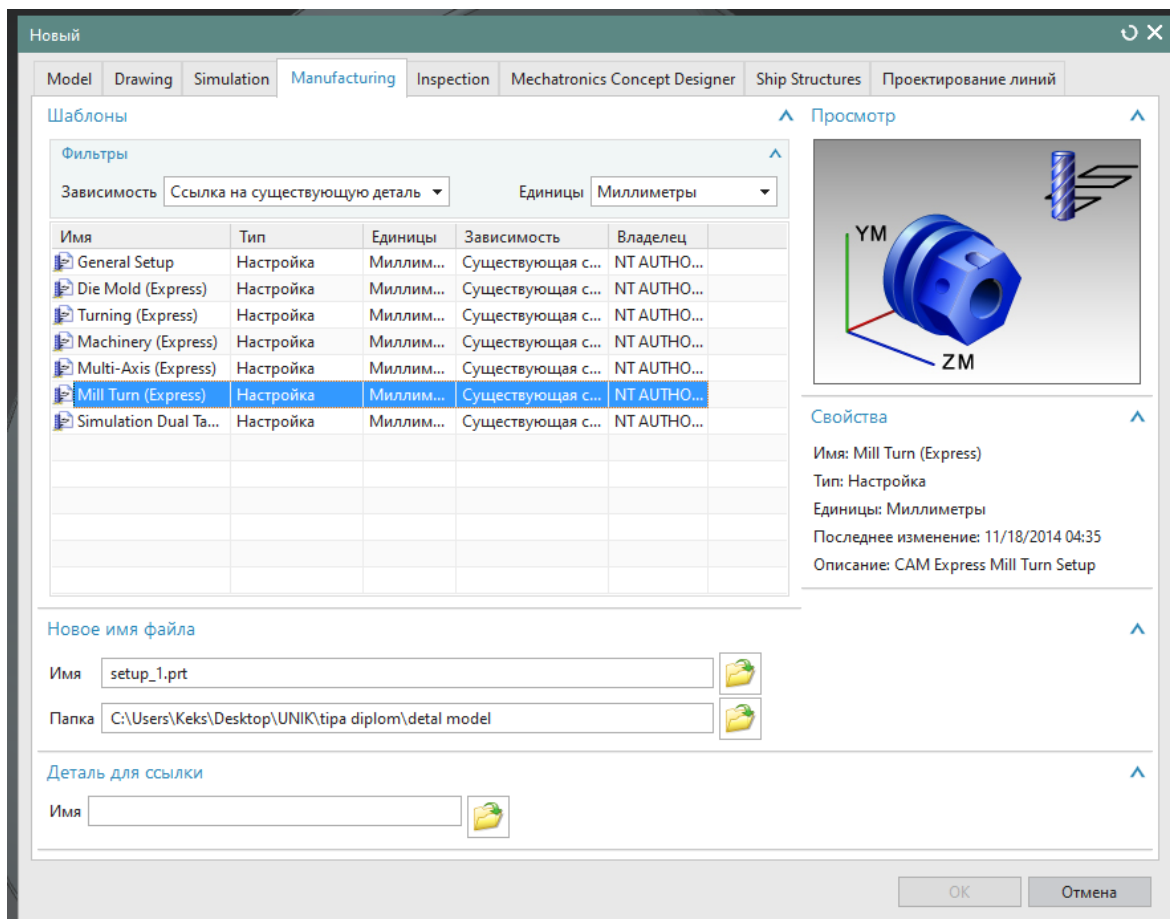


Рисунок 3.9 – Створення нового файлу моделювання обробки.

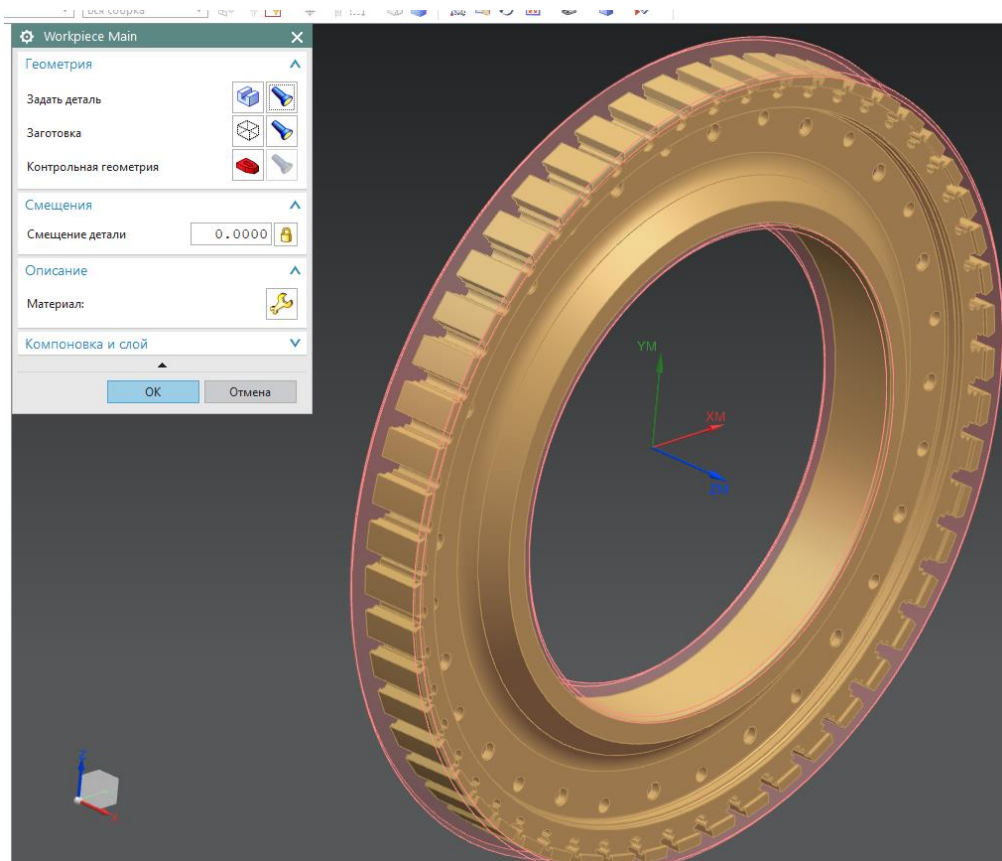


Рисунок 3.10 – Створення геометрії деталі і заготівки.

Для токарних операції обов'язковим пунктом є налаштування геометрії «Avoidance» (рис. 3.11), яка відповідає за розташування площини безпеки, а саме вказує звідки і куди буде підходити інструмент.

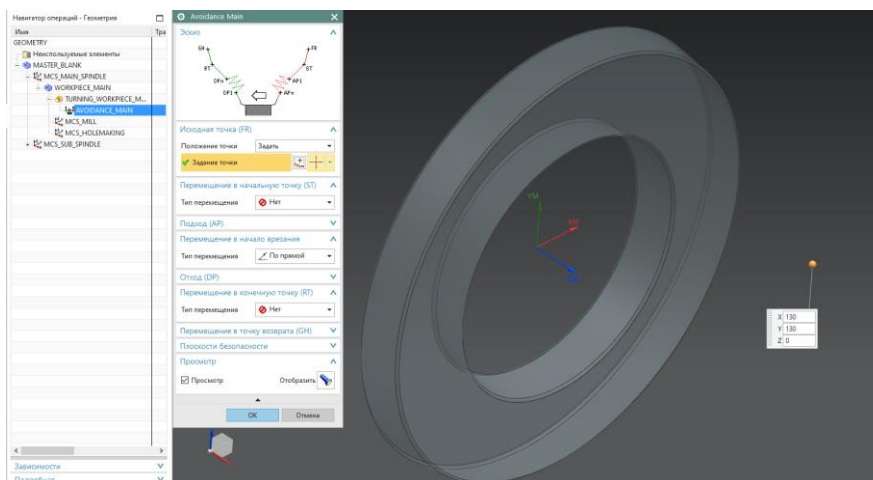


Рисунок 3.11 – Налаштування геометрії «Avoidance».

Останнім пунктом підготовки до розробки керуючої програми є налаштування інструменту. В даній операції задіяно один різець, тому додаємо його (рис. 3.12) та налаштовуємо його параметри згідно до вказаних виробником [37] (рис. 3.13)

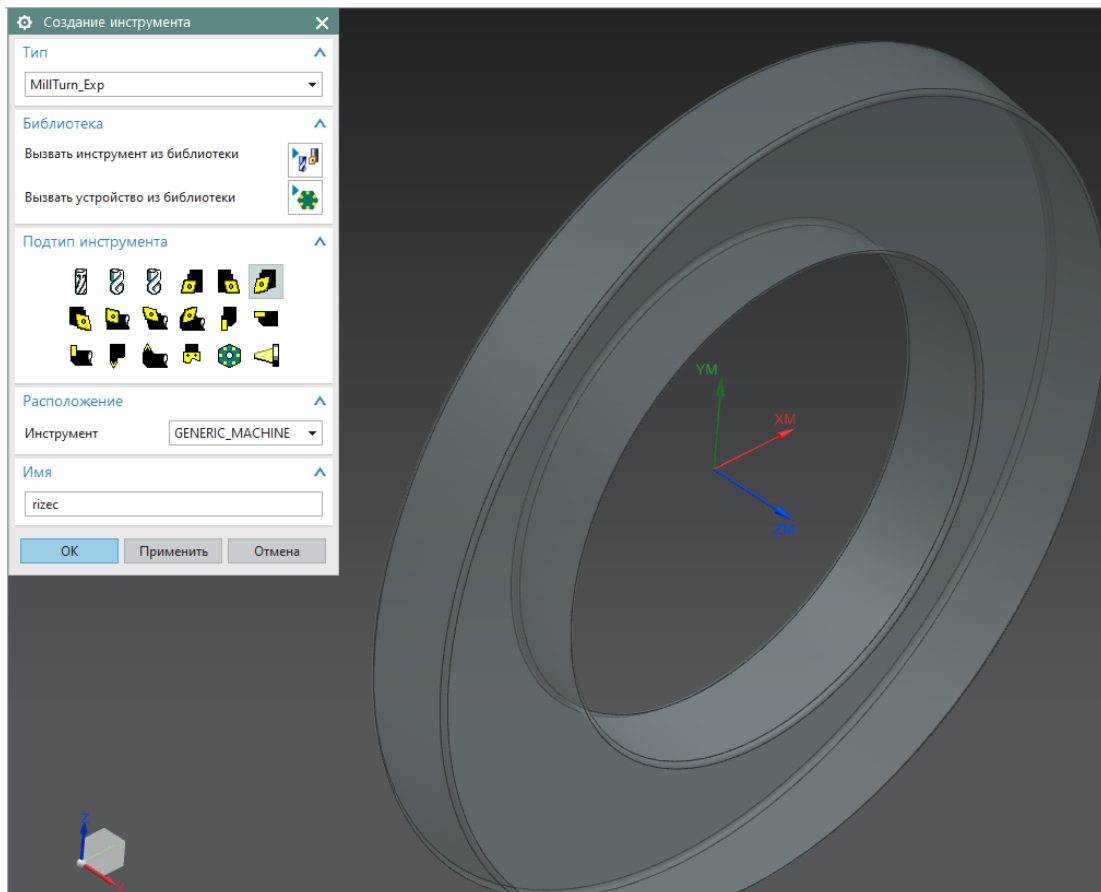


Рисунок 3.12 – Додавання нового інструменту.

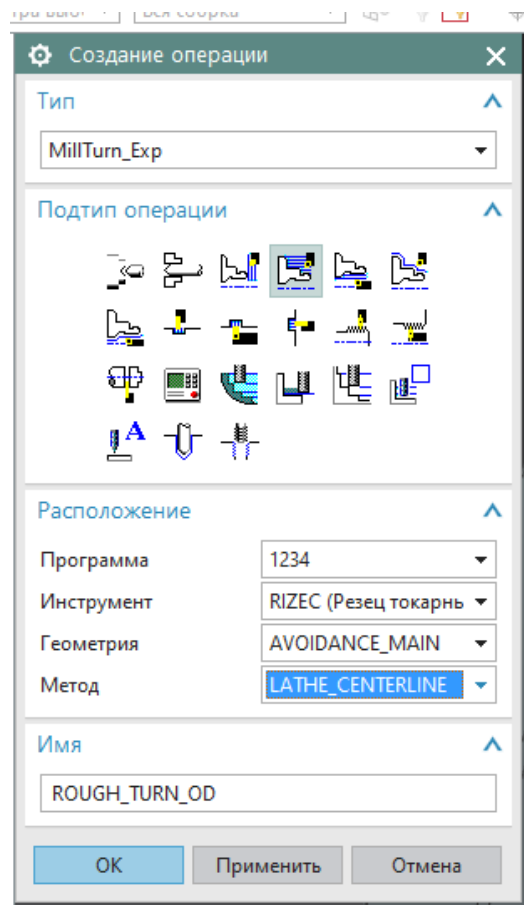


Рисунок 3.14 – Створення нової операції.

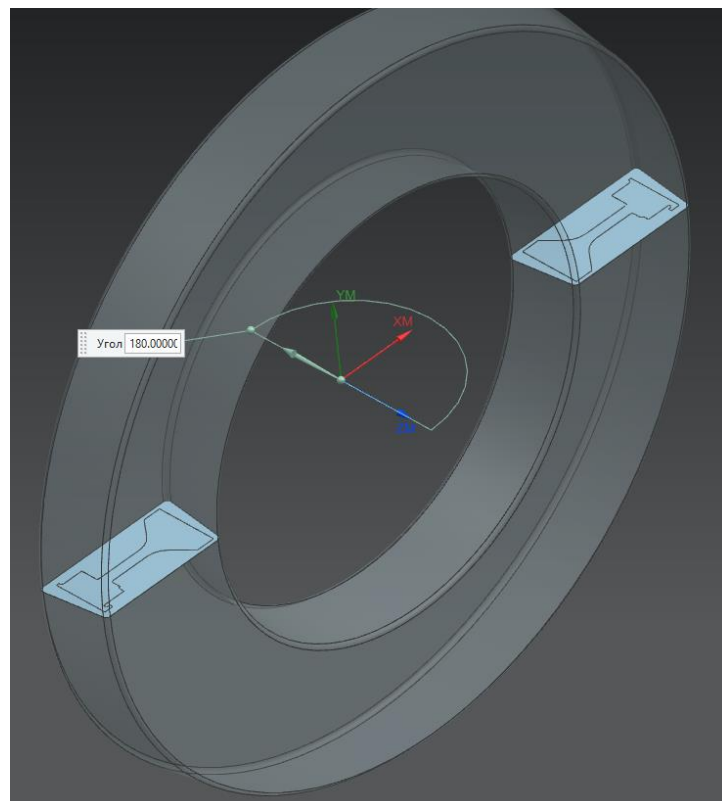


Рисунок 3.15 – Автоматично створені 2D контури деталі і заготівки.

