

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.
(прізвище та ініціали)

« » 20__ р.

на здобуття освітнього ступеня	бакалавр
	(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
	(шифр і назва спеціальності)
студенту	Островському Олександру Тарасовичу
	(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник роботи	Микитишин Андрій Григорович, к.т.н., доцент, зав. кафедри КТ (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
-----------------	--

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації та інформаційні джерела (HH Library database, Google Scholar, Science direct, Research gate, міжнародні журнали з машинобудування та досліджень, бібліографічні бази даних та пошукові системи в Інтернеті) щодо автоматизованого шліфування на верстатах з ЧПК

1. Аналітична частина.
2. Проектна частина.
3. Спеціальна частина
4. Безпека життєдіяльності, основи хорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи становить 20 слайдів.

Об'єм пояснювальної записки складає 93 друковані сторінки формату А4 (210×297), об'єм додатків – 34 друковані сторінки формату А4.

Кваліфікаційна робота складається з чотирьох розділів, в яких нараховується 51 рисунок та 13 таблиць з даними, використано 50 бібліографічних джерел.

Об'єкт дослідження: автоматизоване шліфування на верстатах з ЧПК.

Метою даної кваліфікаційної роботи було визначення можливих рухів шліфувальної системи з ЧПК з урахуванням різних траєкторій руху інструменту, математичне моделювання та оцінка оптимального способу ефективної обробки деталі з максимально можливою якістю поверхні.

Для досягнення поставленої мети досліджено підходи до генерації траєкторій інструмента; розглянуто теоретичні аспекти оптимізації стратегій траєкторій руху інструмента та параметрів обробки поверхні; вивчено способи обробки поверхні з керуванням траєкторією та часом; висвітлено альтернативні методи оптимізації характеристик процесу автоматизованого шліфування; згенеровано алгоритми для потенційних рухів інструмента для повного покриття робочої поверхні; здійснено оптимізацію параметрів на математично змодельованій функції інструмента для визначення необхідної якості поверхні; означено відносну важливість параметрів у процесі шліфування на ЧПК; визначено найбільш оптимальні комбінації траєкторій руху інструмента (кореляцію параметрів) для досягнення технологічно та економічно обґрунтованого процесу.

Ключові слова: ОБРОБКА ПОВЕРХНІ, ШЛІФУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТРАЄКТОРІЯ РУХУ ІНСТРУМЕНТА, КІНЕМАТИКА, АЛГОРИТМИ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Огляд літератури	11
1.1.1 Підходи до генерації траєкторії руху інструменту	11
1.1.2 Оптимізація стратегій ТРІ та параметрів обробки	13
1.1.3 Обробка з керуванням траєкторією та часом.....	17
1.2 Критичний аналіз літератури.....	19
1.3 Теоретичні основи вирішення поставленої задачі.....	20
1.3.1 Геометрія траєкторії руху інструмента: короткий огляд.....	20
1.3.2 Загальна процедура генерації траєкторії руху інструмента	25
1.4 Поточні дослідження - актуальність автоматизації.....	25
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	29
2.1 Методологія дослідження	29
2.2 Альтернативні методи	30
2.2.1 Методи генерації траєкторії руху інструмента.....	30
2.2.2 Методи моделювання	33
2.2.3 Методи оптимізації траєкторії руху інструмента.....	33
2.3 Критичний аналіз альтернативних методів.....	37
2.4 Реалізація методології дослідження.....	40
2.4.1 Створення траєкторії інструмента	40
2.4.2 Математичне моделювання	43
2.4.3 Оптимізація процесу.....	44
2.5 Порівняння методів.....	47
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	51
3.1 Аналіз отриманих результатів	51
3.1.1 Обґрунтування процесу моделювання	51
3.1.2 Обґрунтування процесу оптимізації	60
3.2 Обговорення результатів.....	82

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	86
4.1 Вимоги охорони праці під час роботи зі шліфувальними верстатами	86
4.2 Журнали обліку та періодичні перевірки відповідності нормам безпеки при роботі зі шліфувальними верстатами.....	88
ВИСНОВКИ.....	91
БІБЛІОГРАФІЯ.....	95
ДОДАТКИ.....	100
Додаток А.....	100
Додаток Б	117
Додаток В	118
Додаток Г	120
Додаток Д.....	122
Додаток Е	125
Додаток Ж.....	128
Додаток К.....	129
Додаток Л.....	132

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ВГ - висота гребінця
- ГА - генетичний алгоритм
- ДІ - діаметр інструмента
- ЕА - евристичний алгоритм
- ЗГ - залишковий гребінець
- КР - точка контакту різця
- ОМ - ортогональний масив
- ОМК - оптимізація мурашиних колоній
- ОП - оптимізаційні параметри
- ОРЧ - оптимізація рою частинок
- ПЗ - програмне забезпечення
- РР - розташування різця
- САПР - система автоматизованого проєктування та розрахунку
- ТРІ - траєкторія руху інструмента
- ЧПК - числове програмне керування
- CAD - Computer-Aided Design (автоматизоване проєктування)
- CAM - Computer-Aided Manufacturing (автоматизоване виробництво)
- TIF - Tool influence function (функція впливу інструмента)
- TSP - Time Stamp Protocol (протокол штамп часу)

ВСТУП

Актуальність теми. Протягом останніх років виробничі компанії конкурують у дедалі динамічнішому середовищі. Серед них значно зростає малий та середній бізнес, розвиваються інновації та скорочуються життєві цикли продуктів. З цих причин підприємства змушені докладати додаткових зусиль і ресурсів, щоб вистояти в умовах жорсткої конкуренції на ринку, отримуючи при цьому прибуток.

Ефективність процесу та якість продукції є життєво важливими для конкурентоспроможності виробничих галузей. Постійним викликом є створення компонентів в межах необхідних допусків з найменшими витратами часу та коштів. У машинобудуванні найвища якість та економічна ефективність обробки часто досягається за рахунок оптимізації процесів обробки. Традиційні стратегії планування процесів, засновані на досвіді, зазвичай генерують менш оптимальні плани обробки і мають тенденцію бути консервативними у виборі режимів різання. Консервативні режими різання забезпечують низьку ефективність обробки і не гарантують постійну якість при обробці складних елементів. Як наслідок, важливо розробити методологію оптимізації процесу, яка базується на даних.

Деталі з заданою поверхнею зазвичай використовуються в автомобільній, авіаційній та медичній промисловості, виробництві штамів і прес-форм. Ці елементи іноді створюються за допомогою 3-осьового або 5-осьового фрезерування, шліфування та полірування з ЧПК, при цьому траєкторії руху інструменту мають вирішальне значення для якості деталі та її ріжучої здатності.

Протягом останніх десятиліть були спроектовані різні підходи до планування траєкторії руху ЧПК для обробки поверхонь. Ці підходи припускали, що верстати з ЧПК і фрези є достатньо жорсткими, щоб працювати без вібрацій під час обробки. Отже, вони стосувалися ефективності процесу, точності поверхні, шорсткості, ріжучої здатності та надлишкової обробки. Однак шліфування - це детермінований процес зняття матеріалу, де траєкторія руху інструменту суттєво впливає на якість обробки, а основною вимогою є рівномірне

покриття всієї поверхні. Тому дослідження функції зняття матеріалу при різних траєкторіях шліфування є вкрай актуальним для кращого розуміння взаємозв'язку між параметрами процесу зняття матеріалу та якістю поверхні з метою використання для оптимізації методів фінішної обробки в автоматизованих системах.

Мета дослідження: визначення можливих рухів шліфувальної системи з ЧПК з урахуванням різних траєкторій руху інструменту, математичне моделювання та оцінка оптимального способу ефективної обробки деталі з максимально можливою якістю поверхні.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань:

- дослідити підходи до генерації траєкторій інструмента;
- розглянути теоретичні аспекти оптимізації стратегій траєкторій руху інструмента та параметрів обробки поверхні;
- вивчити способи обробки поверхні з керуванням траєкторією та часом;
- висвітлити альтернативні методи оптимізації характеристик процесу автоматизованого шліфування;
- згенерувати алгоритми для потенційних рухів інструмента для повного покриття робочої поверхні;
- здійснити оптимізацію параметрів на математично змодельованій функції інструмента для визначення необхідної якості поверхні;
- означити відносну важливість параметрів у процесі шліфування на ЧПК;
- визначити найбільш оптимальні комбінації траєкторій руху інструмента (кореляцію параметрів) для досягнення технологічно та економічно обґрунтованого процесу.

Об'єкт дослідження: автоматизоване шліфування на верстатах з ЧПК.