Далі призначаємо границі обробки (рис. 3.16), в меню «Параметри різання» залишаємо припуск на чистову обробку в 0,4 мм (рис.3.17, а), в розділі «Налаштування траєкторії» налаштовуємо кількість проходів – 2 (рис. 3.17, б), а також налаштовуємо режими різання, які були розраховані в пункті 3.6 (рис. 3.18)

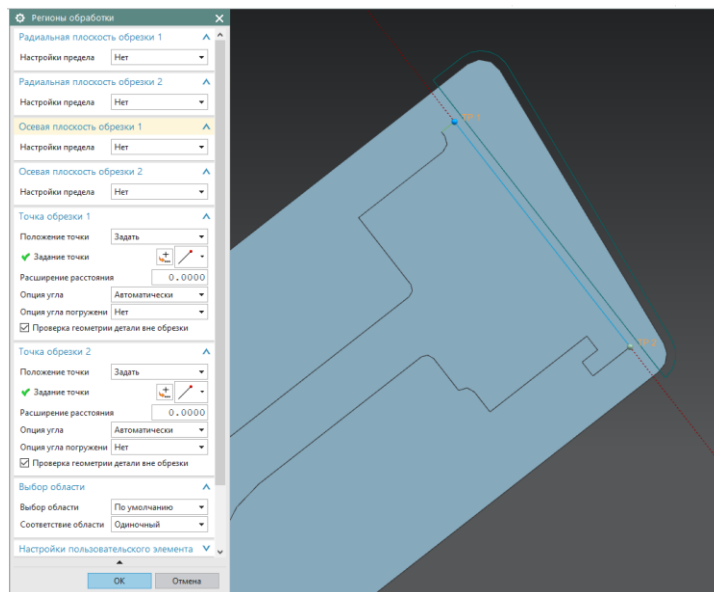
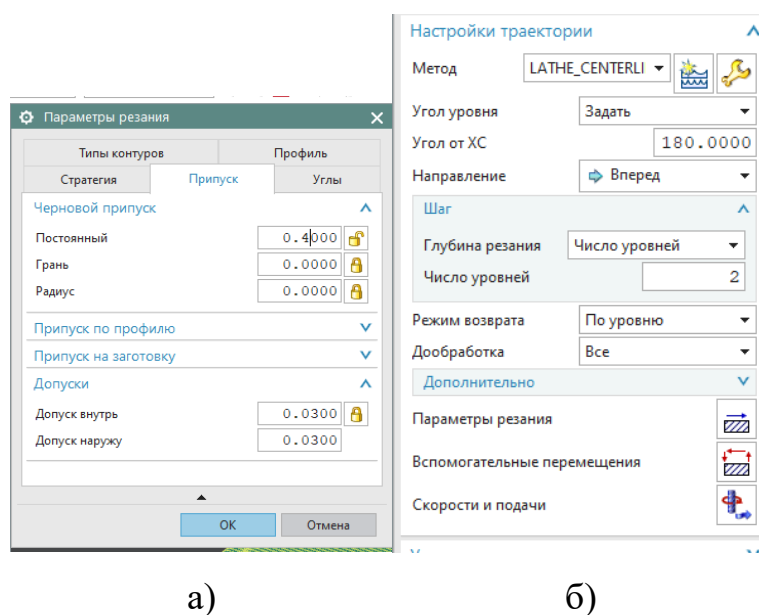


Рисунок 3.16 – Призначення границь обробки.



а)

б)

Рисунок 3.17 – Меню: а – параметрів різання; б – налаштувань траєкторії.

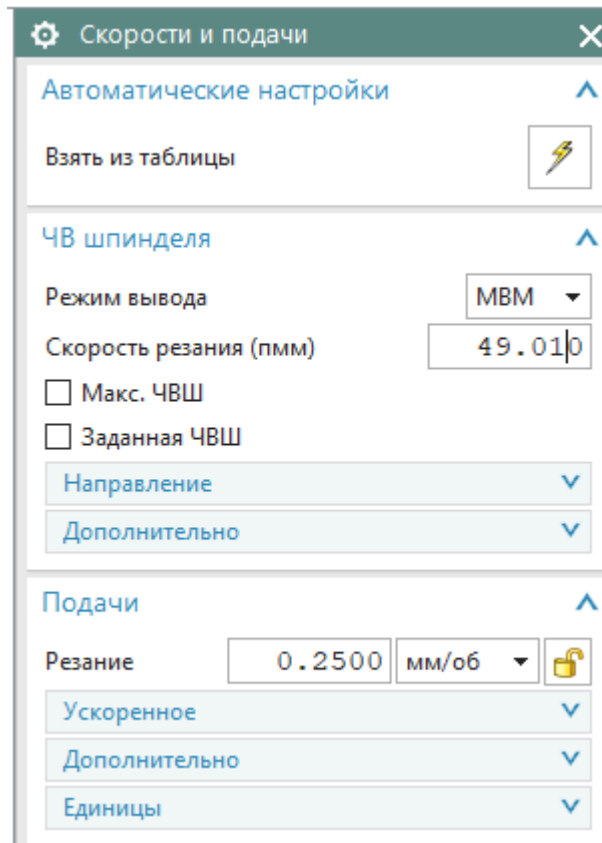


Рисунок 3.18 – Налаштування режимів різання

Тепер, зробивши всі необхідні налаштування генеруємо траєкторію обробки (рис.3.19).

Програма першого переходу операції 015 Токарної з ЧПК готова. Тепер приступаємо до другого переходу – підрізки торця. Обравши в меню операції підтип «Підрізка торцю» (рис.3.20) робимо всі ті ж дії (рис. 3.21-3.24).

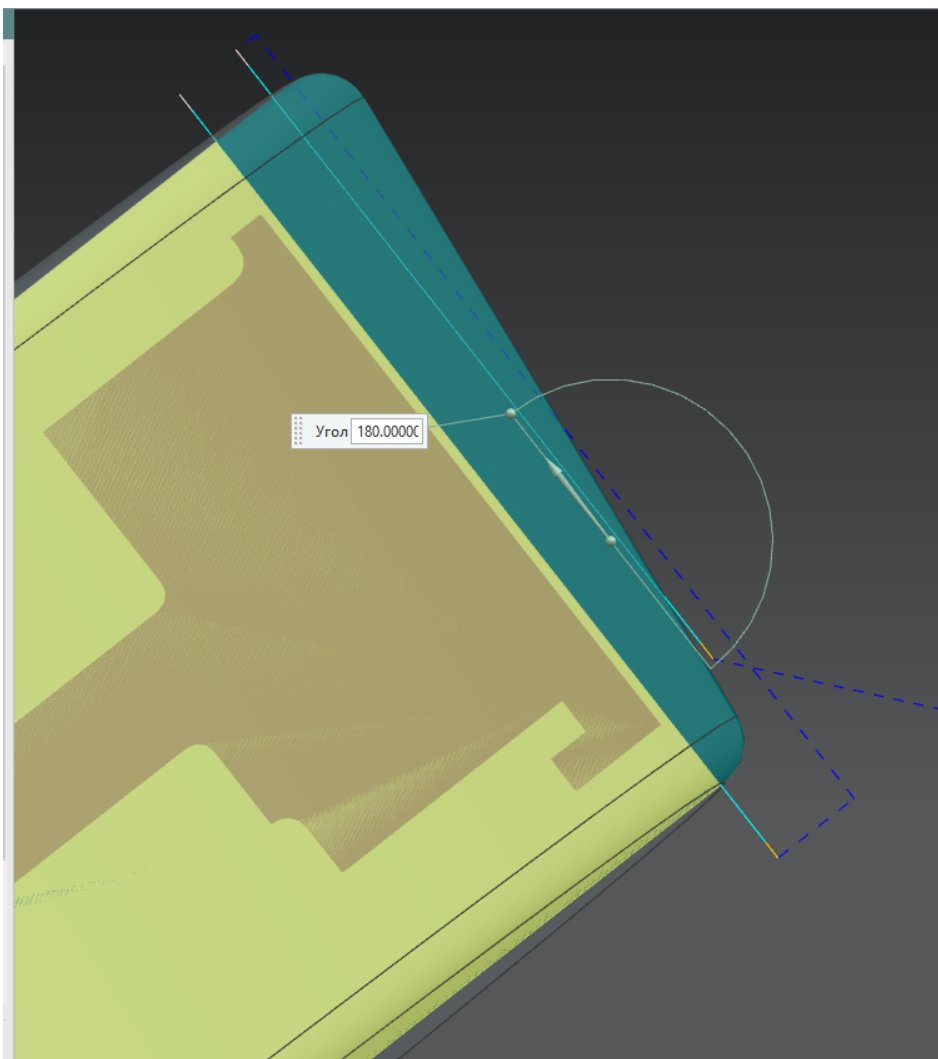


Рисунок 3.19 – Траекторія руху інструмента на першому переході.