Предмет дослідження: розроблення математичної моделі оптимізації параметрів процесу автоматизованого шліфування на верстатах з ЧПК.

Наукова новизна одержаних результатів кваліфікаційної роботи полягає у порівнянні та впливі траєкторії руху інструмента, типу та діаметра інструмента, відносної швидкості, тиску, глибини різання тощо на якість робочої поверхні (відношення похибки до величини знімання матеріалу). Існує безліч робіт,

присвячених оптимізації процесу фрезерування з ЧПК, однак нами виявлено дефіцит досліджень щодо операції шліфування. Нами доведено, що для досягнення найкращої стратегії обробки та візуального аналізу варіацій і ефектів повстає необхідність математичного моделювання. Результати даного дослідження вперше показують найбільш оптимальну траєкторію руху інструмента, найвпливовіший параметр та оптимізований діапазон значень параметрів для ефективного процесу шліфування.

Практичне значення одержаних результатів. Усвідомлення ефективної траєкторії руху інструмента для шліфування в поєднанні з урахуванням впливу змінних на ефективність виробництва є потенційно необхідним аспектом у впровадженні змін в існуючі виробничі процеси. Дане дослідження пропонує комплексний аналіз, спрямований на вивчення впливу операційних параметрів на процес шліфування. Це надає компаніям показники та рекомендації (оптимальну траєкторію руху інструмента й параметри) для успішної реалізації ефективної операції шліфування. При розподілі роботи від генерації до оптимізації також враховуються різні варіанти вибору робочих параметрів та їх ймовірний вплив на робочу поверхню. Ґрунтовні попередні знання про ці фактори забезпечать компанії конкурентну перевагу.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Огляд літератури

Ефективність будь-якого процесу обробки залежить від його здатності знімати максимальну кількість матеріалу за найкоротший час без шкоди для якості поверхні.

Занадто великий інтервал руху інструменту створює шорстку поверхню, в той час як занадто малий може збільшити час обробки, що робить метод набагато менш ефективним. Іншим важливим фактором є визначення ефективної траєкторії руху інструменту (ТРІ), яка покриває всю поверхню з мінімальним перекриттям. Необхідність взаємодії людини на деяких етапах процесу обробки з числовим програмним керуванням (ЧПК) може призвести до труднощів в інтеграції проєктування з виробництвом. Для автоматизації та подолання цих труднощів необхідна стратегія розширення алгоритмів для описаної траєкторії інструменту, в першу чергу, на основі точного інтервалу траєкторії інструменту. З тієї ж причини, в центрі уваги теоретичної оцінки даної роботи знаходиться розробка траєкторій, їх генерація та оптимізація.

1.1.1 Підходи до генерації траєкторії руху інструменту

Метою генерації траєкторії руху інструменту (ТРІ) є створення обробленої поверхні, яка максимально наближається до поверхні, спроектованої в системі автоматизованого проєктування та розрахунку (САПР), в межах заданого допуску. Поняття допуску є центральним у виробництві, і його важливість не можна ігнорувати. Тому помилки, що вносяться алгоритмами генерації ТРІ, зокрема, помилки, спричинені використанням лінійного сегмента для апроксимації бажаної кривої обробки, повинні бути обмежені. Оброблені поверхні повинні бути без задирок, а висота гребінця між ТРІ повинна контролюватися [1].

Методи генерації ТРІ на поверхнях довільної форми інтенсивно досліджувалися з метою підвищення точності обробки при одночасному скороченні часу виробничого процесу. Основну увагу приділяють контролю допусків, зокрема висоті гребінця між проходами, що критично для якісного шліфування складних поверхонь. Запропоновані підходи включають мінімізацію обсягу керуючих даних при збереженні швидкості подачі і точності позиціонування, а також використання спіральних траєкторій із регулярними вершинами гребінця для стабілізації процесу і зменшення довжини маршрутів інструмента. Для зустрічної обробки застосовуються методи зі сталою координатою z , що забезпечують рівномірність висоти гребінця навіть на триангульованих сітках складних форм, підвищуючи точність і гнучкість управління у системах числового програмного керування. Таким чином, сучасні рішення спрямовані на оптимізацію геометричних параметрів траєкторій інструменту для ефективної і точної обробки складних поверхонь[2].

Одним із ключових напрямів у шліфуванні є розробка ефективних методів генерації ТРІ для обробки складних поверхонь, що дозволяє підвищити продуктивність і якість процесу. Запропонований підхід із застосуванням нейронних мереж SOM оптимізує планування траєкторій чорнової обробки, формуючи більш плавні та контрольовані маршрути інструменту, що скорочує час обробки. Також розроблено методику для 5-координатних верстатів, яка зменшує надлишкове перекриття між траєкторіями, підвищуючи ефективність обробки. Крім того, метод обробки з постійною висотою гребінця дозволяє досягти необхідної точності при зменшеній кількості та довжині траєкторій, що оптимізує ресурс і час роботи інструменту на тривимірних поверхнях [3].

За останні двадцять років було запропоновано різноманітні методи генерації ТРІ для ЧПК, які значно підвищують точність, ефективність та екологічність виробничих процесів. Серед них - алгоритми, що використовують поліедричні моделі для скорочення часу обробки і підвищення точності, а також техніки створення траєкторій на основі NURBS для складних поверхонь із врахуванням керуючих точок та правил уникнення зіткнень інструмента з деталлю. Запропоновано алгоритми оптимізації напрямку руху інструмента та маршруту на

багатокоординатних верстатах, а також методи глобальної інтерполяції для точного формування траєкторії. Окремо розроблені сплайн-траєкторії, які забезпечують плавність профілів положення, швидкості та прискорення, усуваючи коливання швидкості подачі, що позитивно впливає на якість обробки та надійність технологічного процесу. Таким чином, сучасні підходи до генерації ТРІ поєднують високоточне моделювання з оптимізацією руху інструменту, сприяючи автоматизації та підвищенню продуктивності ЧПК [4].

1.1.2 Оптимізація стратегій ТРІ та параметрів обробки

Оптимізація відноситься до системи пошуку найкращого рішення в просторі життєздатних рішень. На виробництві оптимізація може виконуватися для досягнення різних технологічних кінцевих точок, включаючи:

- досягнення найкращої якості поверхні
- мінімізація зносу інструменту
- досягнення найкоротшого часу обробки
- мінімізація витрат на обробку

Оптимізація траєкторій руху інструменту (ТРІ) є важливим чинником підвищення продуктивності та зниження собівартості у сучасному виробництві. Вона дозволяє забезпечити стабільну швидкість зняття матеріалу, раціональне використання інструменту та зменшення навантаження на обладнання. Розробка алгоритмів для формування ТРІ ґрунтується на аналізі геометрії оброблюваних ділянок і врахуванні локальних особливостей процесу, що дає змогу формувати плавні та ефективні траєкторії. Застосування змінних радіусів заокруглень і криволінійних елементів, зокрема В-сплайнів, сприяє підвищенню реальної швидкості подачі та рівномірному розподілу навантаження в процесі різання. Впровадження додаткових дугоподібних сегментів у кутових зонах траєкторій забезпечує поступове видалення матеріалу, що знижує ризик перевантаження інструменту та покращує якість обробки. Загалом, використання оптимізованих ТРІ дає змогу суттєво підвищити ефективність обробних центрів із числовим

програмним керуванням, забезпечуючи високоточне, надійне та енергоефективне виробництво [5].

Вибір TPI. Оптимізація TPI в абразивній обробці є ключовим чинником забезпечення високої якості поверхні, стабільної точності та тривалого ресурсу інструменту. Через особливості процесу, зокрема незначну глибину зняття, інтенсивне тепловиділення та високу частоту контакту, стандартні критерії побудови траєкторій виявляються малоефективними. Вибір оптимального рішення потребує аналізу геометрії заготовки, параметрів інструменту, умов охолодження та кінематичних характеристик обладнання. Актуальним є застосування алгоритмів, спрямованих на зменшення сили взаємодії, уникнення локального перегріву та мінімізацію холостих переміщень. Інтелектуальні методи, зокрема нейронні мережі, відкривають можливість прогнозування ефективних стратегій руху на основі даних про фактичну шорсткість та стабільність процесу. В умовах абразивного знімання особливої уваги потребує адаптація моделей до мікромеханізмів взаємодії зерен з матеріалом, що визначають кінцеву якість обробленої поверхні [6].