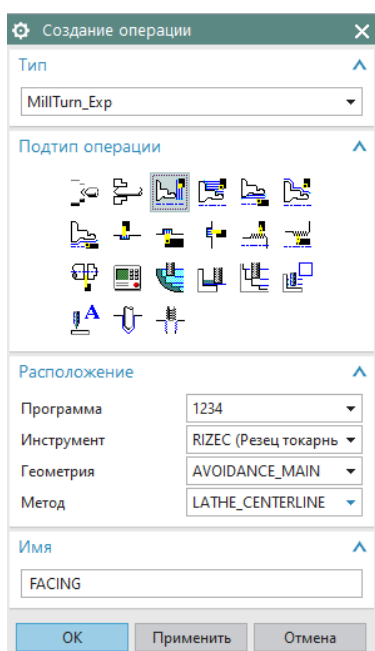


Рисунок 3.20 – Створення нової операції обробки торцю

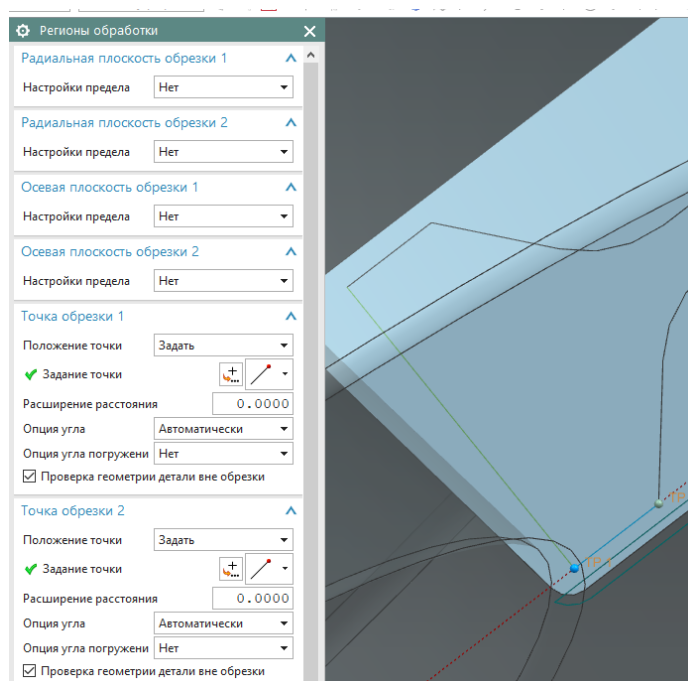


Рисунок 3.21 – Налаштування границь обробки

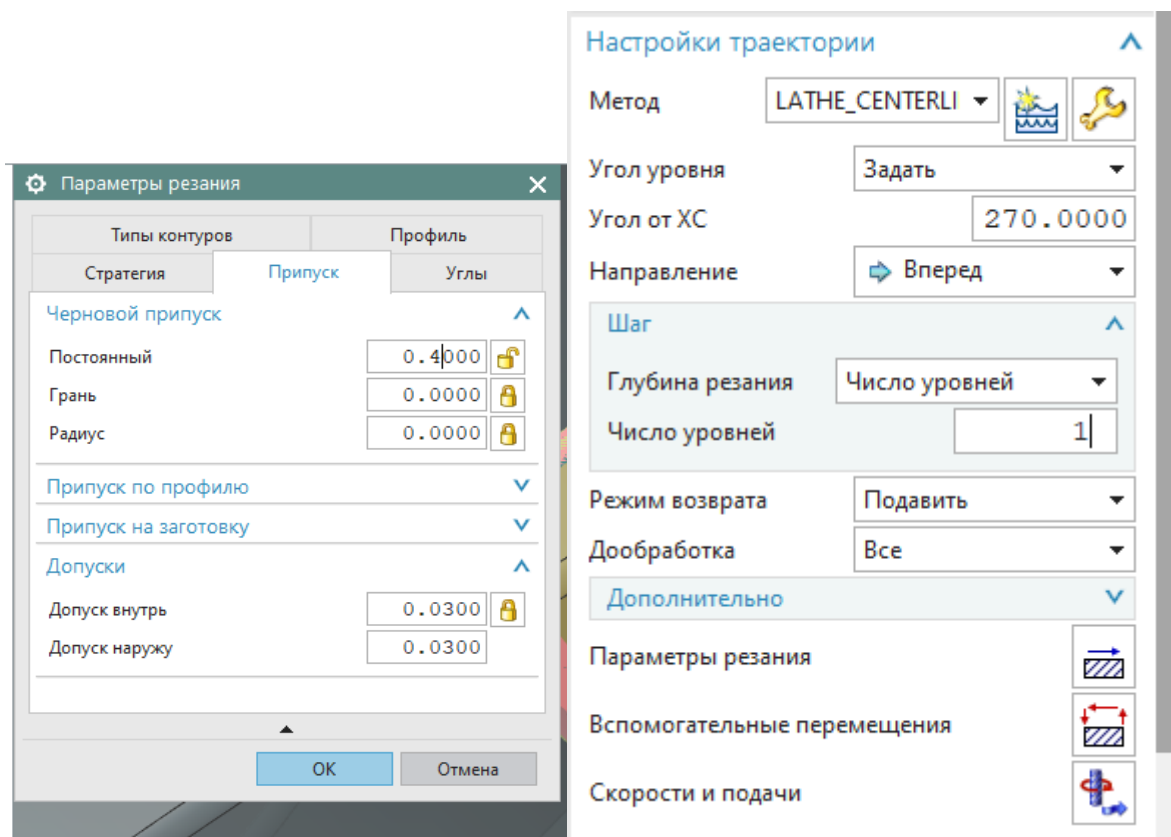


Рисунок 3.22 – Меню налаштувань параметрів різання і кількості проходів

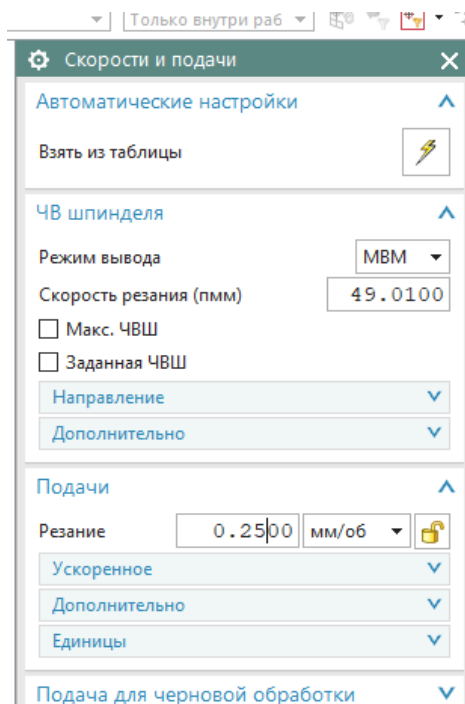


Рисунок 3.23 – Налаштування режимів різання

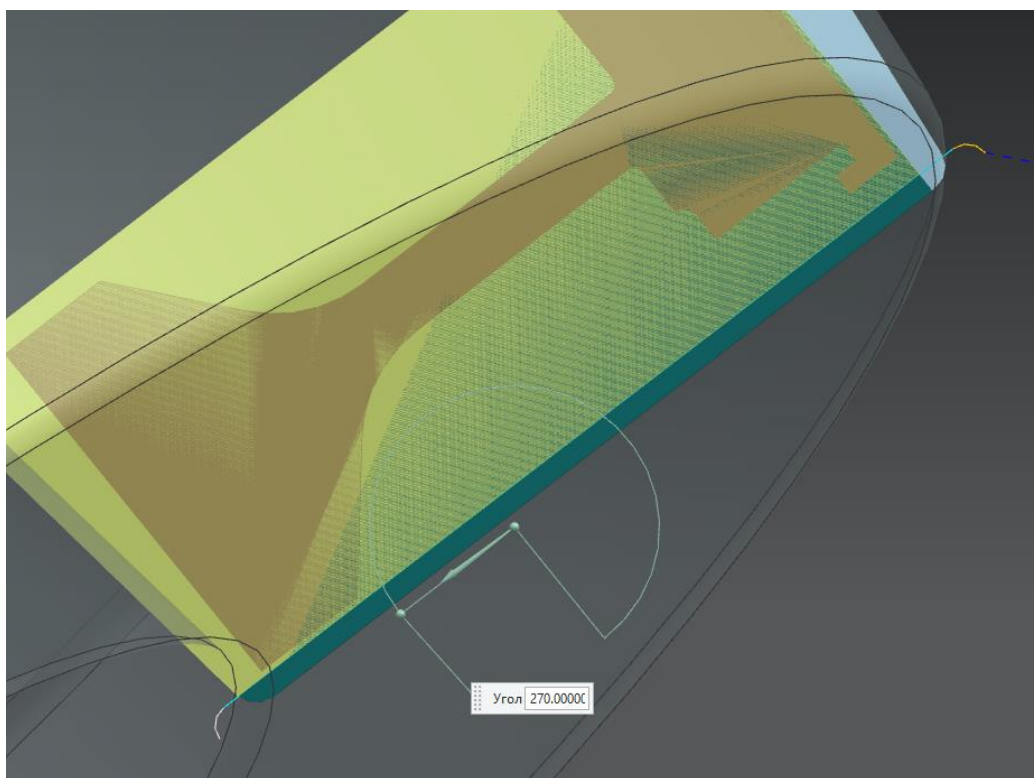


Рисунок 3.24 – Траектория ruchu інструмента

Тепер, аби впевнитись що ми зробили все правильно, можна перевірити траекторію змодельовавши обробку із видаленням матеріалу в 3D. На рисунку

3.25 можна побачити моделювання виконання першого переходу із блоком команд.

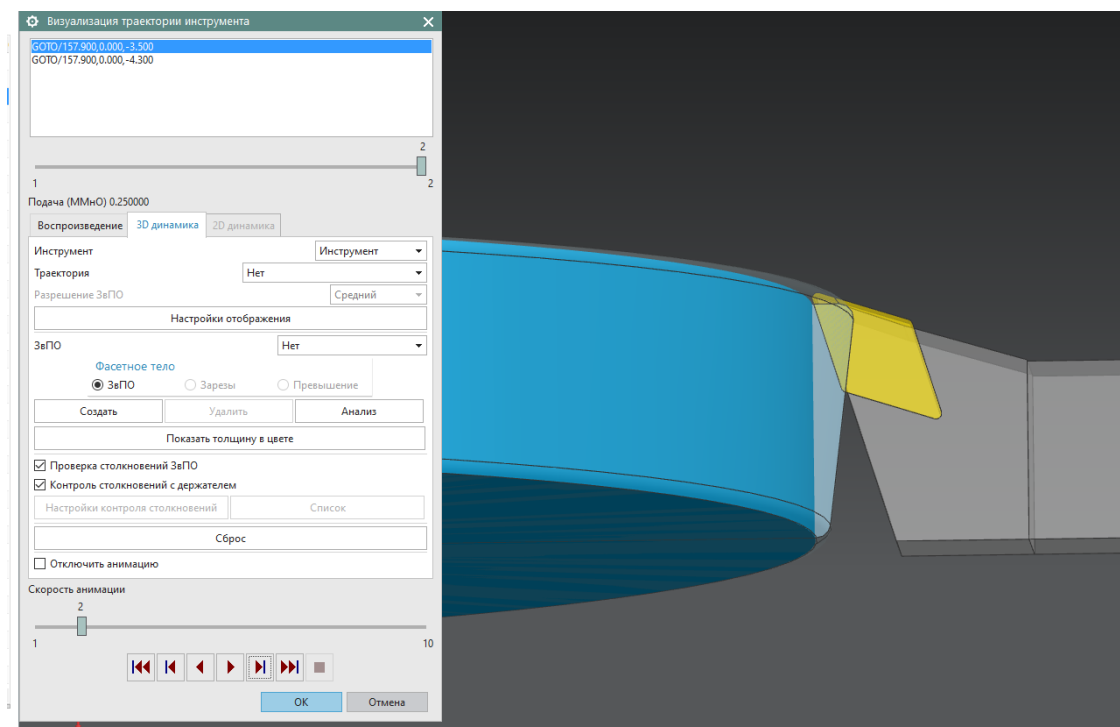


Рисунок 3.25 – Моделювання обробки, перший перехід

На рисунку 3.26 можна побачити моделювання виконання другого переходу – підрізки торцю із видаленням матеріалу і також блоком команд.

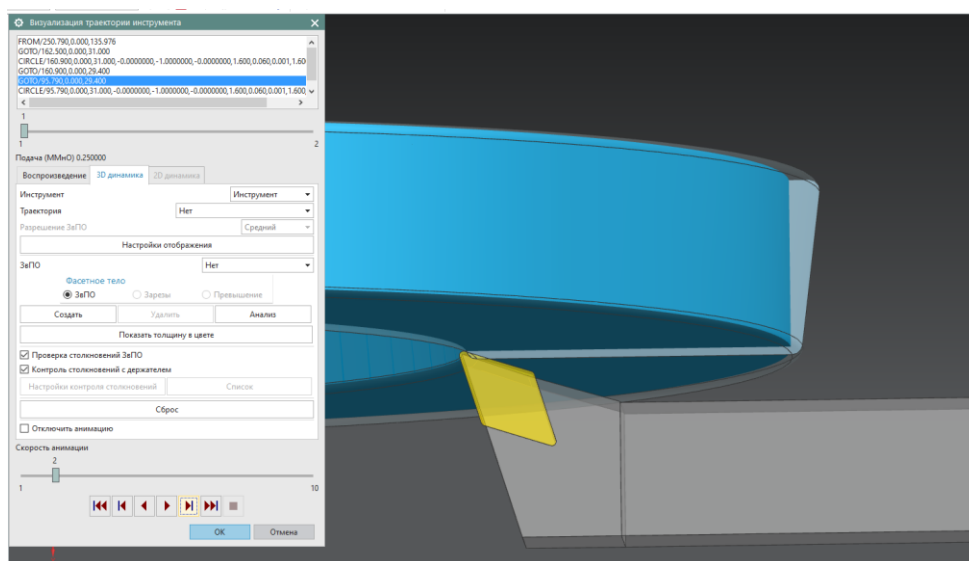
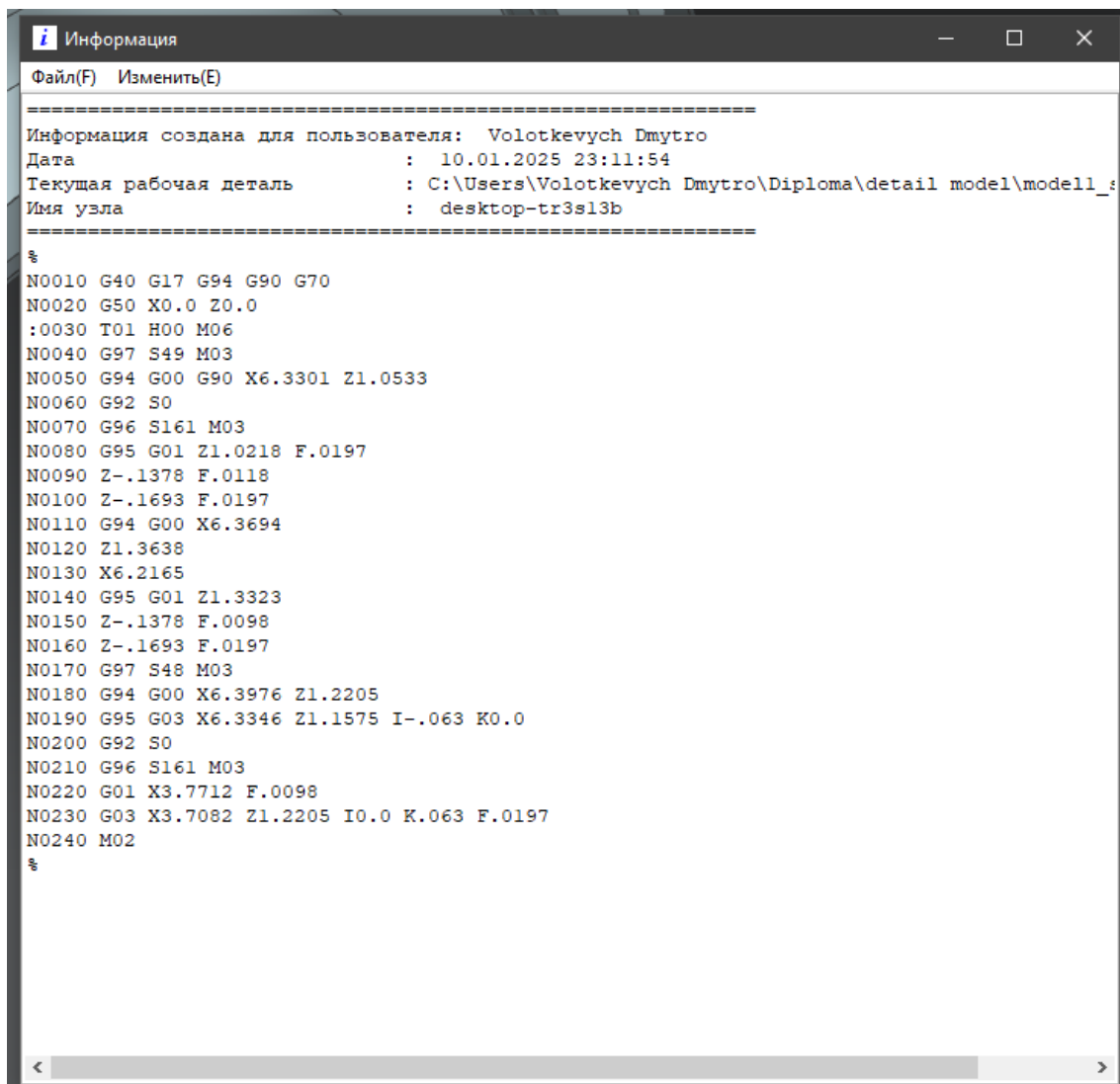


Рисунок 3.26 – Моделювання обробки, другий перехід

Впевнившись в правильності траєкторії руху використовуючи функцію «Постпроцесувати» остаточно завершуємо розробку та отримуємо код керуючої програми (рис. 3.27)



```
Информация
=====
Информация создана для пользователя:  Volotkevych Dmytro
Дата                               :  10.01.2025 23:11:54
Текущая рабочая деталь              :  C:\Users\Volotkevych Dmytro\Diploma\detail model\model1_s
Имя узла                            :  desktop-tr3s13b
=====
%
N0010 G40 G17 G94 G90 G70
N0020 G50 X0.0 Z0.0
:0030 T01 H00 M06
N0040 G97 S49 M03
N0050 G94 G00 G90 X6.3301 Z1.0533
N0060 G92 S0
N0070 G96 S161 M03
N0080 G95 G01 Z1.0218 F.0197
N0090 Z-.1378 F.0118
N0100 Z-.1693 F.0197
N0110 G94 G00 X6.3694
N0120 Z1.3638
N0130 X6.2165
N0140 G95 G01 Z1.3323
N0150 Z-.1378 F.0098
N0160 Z-.1693 F.0197
N0170 G97 S48 M03
N0180 G94 G00 X6.3976 Z1.2205
N0190 G95 G03 X6.3346 Z1.1575 I-.063 K0.0
N0200 G92 S0
N0210 G96 S161 M03
N0220 G01 X3.7712 F.0098
N0230 G03 X3.7082 Z1.2205 I0.0 K.063 F.0197
N0240 M02
%
```

Рисунок 3.27 – Керуюча програма обробки для операції 015 Токарної з ЧПК

4 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1 Проектування робочого пристосування

4.1.1 Конструкція та принцип дії пристосування

Пристосування розроблено для виконання технологічних операцій, зокрема свердління 16 отворів діаметром $\varnothing 6,5^{+0,015}$ та обробки шести отворів діаметром $\varnothing 6^{+0,03}$. Конструкція пристосування представлена на рисунку 4.1. У його склад входить поршневий гідроциліндр або пневмоциліндр, завдяки чому процес закріплення та розкріплення деталей здійснюється автоматично, із застосуванням вузлів подачі та відведення робочої рідини чи газу.