Енергоспоживання. Деякі нестандартні варіанти TPI, що використовуються при обробці складних контурів, характеризуються підвищеними вимогами до енергоспоживання та тривалості виконання. Це відкриває перспективи для підвищення енергоефективності шляхом формування таких траєкторій, які забезпечують мінімальні витрати потужності без втрати якості обробки. Ці підходи ґрунтуються на принципах точного контролю переміщень з урахуванням динаміки системи та рівномірного навантаження на приводи. Інноваційний підхід, заснований на аналізі процесів, подібних за характером до шліфування, дозволив розробити алгоритм, що враховує художні стратегії мікрографії як джерело оптимальних енергетичних рішень. Така аналогія з каліграфічними маніпуляціями продемонструвала ефективність плавних і безперервних траєкторій для зменшення пікових навантажень і покращення узгодженості роботи виконавчих механізмів [7].

Кількість втягувань інструменту. У рамках підвищення ефективності абразивної обробки велике значення має розробка траєкторій, які мінімізують

холості переміщення та відведення інструменту, що особливо актуально при наявності складної геометрії з отворами або ізольованими ділянками. Один із підходів передбачає використання алгоритмів, орієнтованих на оптимальний кут сканування та поділ оброблюваної зони на підрегіони таким чином, щоб у межах кожного з них не було потреби в зміні траєкторії або відведенні інструмента. Альтернативна стратегія полягає в застосуванні послідовних ізоліній з урахуванням топологічних зв'язків між контурами, що дозволяє побудувати неперервний маршрут. Таке рішення базується на мережевій структурі, яка враховує ієрархічну залежність між елементами геометрії та забезпечує побудову маршруту з нульовим числом переривань. Обидва підходи дозволяють значно знизити енергоспоживання, уникнути пікових навантажень та зменшити ризики пошкодження поверхні внаслідок повторного входу інструмента в зону обробки [8].

Час обробки. Оптимізація TPI в процесах різання спрямована на зменшення часу обробки, підвищення енергоефективності та покращення якості поверхні. Підбір оптимальної TPI здійснюється з урахуванням прискорення, уповільнення, динаміки інструменту та геометрії оброблюваної поверхні. Встановлено, що маршрути з плавними переходами забезпечують стабільність навантаження та скорочення непродуктивних переміщень. Застосування статистичних методів оптимізації, таких як RSM і метод Тагучі, дозволяє точно визначити вплив технологічних параметрів на кінцеві результати. На рис. 2.1 представлено залежність ефективності обробки від типу траєкторії.

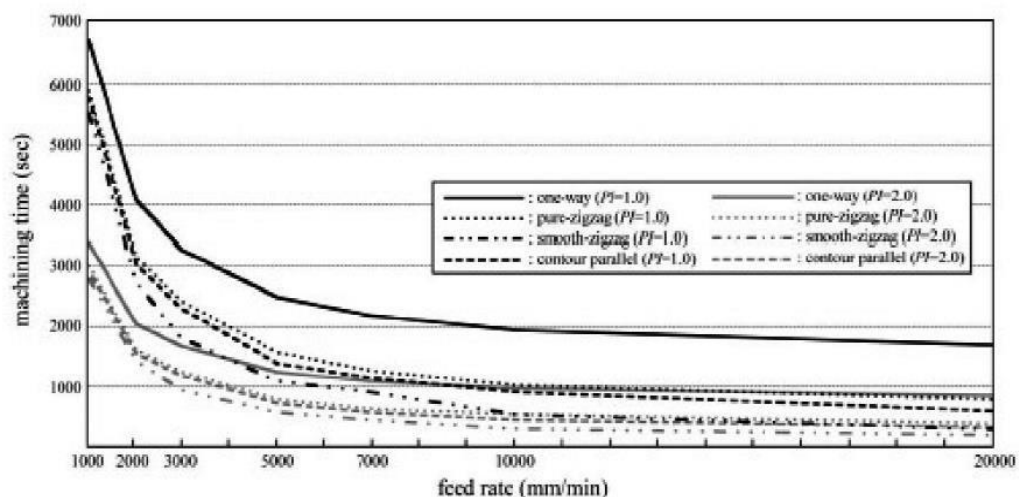


Рисунок 1.1 - Графік, що показує час обробки для різних TPI [9]

Мінімізація сил відхилення, а отже, і похибок. Іншим підходом є мінімізація розмірних похибок, спричинених відхиленнями інструменту, що дозволяє підвищити точність обробки складних поверхонь. Це сприяє покращенню якості кінцевих виробів і зменшенню дефектів поверхні [10].