Принцип роботи пристосування ґрунтується на наступних етапах. На початку пристосування фіксують на робочому столі верстата за допомогою болтів 9, базуючи його на фіксуючий палець 8. Потім у пристрій встановлюють оброблювану деталь — «Диск 0 ступені КВТ». Для її закріплення використовують швидкоз'ємну шайбу (6), що забезпечує точне базування деталі на планшайбі з базовим діаметром $\varnothing 199g6(-0,015_{-0,044})$, утворюючи в свою чергу посадку з зазором.

Закріплення деталі відбувається наступним чином: у штокову порожнину пневмо- або гідроциліндра 1 подається робоча рідина чи газ, внаслідок чого шток 4 разом із поршнем 11 переміщуються вниз. Це викликає притискання деталі верхньою плитою 5, забезпечуючи її надійну фіксацію. Завдяки такому закріпленню деталь утримується в нерухомому положенні, що унеможлиблює її провертання чи переміщення під впливом зовнішніх сил під час обробки.

Процес обробки включає свердління 32 отворів та зенкування фасок з одного боку деталі. Після цього деталь перевертають, виконуючи зенкування 16 фасок та розгортання усіх 32 отворів.

По завершенні обробки робоча рідина подається у безштокову порожнину пневмо- чи гідроциліндра, що призводить до підйому штока 4 та поршня 11

вгору. Верхня плита звільняє деталь, дозволяючи легко зняти оброблений виріб із пристосування, після чого пристосування готове до повторного використання.

Специфікація пристрою надається у Додатку А.

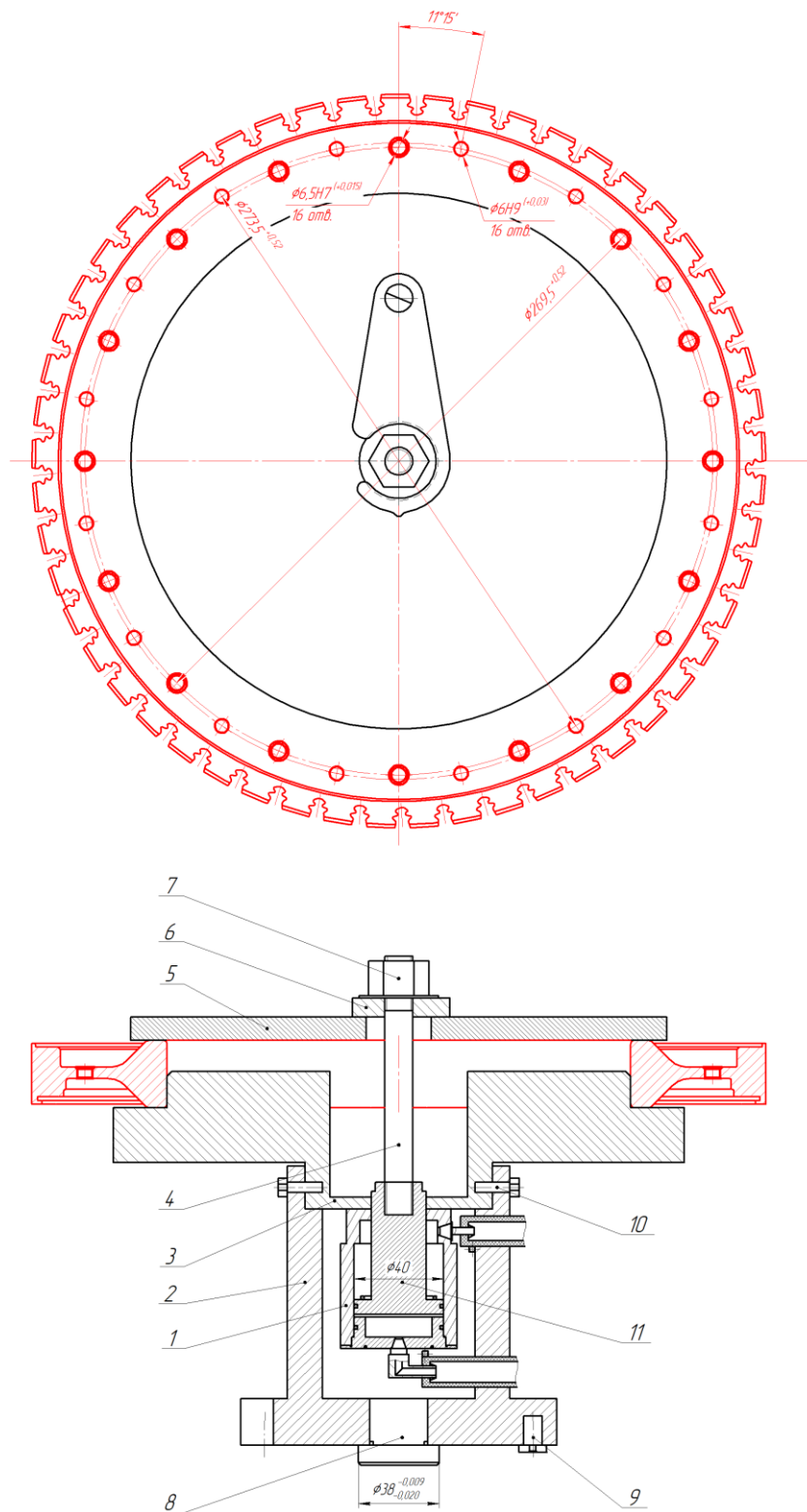


Рисунок 4.1 – Ескіз пристосування

4.1.2 Визначення похибки базування та закріплення. Розрахунок пристосування на точність

Аналіз похибок базування та закріплення проводиться для визначення оптимального конструктивного рішення пристосування та вибору ефективної схеми встановлення деталі. Цей процес також спрямований на перевірку забезпечення необхідного рівня точності обробки, яка здійснюватиметься з використанням даного пристосування [38, с. 51].

Основним завданням спроектованого пристрою є забезпечення точного розміру $\varnothing 273,5^{+0,52}$ — діаметру осі отворів $\varnothing 6,5^{+0,015}$, а також розміру $\varnothing 269,5^{+0,52}$ — діаметру осі отворів $\varnothing 6^{+0,03}$. Для досягнення цих параметрів необхідно провести детальний розрахунок похибок, які виникають у процесі базування та закріплення деталі.

Похибка базування та закріплення є складовою частиною загальної похибки встановлення деталі. Вона відображає точність встановлення в цілому і відіграє ключову роль у забезпеченні точності всієї технологічної операції. Визначення цієї похибки є важливим етапом, необхідним для подальшого розрахунку точності роботи пристосування.

Схема базування представлена на рисунку 4.1. Розрахунок похибки базування [38, с. 30] виконується за формулою (4.1):

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_{61} + \varepsilon_{62}, \quad (4.1)$$

де ε_{61} — похибка базування, що при базуванні на палець дорівнює максимальному зазору [38, с.37], і розраховується за формулою (4.2):

$$\varepsilon_{61} = D_{max} - d_{min}, \quad (4.2)$$

де $D_{max} = 199,115$ мм — максимальній діаметр отвору;

$d_{min} = 198,956$ мм — мінімальний діаметр отвору.

$$\varepsilon_{61} = 199,115 - 198,956 = 0,159 \text{ мм}$$

ε_{62} – похибка що дорівнює допуску на висоту отворів, але так як отвори наскрізні $\varepsilon_{62} = 0$.

Звідси, можемо розрахувати похибку базування за формулою (4.1):

$$\varepsilon_6 = 0,159 + 0 = 0,159$$

Визначивши похибку базування, можна виконати розрахунок похибки встановлення [38, с.30] за формулою (4.3):

$$\varepsilon_{\text{вст}} = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2}, \quad (4.3)$$

$\varepsilon_3 = 0,035$ – похибка закріплення, мм [38, с.50, т.4.7].

Проводимо розрахунок похибки встановлення за формулою (4.3):

$$\varepsilon_{\text{вст}} = \sqrt{0,159^2 + 0,035^2} = 0,162 \text{ мм}$$

Правильність вибору схеми базування покаже перевірочний розрахунок, суть якого полягає в тому, що третина допуску на необхідний розмір повинна бути більша за похибку встановлення. А отже:

$$0,162 \leq \frac{1}{3} \cdot 0,52$$

$$0,162 < 0,173$$

Перевірка довела, що обрана схема встановлення забезпечує необхідну точність.

На точність пристосувань для фрезерних або свердлильних вказує забезпечення виконавчого розміру розмір L_k на установ (рис. 4.2).

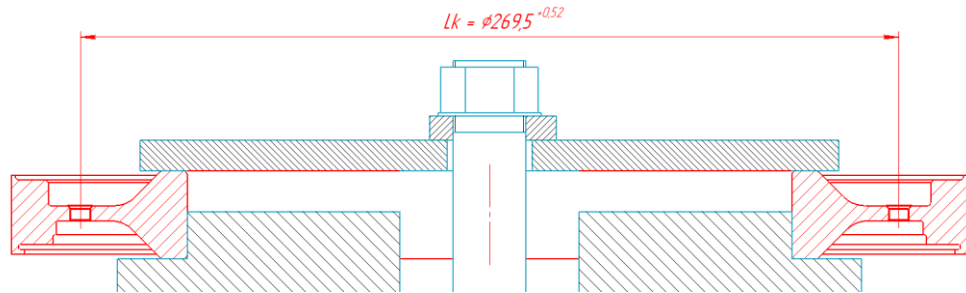


Рисунок 4.2 – Позначення розміру L_k

Перед проведенням розрахунків точності пристосування слід зазначити, що обробка виконується на обладнанні з ЧПК, і основна частина похибок зумовлена точністю роботи верстата. Для визначення точності пристосування необхідно обчислити допуск для визначення виконавчого розміру L_k . Допуск розраховується за такою формулою [38, с.90]:

$$T_{L_k} \leq T_d - k \cdot \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}, \quad (4.4)$$

де $T_{L_k} = \frac{1}{3} T_d = \frac{1}{3} \cdot 0,52 = 0,173$ – допуск на розмір L_k [11, с.96];

$T_d = 0,52$ – допуск розміру, який необхідно забезпечити;

k – коефіцієнт, який враховує відхилення складових величин від нормального розподілу та залежить від кількості компонентів похибки [38, с.90]. Прийmemo значення цього коефіцієнта $k = 1,2$.

$\Delta_1 = 0,01$ – похибка позиціювання на верстаті [39];

$\Delta_2 = 0,08$ – похибка на виготовлення інструмента по ГОСТ 2034-80;

$\Delta_3 = 0,024$ – похибка на зношування інструмента [38, с.89, т.5.19].

Розраховуємо допуск на розмір L_k за формулою (4.4):

$$0,173 \leq 0,52 - 1,2 \cdot \sqrt{0,159^2 + 0,035^2 + 0,001^2 + 0,08^2 + 0,024^2}$$

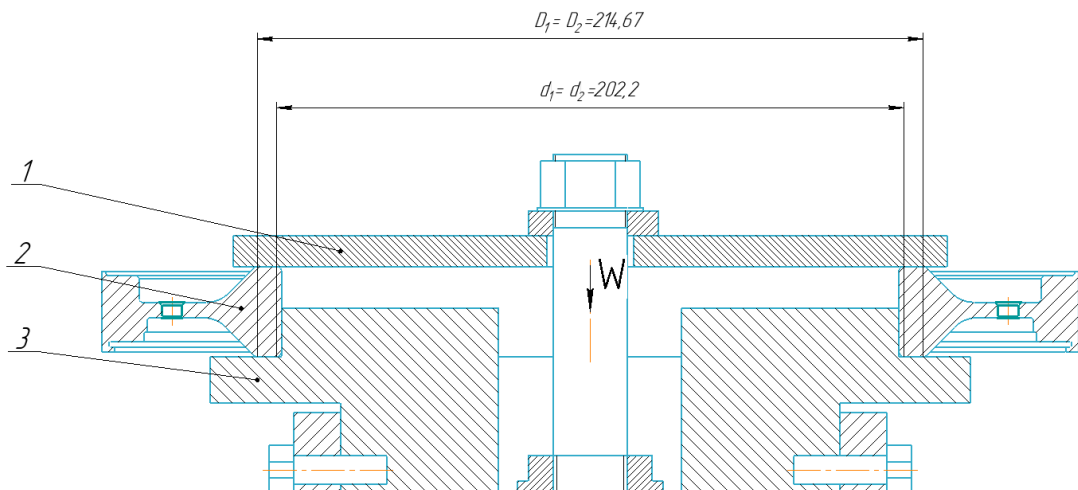
$$0,173 \leq 0,52 - 0,219$$

$$0,173 \text{ мм} < 0,301 \text{ мм}$$

Пристосування достатньо точне для даної операції, і це доведено розрахунками.

4.1.3 Визначення необхідної сили затиску. Вибір приводу

Деталь «Диск 0 ступені КВТ» що встановлюється на палець потрібно обробити, а саме просвердли 16 отворів $\text{Ø}6,5$ мм та 16 отворів $\text{Ø}6$ мм. Схема закріплення деталі можна побачити на рисунку 4.3.



1 – верхня затискна плита; 2 – деталь; 3 – нижня опорна плита.

Рисунок 4.3 – Схема закріплення

У цій схемі не враховано вплив осьової сили, яка виникає під час свердління або фрезерування. Це пояснюється тим, що в момент виходу свердла або фрези з металу безпосередньо осьова сила різко зменшується, а зміна моменту різання

є менш значною. Під дією прикладених сил та моментів деталей притискається до двома опорними поверхнями, забезпечуючи її фіксацію. Проте момент різання, що виникає під час обробки, створює зусилля, спрямоване на провертання деталі у напрямку обертання свердла або фрези.

Для забезпечення необхідного рівня затискного зусилля у спроектованому пристрої було обрано гідропривід. Це рішення пояснюється його компактними розмірами при здатності створювати велику силу затиску, що є важливим для надійного утримання деталі під час обробки.

Базування деталі у пристосуванні виконується по внутрішньому діаметру на фіксуєчий палець, що забезпечує точне позиціонування. Для оцінки надійності конструкції та визначення запасу міцності використовується коефіцієнт запасу, який розраховується за формулою, наведеною у джерелі [38, с. 100].

$$k = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6, \quad (4.5)$$

де $k_0 = 1,5$ – коефіцієнт гарантованого запасу [38, с.100];

$k_1 = 1,0$ – коефіцієнт, що залежить від рівномірності припуску [38, с.100];

$k_2 = 2,0$ – коефіцієнт, що враховує вплив виду обробки на матеріал деталі з урахуванням на те що матеріал деталі ВТ8 [38, с.100];

$k_3 = 1,0$ – коефіцієнт, що враховує безперервність обробки [38, с.101];

$k_4 = 1,0$ – коефіцієнт, який залежить від виду приводу [38, с.102];

$k_5 = 1,0$ – коефіцієнт, що враховує використання ручних зажимів [38, с.102];

$k_6 = 1,5$ – коефіцієнт, що залежить від виду опорних поверхонь [38, с.102].

Розраховуємо коефіцієнт запасу за формулою (4.5):

$$k = 1,5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 = 4,5$$

Формула сили затиску W , H для обраної схеми базування та закріплення визначається по формулі [38, с.112]:

$$W = \frac{3M_p}{2f \left(\frac{(D^3 + d^3)}{(D^2 + d^2)} \right)}, \quad (4.6)$$

де $f = 0,3 \dots 0,6 = 0,45$ – коефіцієнт тертя сталі об титан [40];

$D = 0,21467$ м – максимальний діаметр контакту з опорами;

$d = 0,2022$ м – мінімальний діаметр контакту з опорами;

$M_p = 26,95$ Н·м – максимальний одночасний момент різання на цій операції.

$$W = \frac{3 \cdot 26,95}{0,45 \cdot 2 \cdot \left(\frac{(0,21467^3 - 0,2022^3)}{(0,21467^2 - 0,2022^2)} \right)} = 287,24 \text{ Н}$$

Звідси, дійсна сила затиску розраховується по формулі:

$$W_d = k \cdot W$$

$$W_d = 4,5 \cdot 287,4 = 1293,3 \text{ Н}$$

В даній схемі закріплення між точкою затиску та гідроциліндром немає достатньої кількості ланок щоб впливати на силу затиску, а значить що сила на штоку Q дорівнює силі затиску W_d . А отже:

$$Q = W_d$$

$$Q = 1293,3 \text{ Н}$$

Знайти необхідний діаметр гідроциліндра [38, с.149] за формулою можна за формулою:

$$D_{цр} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\rho \cdot \mu}}, \quad (4.10)$$

де $\rho = 2 \dots 5$ Мпа – тиск робочої рідини гідроциліндра, приймаємо $\rho = 5$ МПа [41, с.14];

$\mu = 0,46 \dots 0,9 = 0,6$ – механічний хід гідроциліндра [38, с.150].

Розраховуємо діаметр гідроциліндра за формулою (4.10):

$$D_{\text{цр}} = 1,13 \sqrt{\frac{1293,3}{2 \cdot 0,6}} = 37,09 \text{ мм}$$

Корегуємо значення діаметру гідроциліндра до стандартного $D = 40$ мм за ГОСТ 6440-68.

4.2 Проектування контрольного пристосування

4.2.1 Конструкція і принцип дії контрольного пристосування

Контрольне пристосування (рис. 4.4) спроектовано для контролю наступних параметрів деталі:

- 1) Радіального биття циліндричної поверхні $\text{Ø}290,5\text{H}7^{(+0,052)}$ в $0,16$
- 2) Перпендикулярності циліндричної поверхні $\text{Ø}290,5\text{H}7^{(+0,052)}$ до бази Г в $0,02$ мм.
- 3) Допуск площинності поверхні бази Г.

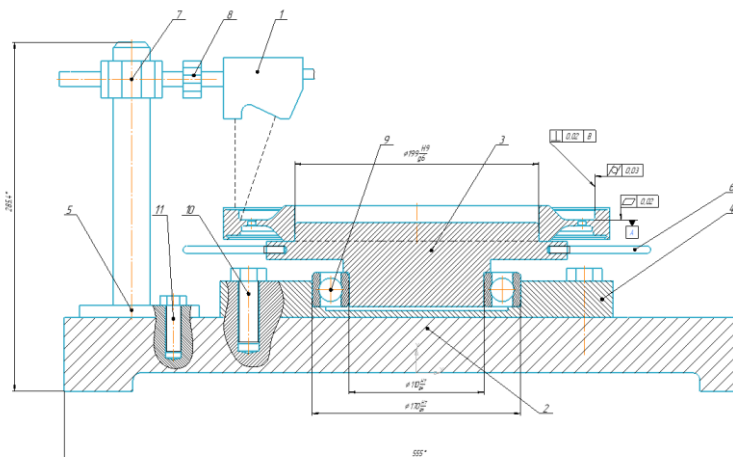


Рисунок 4.6 – Ескіз контрольного пристосування.

Для цього пристосування було використано новітній лазерний профільний сенсор 1 для контролю і моделювання поверхонь «2D/3D Laser Profiler LJ-X8200» (рис. 4.5), який здатен створювати 2-D і 3-D профілі поверхні з точністю до 0,25 мкм, на відстані до 80 мм до вимірюваних поверхонь в реальному часі [42].

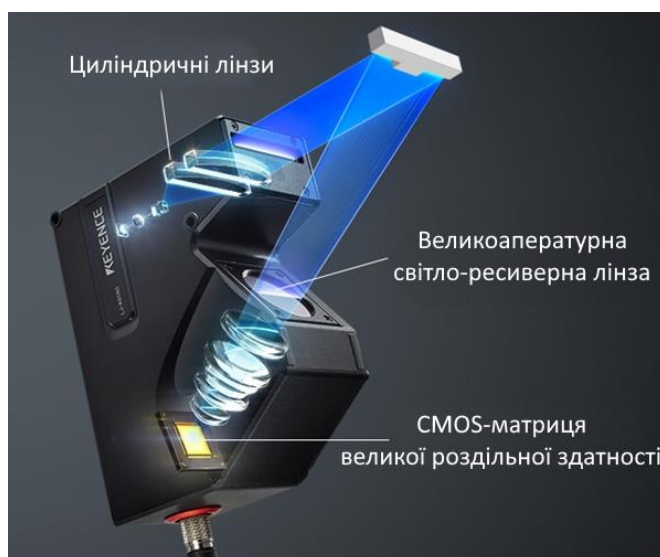


Рисунок 4.5 - Лазерний профільний сенсор для контролю і моделювання поверхонь «2D/3D Laser Profiler LJ-X8000 Series» [42]

Деталь базується і встановлюється на планшайбу із пальцем 3 утворюючи посадку з зазором $\text{Ø}199 \text{ H}9/\text{g}6$. Планшайба із пальцем в свою чергу запресована

у внутрішнє кільце підшипника 9, який за зовнішнім кільцем запресовано у платформу 4, що дає змогу обертати деталь навколо своєї осі за допомогою рукояток 6 і вимірювати всі необхідні параметри за один раз на одному пристосуванні. Сам вимірювальний пристрій на стійці 5, і його положення може регулюватися вертикально за допомогою гайки 7 і горизонтально за допомогою гайки 8.

4.2.2 Визначення похибки базування та закріплення. Розрахунок пристосування на точність.

Деталь «Диск 0 ступені КВТ» базується на палець утворюючи посадку із зазором $\text{Ø}199 \text{ H9/g6}$. Розрахунок похибки базування виконується за формулою [38, с.37]:

$$\varepsilon_6 = D_{max} - d_{min},$$

де $D_{max} = 199,115$ мм –максимальній діаметр отвору;

$d_{min} = 198,956$ мм – мінімальний діаметр отвору.

$$\varepsilon_6 = 199,115 - 198,956 = 0,159 \text{ мм}$$

Визначивши похибку базування, можна виконати розрахунок похибки встановлення за формулою [38, с.30]:

$$\varepsilon_{вст} = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2}, \quad (4.2)$$

$\varepsilon_3 = 0,035$ – похибка закріплення, мм [38, с.50, т.4.7].

Проводимо розрахунок похибки встановлення за формулою (4.2):

$$\varepsilon_{\text{вст}} = \sqrt{0,159^2 + 0,035^2} = 0,162 \text{ мм}$$

Похибка встановлення значно вище за допуски форми що контролюються, але цей момент нівелюється надвисокою точністю лазерного сенсорного пристрою «2D/3D Laser Profiler LJ-X8200», який незалежно будує 2-D і 3-D профілі поверхонь, і дозволяє правильно та якісно проконтролювати поверхні.

5 РОЗРАХУНОК ДЕТАЛІ НА МІЦНІСТЬ

Для проведення розрахунку на міцність необхідно проаналізувати умови, при яких експлуатується деталь.

Для початку створюємо 3-D модель деталі за допомогою програми моделювання NX 10 (рис. 5.1)



Рисунок 5.1 – 3-D модель деталі «Диск 0 ступені КВТ»

В розділі «Інструменти» обираємо підменю «Додатково», та створюємо нову модель кінцевих елементів (KE) (рис. 5.2).

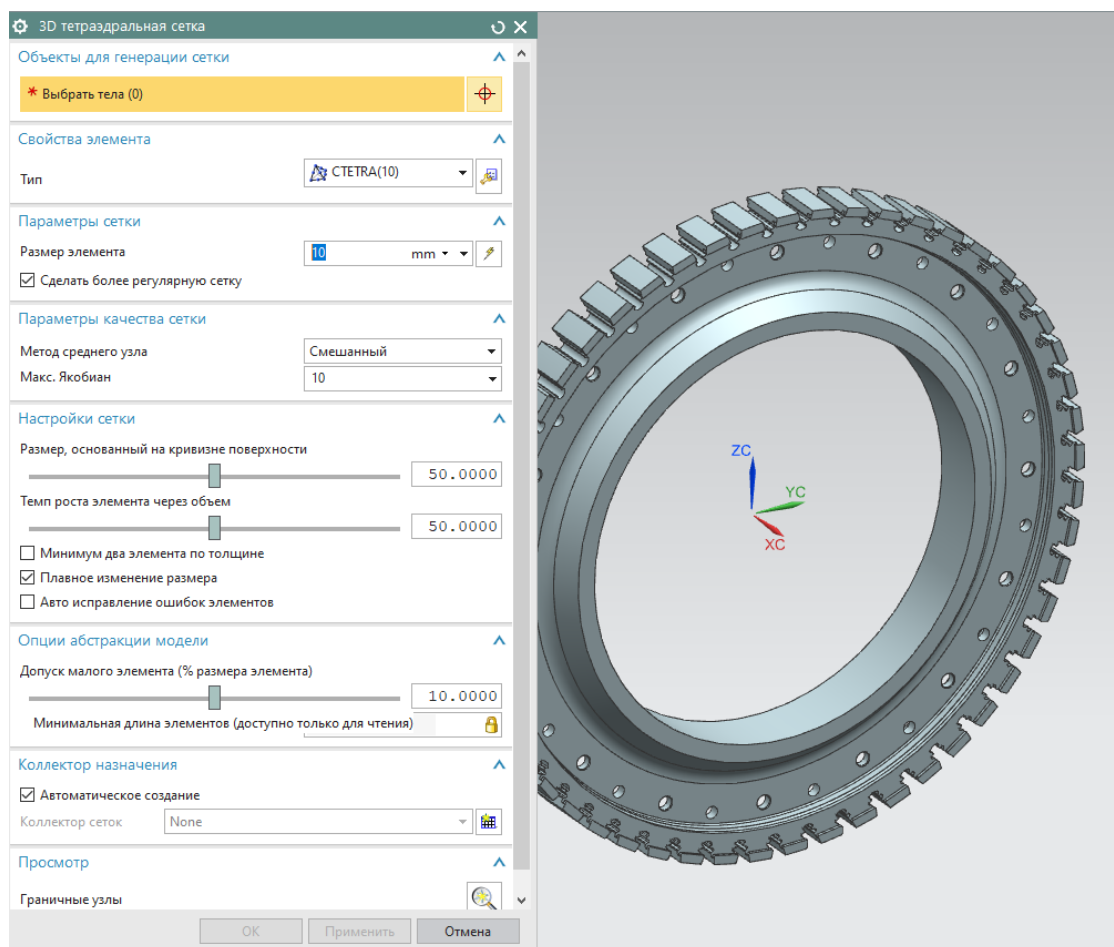


Рисунок 5.2 – Створюємо модель кінцевих елементів (KE)

Розбиваємо деталь на сітку тетрадральних кінцевих елементів (рис. 5.3). Це допоможе розрахувати міцність кожної окремої ділянки деталі під час експлуатації.