Підтримання постійних сил різання та уникнення вдарання. Сили різання в зоні контакту інструменту та заготовки визначають інтенсивність вібрацій, що впливає на довговічність інструменту та якість обробленої поверхні. Традиційне формування ТРІ в САМ-системах часто ігнорує фізичні параметри процесу. Для усунення цього недоліку запропоновано оптимізовану траєкторію, яка забезпечує стабільну швидкість зняття матеріалу (MRR), що суттєво знижує сили різання та пов'язані з ними вібрації [11].

Запобігання надлишковим рухам інструменту та потенційним зіткненням. Запропоновано метод, який запобігає надлишковим рухам інструменту та потенційним зіткненням у багат шаровому виробництві гетерогенних прототипів, що підвищує продуктивність шляхом створення багато-інструментальних траєкторій з оптимальним контролем. Верстати з числовим програмним управлінням широко застосовуються в обробній промисловості завдяки високій точності, простоті програмування та повторюваності обробки складних деталей. Вибір параметрів обробки, таких як швидкість різання, ТРІ та відстань різання, є критичним для оптимізації процесу. Ефективність ТРІ залежить від багатьох факторів, зокрема матеріалу заготовки та інструменту, і оптимізація траєкторій залишається ключовим напрямом розвитку в технології обробки з ЧПК [12].

Процес шліфування. Розроблено численні нові методи і підходи до генерації та оптимізації ТРІ, зокрема для чорнової обробки кишень, скульптурних поверхонь, 3- і 5-координатної обробки. Запропоновані алгоритми враховують параметри площі обробки, непослідовне зміщення траєкторій, зворотну кінематику та змінну сітку. Використовуються різноманітні моделі і методи, такі як поле потенціалу обробки, поліноміальна інтерполяція, багатогранні моделі, штучні імунні системи і методи оптимізації з численними цілями. Активно розвиваються підходи до уникнення зіткнень, зменшення надлишкових рухів і

підвищення продуктивності обробки. Також приділяється увага автоматизації та покращенню алгоритмів для роботи з триангульованими моделями та складними формами [13].

Процес різання. Розроблено численні нові підходи до генерації та оптимізації ТРІ, спрямовані на забезпечення адаптивної швидкості подачі, згладжування траєкторій та зменшення похибок у рухах інструменту. Використовуються методи генетичних алгоритмів, кубічних сплайнів, технік оптимізації на основі проблеми комівояжера і мурашиних колоній, а також адаптивні сітки для покращення точності та ефективності ТРІ. Запропоновані підходи включають оптимізацію сил різання з урахуванням механіки процесу, визначення найкращих параметрів різання за допомогою статистичних методів і численні алгоритми для роботи зі складною геометрією заготовок. Існують як офлайн-методи (нейромережеве моделювання, діаграми Вороного, криві заповнення простору), так і більш прості, структуровані траєкторії (зигзаг, спіраль), які мають кращу інтеграцію у САМ-системи завдяки надійності та простоті впровадження. Водночас створення універсального алгоритму для складних моделей ТРІ залишається складним завданням [14].

1.1.3 Обробка з керуванням траєкторією та часом

Обробка з керуванням траєкторією. У ЧПК керування траєкторією інструменту є ключовим фактором для оптимізації часу обробки при дотриманні вимог до точності і якості поверхні. Інструмент рухається вздовж заданої ТРІ, яка апроксимується заданими точками та ділянками між ними. Контроль траєкторії здійснюється за допомогою інтерполятора, який розбиває контур на відрізки кінцевої довжини, генерує необхідну геометричну інформацію з аналітичної форми функції шляху і подає її з потрібною точністю і вчасно для продовження обробки.

Однак у контур керування положенням інструмента або заготовки не вводяться безперервні функції часу, що призводить до квантування траєкторії через чисельне визначення шляхових даних. Інтерполятор на основі збережених

даних генерує числові значення для опорних змінних кожної осі окремо, без взаємного впливу між осями. Невідповідність рухів по окремих осях викликає різницю між заданою та фактичною позицією, яка має залишатися в допустимих межах; перевищення цієї межі спричиняє збільшення коригувальної швидкості, що може викликати нестабільність і вібрації процесу.