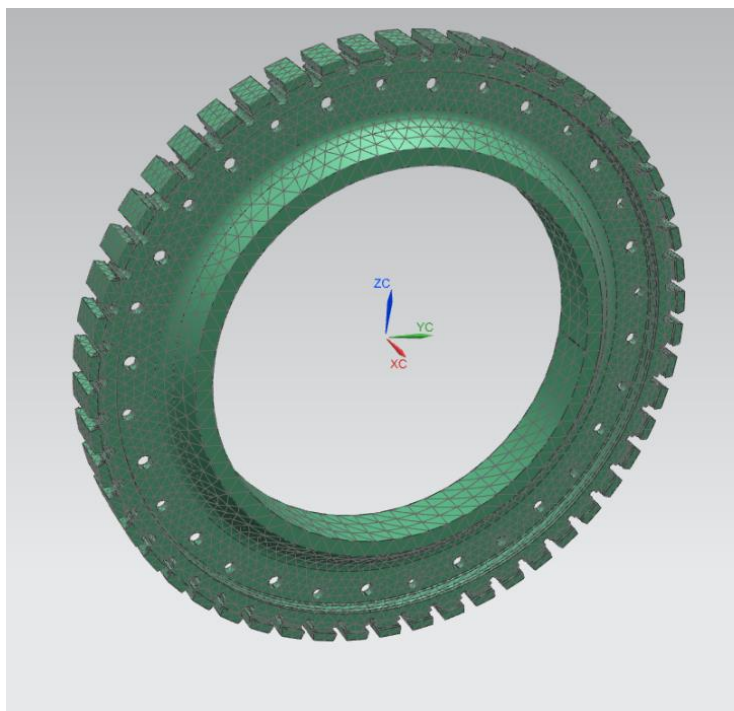


Рисунок 5.3 – Сітка кінцевих елементів деталі

Задаємо матеріал деталі, або вписуємо відповідні характеристики матеріалу ВТ8, після чого призначаємо як саме деталь буде закріплюватись під час експлуатації, та які сили витримувати (рис. 5.4)

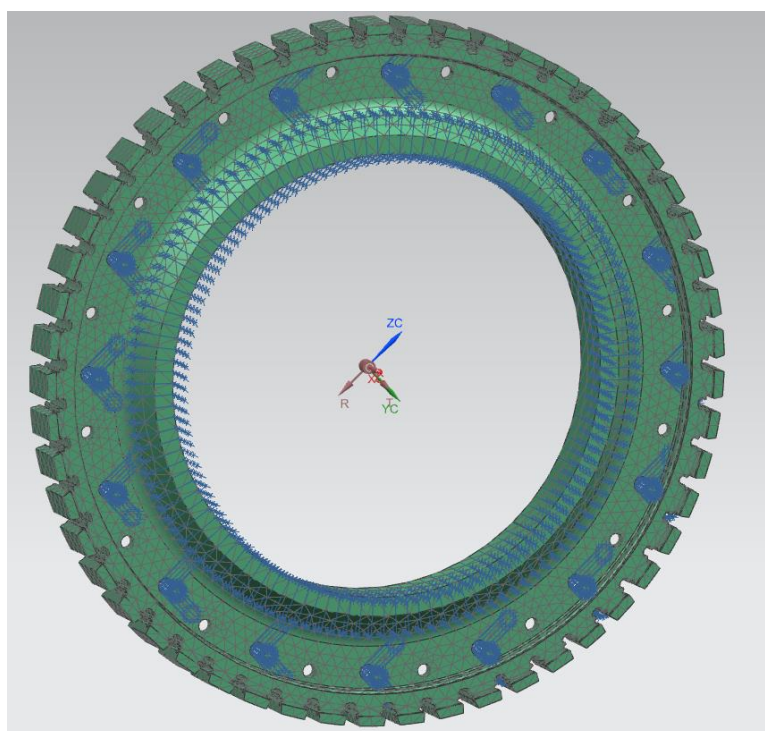


Рисунок 5.4 – Прикладення сил і схема закріплення деталі

Починаємо моделювати експлуатаційні умови, та отримуємо результат, який можна побачити на зображенні 5.5.

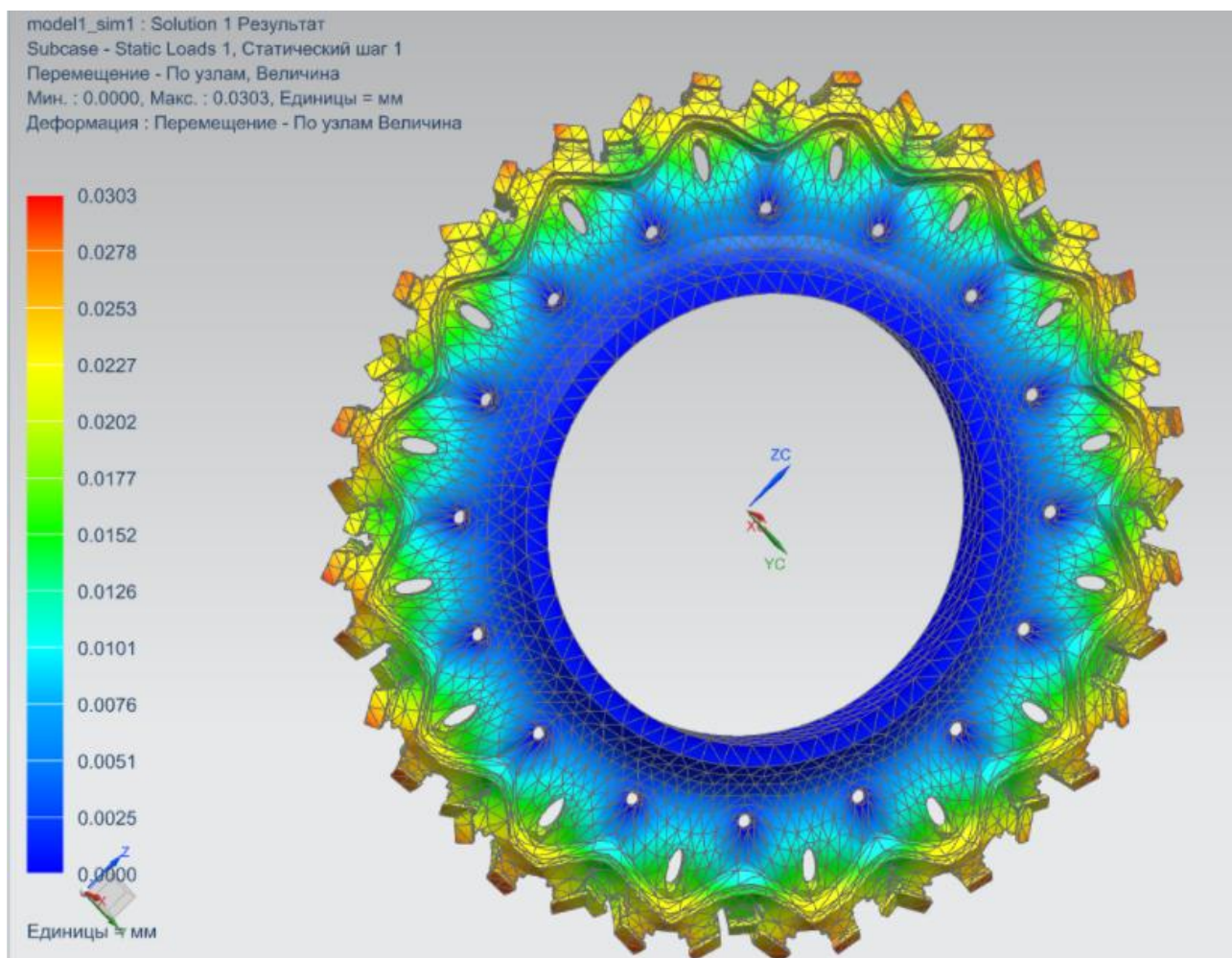


Рисунок 5.5 – Абстрактне зображення деформації під час експлуатації

Згідно отриманих за допомогою NX 10 результатів, можна дійти до висновку, що обраний матеріал і конструкція деталі виконує свої функції без значних деформації під час експлуатації.

6 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ АБО ЗАХОДІВ

Для обробки 53 пазів Д було запропоновано новий технологічний процес (ТП) із заміною фрезерної операції на дротяну електроерозійну. Через високу складність профілю обробляемого пазу фрезерна операція при старому ТП виконувалась на 5-ти осьовому фрезерному верстаті з ЧПК DMG MORI DMU 50-ID15502. При обробці пазів таким способом, через специфіку пазу, а саме його малих розмірів трудомісткість виготовлення однієї деталі складає $T_1 = 9,275 \text{ год} = 556,5 \text{ хв}$.

Другий варіант ТП розроблений з використанням новітнього електроерозійного дротяного обладнання, яке добре підходить для обробки міцних електропровідних металів. А особливість дротяної електроерозійної обробки дозволяє обробку кількох деталей одночасно. Враховуючи загальну товщину деталей оптимальною кількістю деталей для одночасної обробки, є 5 шт. Високоякісні дроти в купі із новітнім обладнанням, дозволяють отримати необхідні розміри з точністю до $\pm 0,002 \text{ мм}$ і шорсткістю до $Ra0,25$ [43] із достатньо великою швидкістю до 1 мм/хв , навіть для деталей великої товщини. Але враховуючи необхідні параметри, така висока точність і якість не потрібна, тому обробку можна провести за 1 прохід з більшою швидкістю, що дуже скорочує загальний час обробки. Окрім того, такого роду верстати потребують менш кваліфікований персонал, завдяки наявності майже повної автоматики, простоти експлуатації і заміни котушки. Враховуючи все це, згідно розрахункам трудомісткість виготовлення однієї деталі складає $T_2 = 5,3 \text{ год} = 318,41 \text{ хв}$.

Тож, заносимо всі необхідні дані до таблиці 6.1.

Дійсний річний фонд часу при двох змінах роботу обладнання $F_d = 4176$ [44]. За вихідними даними, які вказані в таблиці 6.1, визначаємо найбільш економічно вигідний варіант механічної і електрофізичної обробки деталей за

технологічною собівартістю для випадку, коли обидва верстати є на підприємстві.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

Розрахункові параметри	Варіанти технологічного процесу	
	Перший ТП	Другий ТП
Річна програма випуску деталей, Np	5000	5000
Модель верстата	DMG MORI DMU 50- ID15502	AGIE AGIECUT PROGRESS V 3-ID16029
Штучний час, Тшт, хв	556.5	318.41
Розряд верстатника	4	3
Розряд наладчика	-	-
Число верстатів що обслуговуються за зміну: Верстатником чи наладчиком Р	2	5
Тарифна ставка основного робітника, грн/год	57.5 [45, с.30]	51.7 [45, с.30]
Число змін	2	2
Оптова ціна верстата F, грн	5166000 [46]	2730000 [47]
Число верстатів	1	1
Сервісний термін обслуговування верстата n, років	15	15
Норма амортизаційних відрахувань Na, %	5	5
Встановлена потужність електродвигунів N, кВт	14	6

Для початку розрахунку технологічної собівартості поелементним методом, необхідно попередньо визначити тип виробництва, кількістю верстатів на кожну операцію, кількість робочих місць, та фактичний коефіцієнт завантаження верстата. Спочатку розраховуємо кількість обладнання C_p [45, с.10] за формулою (6.1):

$$C_p = \frac{t_{шт-ki} \cdot N}{F_d \cdot k_B \cdot k_3 \cdot 60}, \quad (6.1)$$

де $t_{шт-ki}$ - штучно калькуляційний час, хв, операції виготовлення штучної деталі;

N – річна програма випуску;

F_d – дійсний фонд часу роботи обладнання, год;

$k_B = 1,15$ – коефіцієнт використання норм часу;

k_3 – коефіцієнт завантаження обладнання.

Для обох ТП коефіцієнт завантаження обладнання можна прийняти по середнім значенням $k_3 = 0,83$. Штучно калькуляційний час для першого ТП $t_{шт-ki1} = 615,15$ хв, для другого – $t_{шт-ki1} = 353,251$ хв. Тож, розраховуємо кількість обладнання для першого і другого ТП за формулою (6.1):

$$C_{p1} = \frac{615,15 \cdot 5000}{4176 \cdot 0,83 \cdot 1,15 \cdot 60} = 12,86$$

$$C_{p2} = \frac{353,251 \cdot 5000}{4176 \cdot 0,83 \cdot 1,15 \cdot 60} = 7,38$$

Приймаємо кількість обладнання для першого ТП $C_{пр1} = 13$, для другого $C_{пр2} = 8$. Так як обладнання універсальне, визначаємо коефіцієнт зайнятості обладнання за формулою:

$$g = \frac{C_p}{C_{gp}}$$

$$g_1 = \frac{12.86}{13} = 0,989$$

$$g_2 = \frac{7.38}{8} = 0,922$$

Визначаємо чисельність операторів за формулою:

$$\mathcal{C}_B = \frac{t_{\text{шт-к}} \cdot N}{\Phi_B \cdot 60}, \quad (6.2)$$

де $\Phi_B = 2088$ – річний фонд часу одного робітника, год [44].

Чисельність операторів розраховуємо за формулою (6.2):

$$\mathcal{C}_{B1} = \frac{615,15 \cdot 5000}{2088 \cdot 60} = 24,55 \approx 25$$

$$\mathcal{C}_{B2} = \frac{353,251 \cdot 5000}{2088 \cdot 60} = 14,09 \approx 15$$

Кількість наладчиків та електронників розраховується за формулою:

$$\mathcal{C}_{H(e)} = \frac{C_p \cdot n}{H_{H(e)}}, \quad (6.3)$$

де $n = 1$ кількість змін роботи устаткування;

$H_{H(e)}$ – кількість верстатів, що обслуговуються одним наладчиком (електронником). $H_{H1} = 3$, $H_{H2} = 5$, $H_e = 2$.

Розраховуємо кількість наладчиків та електронників за формулою (6.3):

$$\mathcal{C}_{H1} = \frac{12,86 \cdot 1}{3} = 4,286 \approx 5$$

$$Ч_{н2} = \frac{7,38 \cdot 1}{5} = 1,476 \approx 2$$

$$Ч_{е1} = \frac{12,86 \cdot 1}{2} = 6,43 \approx 7$$

$$Ч_{е2} = \frac{7,38 \cdot 1}{2} = 3,69 \approx 4$$

Витрати на основні матеріали приймаємо за вартість заготівлі. Для обох випадків вартість заготівлі однакова – $S_{заг1,2} = 12097,13$ грн.

Заробітна плата основних виробничих робітників при відрядній системі виплат розраховується за формулою:

$$З_о = \sum_{i=1}^{T_{оп}} t_{штиi} \cdot C_{тар} \cdot K_б \cdot k_{доп} \cdot k_{соц}, \quad (6.4)$$

де $T_{оп1,2} = 1$ – кількість операцій у технологічному процесу;

$t_{штиi}$ – норма штучного часу виконання i -ої операції, год;

$C_{тар}$ – годинна тарифна ставка виробничого робітника на операції, грн;

$K_б$ – коефіцієнт, що враховує оплату основного робітника при багатостатному обслуговуванні та визначається таблично [1, с.13];

$k_{доп} = 1,2$ – коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату;

$k_{соц} = 1,4$ – коефіцієнт, що враховує страхові внески.