Обробка з керуванням траєкторією базується на виборі оптимального проходження між заданими точками в локальному просторі для підвищення ефективності операції. Сканування проміжних точок відбувається після певної кількості імпульсів переміщення, тому час сканування визначається не календарним часом, а геометрично - як функція шляху та фактичного руху верстата. Параметри обробки значною мірою залежать від траєкторії руху інструмента, що впливає на відповідні корекції процесу [15].

Обробка з контролем часу. Контроль виробничого процесу в реальному часі є складним завданням. Необхідність ефективного виробництва вимагає нових стратегій для прийняття правильних рішень у прийнятний час.

Чисельне моделювання керування траєкторією інструменту у ЧПК забезпечує точну адаптацію руху інструменту на основі реальних вимірювань геометрії, сил та глибини обробки. Це дозволяє в режимі онлайн коригувати траєкторію, підвищуючи ефективність та якість обробки. Полірування контролюється тривалістю контакту інструменту з поверхнею: довший контакт забезпечує більший знім матеріалу, що є ключовим фактором для точного управління зняттям матеріалу.

Швидкість переміщення інструменту має ключове значення в обробці з контролем часу. В інваріантних за часом процесах формується профіль часу витримки, який разом із геометрією заготовки використовується для створення ЧПК-програми керування полірувальним верстатом. Під час обробки швидкість руху змінюється відповідно до цього профілю, проте технічні обмеження не дозволяють перевищувати максимальну допустиму швидкість. Через це для досягнення рівної поверхні потрібен додатковий прохід, що збільшує загальний час обробки — основний недолік таких операцій [16].

Використання функції впливу змінних часу дозволяє суттєво скоротити час процесу, оскільки полірувальний інструмент рухається з максимальною сталою швидкістю по всій робочій поверхні. Цей метод усуває надлишкову обробку, що характерна для операцій з інваріантним часом, де потрібні додаткові проходи для рівномірного зняття матеріалу. Водночас швидкість інструменту зменшується лише тоді, коли розрахункові значення зняття матеріалу перевищують максимально допустимі, що дозволяє підтримувати точність обробки без зайвих уповільнень [17].

Для скорочення часу полірування та покращення якості поверхні важливо уникнути перекриттів між послідовними проходами інструменту, забезпечуючи повне й рівномірне покриття деталі. Рівномірне покриття знижує шорсткість і запобігає появі хвилястості, яка виникає через нерівномірне зняття матеріалу при нерівномірному часі обробки. Взаємодія інструменту з деталлю, зокрема радіус кривизни, впливає на технологічні параметри, зокрема на силу обробки. Планування траєкторії з урахуванням контролю часу, на відміну від традиційного контролю траєкторії, враховує часові функції зняття матеріалу та локальні параметри для формування оптимальної стратегії, що забезпечує якісну обробку за заданий час.

1.2 Критичний аналіз літератури

В літературі підкреслюється життєздатність використання обробки з постійною висотою гребінця при плануванні траєкторії, що сприяє зменшенню похибок поверхні. Постійні гребінці зменшують нерівномірність і забезпечують рівномірне покриття функції зміни часу по всій робочій поверхні.

На основі огляду літератури можна зробити наступні висновки:

1. Комп'ютерні математичні методи представлення кривих і поверхонь є надзвичайно потужними для отримання результатів для багатоваріантних процесів. Тісний зв'язок зазначених літературних джерел з цією роботою може довести, що використання Matlab є найкращим рішенням.

2. Більшість відповідних дослідників і робіт зосереджувалися на методах інтерполяції для символізації геометричних поверхонь. У цьому дослідженні були застосовані алгоритми для досягнення покращених відрізків ліній у напрямках (x) та (y), що повністю базуються на значеннях допуску та висоти гребінця.

3. В рамках дисципліни «Обробка на верстатах з ЧПК» відносно велика частина літератури присвячена вивченню ефективних методів обробки поверхонь. Дослідження, результатом яких є розробка методів обробки поверхонь, скорочують час і вартість обробки за рахунок застосування запропонованих стратегій траєкторії руху інструменту.

4. Швидкість зняття матеріалу при шліфуванні та поліруванні в першу чергу залежить від контактного тиску, швидкості, зносу інструменту та траєкторії руху інструменту.