Тарифна ставка одного робітника для першого ТП $C_{тар1} = 57,5$ грн; для другого ТП $C_{тар2} = 51,7$ грн. Коефіцієнт що враховує оплату основного робітника для першого ТП $K_{б1} = 0,48$; для другого ТП $K_{б2} = 0,3$ [45, с.13].

Тож, розраховуємо заробітну плату основних робітників $З_о$, грн за формулою (6.4):

$$З_{о1} = \frac{556,5}{60} \cdot 57,5 \cdot 0,48 \cdot 1,2 \cdot 1,4 = 430,06 \text{ грн}$$

$$З_{о2} = \frac{318,41}{60} \cdot 51,7 \cdot 0,3 \cdot 1,2 \cdot 1,4 = 138,279 \text{ грн}$$

Заробітну плату допоміжних робітників можна розрахувати за формулою:

$$Z_{H(e)} = \frac{C_{\text{тар.н(е)}} \Phi_p \chi_{H(e)} k_{\text{доп}} k_{\text{соц}}}{N}, \quad (6.5)$$

Заробітна плата наладчиків $C_{\text{тар.н}} = 50,9$ грн, а електронників $C_{\text{тар.е}} = 57,7$. Розраховуємо заробітну плату допоміжних робітників $Z_{H(e)}$, грн за допомогою формули (6.5):

$$Z_{H1} = \frac{50,9 \cdot 5 \cdot 2088 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{5000} = 178,54$$

$$Z_{H2} = \frac{50,9 \cdot 2 \cdot 2088 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{5000} = 71,41$$

$$Z_{e1} = \frac{57,7 \cdot 7 \cdot 2088 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{5000} = 283,36$$

$$Z_{e2} = \frac{57,7 \cdot 4 \cdot 2088 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{5000} = 161,92$$

Амортизаційні відрахування на обладнання та дороговартісне оснащення з тривалим терміном служби можна визначити за формулою:

$$A_{\text{від}} = \sum_{i=1}^{T_{\text{оп}}} \frac{K_i \cdot H_{ai} \cdot t_{oi}}{100 \cdot F_d \cdot 60}, \quad (6.6)$$

де K_i – первісна вартість обладнання на i -ої операції, грн;

$H_{ai} = 5\%$ – річна норма амортизаційних відрахувань, %;

t_{oi} – основний (машинний) час операції, хв;

Розраховуємо амортизаційні відрахування на обладнання та дороговартісне оснащення $A_{\text{від}}$, грн за формулою (6.6):

$$A_{\text{від1}} = \frac{5166000 \cdot 0,05 \cdot 551,7}{100 \cdot 4176 \cdot 60} = 5,71 \text{ грн}$$

$$A_{\text{від2}} = \frac{2730000 \cdot 0,05 \cdot 315,96}{100 \cdot 4176 \cdot 60} = 1,721 \text{ грн}$$

Витрати на інструмент від типу інструменту, але для даної ситуації важливі лише витрати на різальний інструмент та дротяну катушку. Для різального інструменту:

$$S_{\text{ін}} = \sum_{i=1}^{T_{\text{оп}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{ін}}} \frac{C_{\text{ін}} \cdot t_{\text{шт}ij} \cdot \eta_{\text{т}}}{T_{ij} \cdot (n_j + 1)}, \quad (6.7)$$

де $C_{\text{ін}}$ – ціна інструменту j -го виду i -ої операції, грн/шт;

$t_{\text{шт}ij}$ – штучний час роботи j -го інструменту, i -ої операції, хв;

$\eta_{\text{т}} = \frac{551,7}{556,5} = 0,991$ – відношення машинного часу до штучного;

T_{ij} – період стійкості інструменту j -го виду i -ої операції, хв;

$n_{\text{ін}}$ – номенклатура інструментів i -ої операції;

n_j – кількість переточок j -го інструменту до повного зношування, або кількість граней.

Вихідні данні для розрахунку заносимо у таблицю 6.2

Таблиця 6.2 – Вихідні дані фрез

Фрези для чорнової обробки:	Фреза для чистової обробки:	Мікрофреза для малих радіусів:
Модель: Sandvik CoroMill 390	Модель: Sandvik CoroMill 316	Модель: Walter Prototyp 2 мм
Ціна: 3500 грн	Ціна: 4000 грн	Ціна: 1800 грн
Стійкість T_{ij} : 60 хв	Стійкість T_{ij} : 80 хв	Стійкість T_{ij} : 50 хв
Кількість переточок n_j : 1	Кількість переточок n_j : 2	Кількість переточок n_j : 0
Штучний час роботи $t_{\text{шт}ij}$: 318 хв	Штучний час роботи $t_{\text{шт}ij}$: 159 хв	Штучний час роботи $t_{\text{шт}ij}$: 79,5 хв

Розраховуємо витрати на інструмент $S_{\text{ін}}$, грн за формулою (6.7):

$$S_{\text{ін1}} = \frac{3500 \cdot 318 \cdot 0,991}{60 \cdot (1 + 1)} + \frac{4000 \cdot 159 \cdot 0,991}{80 \cdot (2 + 1)} + \frac{1800 \cdot 79,5 \cdot 0,991}{50 \cdot (0 + 1)} =$$

$$= 14503 \text{ грн}$$

У випадку із електроерозійним обладнанням розрахунок виглядає простішим.

Перш за все, слід зауважити що електроерозійні верстати зазвичай споживають від 3 до 6 метрів на хвилину, залежно від параметрів обробки. В свою чергу для титану швидкість подачі дроту є вищою, через його складну оброблюваність, тому приймаємо витрати дроту за 8 м/хв. Дріт поставляється і ставиться на верстат у вигляді катушок. Для даної операції використовується катушка латунного дроту діаметром 0,25 мм і вагою 8 кг. Довжина дроту в такій катушці приблизно 18 км. А отже можна визначити на скільки хвилин роботи вистачає однієї катушки:

$$t_{\text{кат}} = \frac{18000 \text{ м}}{8 \text{ м/хв}} = 2250 \text{ хв.}$$

Звідси, можна розрахувати скільки катушки вистачить на виготовлення однієї деталі:

$$K_{\text{кат}} = \frac{t_{\text{шт}}}{t_{\text{кат}}} = \frac{318,41}{2250} = 0,145 \text{ шт}$$

Якщо на одну деталь витрачається до 0,145 шт катушки, то знаючи що вартість катушки $\Pi_{\text{ін}} = 6300$ грн [48] можна визначити вартість витрат на інструмент на одну деталь $S_{\text{ін2}}$, грн:

$$S_{\text{ін2}} = \Pi_{\text{ін}} \cdot K_{\text{кат}} = 6300 \cdot 0,145 = 913,5 \text{ грн}$$

Наступним етапом оцінки економічної ефективності буде визначення витрат на електроенергію. Зробити це можна за допомогою формули:

$$S_e = \frac{N_B \cdot k_N \cdot k_{\text{ч}} \cdot k_{\text{од}} \cdot k_W \cdot t_{\text{штк}}}{\eta \cdot k_B} \cdot \text{Ц}_e, \quad (6.8)$$

де N_B - встановлена потужність головного електродвигуна, кВт;

$k_N = 0,9$ – середній коефіцієнт завантаженості електродвигуна за потужністю;

$k_{\text{ч}} = 0,7$ – середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за часом;

$k_{\text{од}} = 1$ – середній коефіцієнт одночасності роботи всіх електродвигунів верстата;

$k_W = 1,08$ – коефіцієнт що враховує втрати електроенергії в мережі заводу;

$\text{Ц}_e = 6,8$ грн/кВт – середня ціна за електроенергію для підприємств станом на січень 2025 року, залежить від часу доби, тому беремо середнє значення [49].

$\eta_{1,2} = 0,85$ – ККД електродвигуна;

$k_B = 1$ – коефіцієнт виконання норм часу .

Тож, розраховуємо ціну на електроенергію за формулою (6.8):

$$S_{e1} = \frac{14 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 556,5}{0,85 \cdot 1 \cdot 60} \cdot 6,8 = 523,55 \text{ грн}$$

$$S_{e1} = \frac{6 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 318,41}{0,85 \cdot 1 \cdot 60} \cdot 6,8 = 128,38 \text{ грн}$$

Витрати на обслуговування та ремонт обладнання можна розрахувати за формулою:

$$S_p = \frac{\text{Ц}_{\text{то}} \cdot K_p \cdot C_p}{N}, \quad (6.9)$$

де $\text{Ц}_{\text{то}} = K_i \cdot 0,85$ – залишкова вартість обладнання, грн;

$K_p = 0,03$ – коефіцієнт відрахувань до ремонтного фонду.

Визначаємо витрати на обслуговування та ремонт S_p , грн за формулою (6.9)

$$S_{p1} = \frac{5166000 \cdot 0,03 \cdot 12,86}{5000} = 398,60 \text{ грн}$$

$$S_{p2} = \frac{2730000 \cdot 0,03 \cdot 7,38}{5000} = 119,57 \text{ грн}$$

Витрати на налаштування інструментів поза верстатом розраховуються за формулою:

$$S_H = \frac{\varphi \cdot C_{ГН} \cdot t_{ін} \cdot t_o \cdot K_T}{T_M \cdot m \cdot 60}, \quad (6.10)$$

де $\varphi = 1,3$ – коефіцієнт, що враховує випадковий спад та поломки інструменту;

$C_{ГН} = 50,9$ грн – середньогодинна зарплата наладчиків, грн/год;

$t_{ін}$ – середній час налаштування одного інструменту поза верстатом, хв;

t_o – основний машинний час роботи інструменту на операції, хв;

K_T – коефіцієнт що враховує питому вагу основного технологічного часу в штучному часі;

T_M – середня стійкість інструменту, хв;

$m = 2$ – кількість граней ріжучої пластини що не переточуються;

Для першого ТП коефіцієнт що враховує питому вагу основного технологічного часу в штучному дорівнює $K_{T1} = 0,991$. Для другого ТП $K_{T2} = 0,992$. Середній час налаштування на фрезерному верстаті $t_{ін1} = 5$ хв, а на електроерозійному $t_{ін2} = 1$ хв

Розраховуємо витрати на налаштування інструментів поза верстатом за формулою (6.10):

$$S_{H1} = \frac{1,3 \cdot 50,9 \cdot 551,7 \cdot 0,991}{78,5 \cdot 2 \cdot 60} = 3,84 \text{ грн}$$

$$S_{H2} = \frac{1,3 \cdot 50,9 \cdot 315,96 \cdot 0,992}{2250 \cdot 1 \cdot 60} = 0,15 \text{ грн}$$

Інші загальновиробничі витрати:

$$I_H = Z_o \cdot k_{\text{заг}}, \quad (6.11)$$

де $k_{\text{заг}}=0,25$ – коефіцієнт що враховує інші загальновиробничі витрати.

Розраховуємо інші загальновиробничі витрати за формулою (6.11):

$$I_{H1} = 430,06 \cdot 0,25 = 107,515 \text{ грн}$$

$$I_{H2} = 138,279 \cdot 0,25 = 34,56 \text{ грн}$$

Заносимо результати всіх розрахунків до таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Результати розрахунків

Найменування витрат	Витрати, грн	
	Технологічний процес	
	1	2
Зарплата основних робітників	430,06	138,279
Зарплата наладчиків	178,54	71,41
Зарплата електронників	283,36	161,92
Амортизаційні витрати	5,71	1,721
Витрати на інструмент	14503	913,5
Витрати на електроенергію	523,55	128,38
Витрати на обслуговування і ремонт	398,6	119,57
Витрати на налаштування поза верстатом	3,94	0,15
Інші загальновиробничі витрати	107,515	34,56
Сума витрат	16434,275	1569,49
Економія	14864,785	

Висновок: Згідно розрахункам, річна економія від введення запропонованого технологічного процесу із використанням електроерозійного обладнання, при наявності обладнання для обох ТП, складає 14864,785 грн.

7 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

7.1 Охорона праці під час роботи з електроерозійним обладнанням

Електроерозійне обладнання є важливим інструментом у сучасній промисловості, дозволяючи виконувати точну обробку матеріалів за допомогою електричних розрядів. Однак робота з таким обладнанням пов'язана з низкою небезпек, які вимагають дотримання строгих правил охорони праці. У цьому розділі розглянуто основні ризики та заходи безпеки під час експлуатації електроерозійних машин.

7.1.1 Основні небезпечні моменти під час роботи з електроерозійним обладнанням та заходи для їх запобігання

Робота з електроерозійними установками пов'язана з кількома ключовими ризиками. По-перше, це небезпека ураження електричним струмом, оскільки обладнання працює під високою напругою. По-друге, під час процесу обробки виділяються шкідливі гази, пари та дрібні частинки металу, які можуть потрапляти в органи дихання працівників. По-третє, використання легкозаймистих рідин, таких як діелектричні оливи, створює пожежонебезпечну ситуацію. Крім того, неправильне обслуговування обладнання може призвести до механічних травм, а шум і вібрація, які супроводжують роботу машин, можуть негативно впливати на здоров'я працівників.

Для запобігання нещасним випадкам і створення безпечних умов праці необхідно дотримуватися низки заходів. Насамперед, усі працівники повинні пройти навчання з техніки безпеки та отримати детальний інструктаж щодо роботи з обладнанням. Важливо використовувати засоби індивідуального

захисту (ЗІЗ), такі як захисні окуляри, рукавиці, спецодяг і респіратори. Перед початком роботи слід перевірити стан обладнання, зокрема цілісність ізоляції електричних проводів, наявність заземлення та інших захисних пристроїв. У приміщенні повинна бути встановлена ефективна система вентиляції для видалення шкідливих газів і пилу. Для запобігання пожежам слід утримувати робочу зону в чистоті, уникаючи наявності легкозаймистих матеріалів, а діелектричні рідини зберігати в спеціальних ємностях. Регулярне технічне обслуговування обладнання також є обов'язковим для виявлення та усунення можливих несправностей.

7.1.2 Дії у разі аварійних ситуацій

У разі виникнення аварійних ситуацій необхідно діяти чітко та відповідно до встановлених процедур. Якщо сталося ураження електричним струмом, обладнання слід негайно відключити, а постраждалому надати першу допомогу. При виникненні пожежі потрібно використовувати вогнегасники, призначені для гасіння електроустановок, наприклад, вуглекислотні. У разі потрапляння шкідливих речовин у повітря працівники повинні використовувати респіратори та евакуюватися з приміщення. Керівництво підприємства має забезпечити наявність аптечок першої допомоги, вогнегасників та чітких інструкцій з дій у надзвичайних ситуаціях.

7.1.3 Підсумок

Робота з електроерозійним обладнанням вимагає високого рівня відповідальності та дотримання всіх норм охорони праці. Дотримання правил

безпеки, регулярне навчання працівників, використання засобів індивідуального захисту та належне технічне обслуговування обладнання дозволяють мінімізувати ризики та забезпечити безпечні умови праці. Керівництво підприємства повинно постійно контролювати виконання цих вимог, щоб уникнути нещасних випадків і зберегти здоров'я працівників.

ВИСНОВОК

Темою даного дипломного проекту є «Вдосконалення технологічного процесу виготовлення складнопрофільних авіаційних деталей». Було проаналізовано сучасні підходи до виробництва складнопрофільних авіаційних деталей. Основна увага була приділена електроерозійному обладнанню. Електроерозійна обробка є перспективною для роботи з високоміцними матеріалами, такими як титан і нікелеві сплави, забезпечуючи високу точність обробки (до $\pm 0,0005$ мм) і можливість створення деталей складної геометрії. Основними методами є дротяна різка та заглибна обробка, які ефективно виконують завдання створення прорізів, контурів і порожнин.

Попри численні переваги, електроерозійна обробка має низку недоліків, які потребують врахування. Процес супроводжується мікроструктурними змінами поверхні, такими як шар переплавлення, мікротріщини та залишкові напруження, що можуть знижувати міцність і довговічність деталей, особливо в умовах втомного навантаження. Висока енергоємність процесу підвищує виробничі витрати, а знос електродів, особливо дротяних, потребує частих замін і додаткових витрат. Процес є чутливим до параметрів роботи: неправильні налаштування можуть викликати перегрів, короткі замикання, нерівності та втрату точності. Застосування діелектричних рідин, таких як масла, може впливати на хімічний склад поверхні деталей, потребуючи додаткового контролю. Метод характеризується відносно низькою продуктивністю порівняно з іншими технологіями, що може бути критичним для серійного виробництва, і є непридатним для роботи з матеріалами, що мають низьку електропровідність.

Підсумовуючи, електроерозійна обробка є перспективною технологією для виготовлення складнопрофільних деталей, але її ефективне використання потребує точного налаштування, контролю процесів і додаткових рішень для зниження впливу недоліків на якість продукції.

Були розглянуті також різноманітні методи автоматизації, а саме:

- Інтелектуальні системи з використанням штучних нейромереж;
- Пристрої реєстрації даних для автоматичної оптимізації;
- Програмовані логічні контролери;
- Інтеграція САМ/CAD/САПР;
- Роботизація;
- Гібридні процеси;
- Ройовий інтелект.

Автоматизація електроерозійної обробки підвищує точність, стабільність і продуктивність процесів, мінімізує залежність від людського фактору, знижує витрати й екологічний вплив. Інтеграція інтелектуальних систем, роботів, CAD/CAM і SCADA та інших систем дозволяє ефективно вирішувати складні завдання виробництва, роблячи електроерозійну обробку перспективною технологією для аерокосмічної галузі, інструментального машинобудування та інших сфер.

На прикладі деталі «Диск 0 ступені КВТ» було розглянуто, як впровадження електроерозійних технологій впливає на сучасне виробництво.

Було обрано й обґрунтовано спосіб отримання заготовки, тип виробництва і форму організації робіт. Деталь було проаналізовано на технологічність, а також спроектовано маршрут обробки деталі разом з розрахунком припусків. Для 015 токарної операції з ЧПК були розраховані режими різання та проведено розрахунки з технічного нормування. Для тієї ж операції було розроблено керуючу програму для верстатів з ЧПК.

В конструкторській частині було спроектовано робочого пристосування для свердлильної операції, та контрольного пристосування для контролю форм допусків, використовуючи новітні технології, а саме лазерний профільний сенсор.

В розділі з розрахунку на міцність було змодельовано експлуатаційні умови деталі «Диск 0 ступені КВТ» і визначено значення деформацій під час експлуатації деталі.

В розділі з оцінки економічної ефективності було доведено, що впровадження електроерозійного обладнання не тільки дозволяє обробляти високоміцні матеріали, а й в конкретних умовах отримати економічну вигоду. В даному випадку в розмірі 14864 грн.

В розділі з охорони праці було розглянуто основні небезпечні моменти при роботі з електроерозійним обладнанням, і розроблено відповідні заходи для запобігання травм.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Moulton D. B. Wire EDM the fundamentals. Sugar Grove, IL : EDM network, 1999. URL: <https://notebookmanuals.bestmanualguide.com>.
2. Kumar S., Gupta T. A review of electrical discharge machining (EDM) and its optimization techniques. Materials Today: Proceedings. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.123>.
3. Характеристика сучасного електроерозійного обладнання. URL: <https://met.ua/p/droto-vyriznyi-elektroeroziinyi-ver-3>.
4. Єрошенко А. М., Кремчанін Є. М. Програмування електроерозійної обробки в середовищі Delcam. Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2014. № 2. С. 33–37.
5. Кононов В. В., Логомінов В. О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Технології електрофізичних та електрохімічних методів обробки матеріалів». Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. 65 с.
6. Jameson E. C. Electrical Discharge Machining. Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, 2001.
7. Ступін Б. А., Івченко О. В., Динник О. Д., Зінченко Р. М. Нетрадиційні методи механічної обробки матеріалів : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2016. 149 с.
8. Klocke F. et al. Multi-scale directed surface topography machined by electro discharge machining in combination with plasma electrolytic conversion for improved osseointegration. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. 2013. Vol. 6, № 3. P. 254–269.
9. Борак, К. В. Вплив електроерозійної обробки на хімічний склад та структуру сталі 65Г / К. В. Борак // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ, 2011. - Вип. 24, ч. 1. - С. 141-147

10. Носуленко В. І. Вплив характеру течії робочої рідини на якість обробки в умовах розмірної обробки металів електричною дугою / В. І. Носуленко, В. М. Шмельов, А. А. Пащенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 11 (1336). – С. 53-57.
11. Ho K. H., Newman S. T. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43, № 13. P. 1287–1300.
12. Anitha J., Das R., Pradhan M. K. Multi-objective optimization of electrical discharge machining processes using artificial neural network. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2016. Vol. 10, № 1.
13. Fenggou C., Dayong Y. The study of high efficiency and intelligent optimization system in EDM sinking process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149, № 1–3. P. 83–87.
14. Salonitis K. et al. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 40. P. 316–323.
15. Fenggou C., Dayong Y. The study of high efficiency and intelligent optimization system in EDM sinking process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 149, № 1–3. P. 83–87.
16. Salonitis K., Stournaras A., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 40, № 3. P. 316–323.
17. Joshi S. N., Pande S. S. Development of an intelligent process model for EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45, № 3. P. 300–317.

18. Rajmohan T., Prabhu R., Rao G. S., Palanikumar K. Optimization of machining parameters in electrical discharge machining (EDM) of 304 stainless steel. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 38. P. 1030–1036.
19. Lee C.-H., Lai T.-S. An intelligent system for improving electric discharge machining efficiency using artificial neural network and adaptive control of debris removal operations. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 75302–75312.
20. Shaw T. W., Lee L. C., Crookall J. R. Automation of the EDM Process. *Proceedings of the Twentieth International Machine Tool Design and Research Conference: Sub-Conference on Electrical Processes*. Palgrave Macmillan UK, 1980. P. 591–598.
21. Ma H. et al. A feature-based approach towards integration and automation of CAD/CAPP/CAM for EDM electrodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 98. P. 2943–2965.
22. Almeida S. et al. Accurate vibration-free robotic milling electric discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 122, № 1. P. 343–363.
23. Pawade M. M., Banwait S. S. A brief review of die sinking electrical discharging machining process towards automation. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 1, № 2. P. 43–49.
24. Chen Y. et al. Parameters Optimization of Electrical Discharge Machining Process Using Swarm Intelligence: A Review. *Metals*. 2023. Vol. 13, № 5. P. 839.
25. Jumper J. et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*. 2021. Vol. 596. P. 583–589.
26. Pandey A., Singh S. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. Vol. 2, № 6. P. 2172–2191.
27. Богуслаев В. А. Основы технологии машиностроения / В. А. Богуслаев, В. И. Цыпак, В. К. Яценко ; ОАО "Мотор Сич", Запорожье. – М. : Машиностроение, 2003. – 336 с.

28. Хорошков В. Д., Алексеєнко О. В., Павленко Д. В. Методичні вказівки до практичних занять з технології машинобудування (розділ проектування технологічних процесів) для студентів спеціальностей: 8.090205, 2.090203, 8.090214, 7.100102 усіх форм навчання. – Запоріжжя : ЗДТУ, 1999. – 78 с.

29. Електронне джерело. URL: <https://flagma.ua/titanovye-pokovki-vt5-o4175174.html>.

30. Електронне джерело. URL: <https://metaldnepr.com.ua/cvetnoj-lom/titan/#:~:text=Стоимость%201%20кг%20лома%20титана%20составляет%2045%20грн.>

31. Яценко В. К., Ципак В. І., Коренєвський Е. Я. та ін. Методичні вказівки до дипломного проектування з технології авіадвигунобудування і машинобудування для студентів спеціальностей «Технологія машинобудування» (8.090202) та «Двигуни та енергетичні установки літальних апаратів» (7.100102) усіх форм навчання. – Запоріжжя : ЗДТУ, 2000. – 245 с.

32. Електронне джерело. URL: <https://met.ua/p/droto-vyriznyi-elektroeroziinyi-ver-12>.

33. Ципак В. І. Додатки до методичних вказівок для виконання практичних занять з дисциплін «Технологічні основи машинобудування», «Технологія машинобудування», «Теоретичні основи технології виготовлення деталей та складання машин» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» та спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітніх програм «Металорізальні верстати та системи» і «Колісні та гусеничні транспортні засоби» галузі знань «Механічна інженерія» всіх форм навчання / Під ред. Гончар Н. В. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 61 с.

34. Косилова А. Г., Мещеряков Р. К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 496 с.

35. Баранчиков В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания: справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина; за общ. ред В.И. Баранчикова. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
36. Стружестрах Е. І. Довідник нормувальника-машинобудівельника. Технологічні нормування сборочних робіт. Т. 2. – М. : Машгиз, 1961.
37. Електронне джерело. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=C3-SDJCL-22040-11C1&m=8442449>.
38. Богуслаев В.А. Станочные приспособления / В.А. Богуслаев, В.А. Леховицер, А.С. Смирнов – Запорожье : ОАО «Мотор Сич». 2000. – 430 с.
39. Електронне джерело. URL: <https://abplanalp.ua/ru/stanok-frezernyj-vertikalno-frezernyj-haas-vf-2>.
40. Біланенько В. Г. Технічні аспекти обробки титанових сплавів. Науковий журнал «ЛОГОΣ. Мистецтво наукової думки». Лютий 2019. С. 90–93. URL: <http://eoi.citefactor.org/10.11232/2617-7064.2.1>.
41. Санкович Е. С. Гидравлика, гидромашины и гидропривод : учебно-методическое пособие по курсовой работе для студентов высших учебных заведений по специальностям 1-36 07 01 "Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов, 1-36 05 01 "Машины и оборудование лесного комплекса" / Е.С. Санкович, А.Б. Сухоцкий – Минск : БДТУ, 2011. – 141 с.
42. Електронне джерело. URL: https://www.keyence.com/products/measure/laser-2d/lj-x8000/?ad_local=repl_p_dtl.
43. Електронне джерело. URL: <https://met.ua/p/droto-vyriznyi-elektroeroziinyi-ver-12>.
44. Електронне джерело. URL: <https://services.dtkr.ua/catalogues/worktime/148-normi-trivalosti-robocogo-casu-na-2025-rik>.
45. Методичні рекомендації для дипломного проектування «Оцінка економічної ефективності технічних рішень» для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх

форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 41 с.

46. Електронне джерело. URL: <https://vitcompany.com.ua/stanki/stanki-frezernye-s-chpu/stanki-frezernye-5-i-osevye/5-osevoy-frezernyy-standok-s-chpu-dmg-mori-dmu-50-id15502.html>.

47. Електронне джерело. URL: <https://vitcompany.com.ua/stanki/elektroerozionnye-stanki/elektroerozionnye-provolochno-vyreznye-stanki/elektroerozionny-provolochno-vyreznoy-standok-agie-agiecut-progress-v-3-id16029.html>.

48. Електронне джерело. URL: https://prom.ua/ua/p1820275406-provoloka-latunnaya-dlya.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_b2b&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAp4O8BhAkEiwAqv2UqJIYa9D3hqqj0Kfj0PO6JJTiob_x4YPsbwraIODB7VTcUytfduHlsBoCwH4QAvD_BwE.

49. Електронне джерело. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/>.

ДОДАТОК Б. СПЕЦИФІКАЦІЯ КОНТРОЛЬНОГО ПРИСТОСУВАННЯ

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кіл.	Примітка
				Документація		
				<i>Складальне креслення</i>		
				Складальні одиниці		
		1		<i>Лазерний профільний сенсор</i>	1	
				Деталі		
		2		<i>Основа</i>	1	
		3		<i>Планшайда</i>	1	
		4		<i>Платформа</i>	1	
		5		<i>Стійка</i>	1	
		6		<i>Ручка</i>	4	
		7		<i>Гайка регулююча</i>	1	
		8		<i>Гайка регулююча</i>	1	
				Стандартні вироби		
		9		<i>Підшипник 122</i>	1	
				<i>ГОСТ 8338-75</i>		
		10		<i>Болт М18-6g</i>	4	
				<i>ГОСТ 7798-70</i>		
				НУЗП 40114.001		
Ім.	Лист	Місце	Підпис	Дата		
Розроб		Волаткевич			Лист	Лист
Перевір		Вишнепольский			9	1
						2
Н. контр.		Дядя			М-113м	
Чтв.		Дядя				