5. На оптимізацію накладено наступні обмеження:

- обмеження на висоту гребінця. висота гребінця між послідовними доріжками інструменту не повинна перевищувати встановлений допуск;
- обмеження локальної доступності. обмеження забезпечує усунення надлишку тканини, коли інструмент контактує з оброблюваною поверхнею;

6. При оптимізації ТРІ необхідно враховувати такі фактори, як геометрія і матеріал ріжучого інструменту, матеріал заготовки, геометрія інструменту і використання охолоджувачів. Деякі з процесів, які були виконані при оптимізації траєкторії руху інструменту, включають скорочення часу обробки, мінімізацію сил різання, модифікацію кутових перерізів і запобігання надлишковим рухам інструменту та потенційним зіткненням.

1.3 Теоретичні основи вирішення поставленої задачі

1.3.1 Геометрія траєкторії руху інструмента: короткий огляд

ТРІ - це траєкторія, по якій рухається оброблювальний інструмент. Точність траєкторії контролюється двома параметрами, що описуються за допомогою технолога/програміста. Первинний параметр визначає апроксимуючий алгоритм

стратегії обробки і відомий як поздовжня апроксимація. Воно створює послідовність відрізків вздовж траєкторії і визначається за допомогою величини допуску на траєкторію. Другим фактором точності ТРІ є поперечна апроксимація, яка визначається на час визначення кроку ТРІ (проміжок між обходами інструменту). Зменшення кроку траєкторії додатково збільшує обсяг програми ЧПК і помітно впливає на час виготовлення за рахунок збільшення кількості проходів інструменту. Алгоритми апроксимації, що використовуються для генерації ТРІ в програмному забезпеченні САМ, пристосовані до певного методу обробки [18].

У випадку, коли оброблена поверхня з естетичних або функціональних міркувань потребує додаткових технологічних операцій, таких як шліфування та полірування, виконавець робіт змушений зменшити нерівності, що залишилися від попередніх операцій. Їх форма і розмір точно визначаються величиною допуску на траєкторію руху інструмента і його кроком. Шліфування та полірування поверхні займає багато часу і негативно впливає на геометричну точність виготовлених деталей. Таким чином, оптимально підібраний і визначений метод обробки дозволяє зменшити витрати, пов'язані з додатковими технологічними операціями.

Метою фінішної обробки поверхні є якнайшвидше доведення деталі або вузла до необхідного ступеня чистоти поверхні. Наведено короткий опис того, як це зазвичай здійснюється. Терміни в цьому сегменті визначені нечітко, а точні визначення наведені в наступних розділах.

Висота ріжучої кромки та бічний крок. Щоб запобігти «надмірному» або «недостатньому» різанню, ріжучий інструмент повинен бути розміщений на поверхні таким чином, щоб поверхня інструменту та оброблювана поверхня мали спільну дотичну площину. Для різних геометрій інструменту необхідні більш сучасні, але схожі стратегії розміщення інструменту. У літературі з планування траєкторії, точка перетину поверхні з інструментом в один момент часу називається точкою контакту різця (КР-точка). КР-точка переміщується по поверхні під час процесу чистової обробки. Траєкторія КР-точки називається

поверхневим маршрутом інструмента або абсолютно траєкторією інструмента, тобто кривою поверхні (або кривою на поверхні) в математичних термінах [19].

Через те, що ріжучий інструмент не може відповідати кожній поверхні, при стандартній обробці поверхонь неминучі гребінці або горбистість готових деталей (рис. 1.2a). Однак їх висоту можна зменшити, якщо розмістити більше ТРІ з меншими інтервалами. Висота вершини обробленої поверхні, яка позначається h в межах однієї фігури, зазвичай варіюється від області до області. Вона вимірює, наскільки близько оброблена поверхня до проекрованої поверхні; при обробці важливо переконатися, що пік вершини знаходиться нижче певного граничного значення по всій обробленій поверхні. Ми називаємо це граничне значення h_o граничною висотою вершини і вимагаємо, щоб $h < h_o$.

Щоб керувати випуклостями, ми досліджуємо локальну геометрію поверхні по відношенню до інструменту, наприклад, кульової фрези. Відповідність інструменту поверхні найкраще спостерігається вздовж нормального перерізу в точці поверхні (рис. 1.2b); цей унікальний нормальний переріз перпендикулярний до «усередненої» дотичної траєкторії двох сусідніх ТРІ в 2 КР-точках, показаних в межах розрізнення. Проміжок між двома КР-факторами вздовж регулярної фази називається бічним кроком і позначається w . Виявлено, що висота вершини h збільшується зі збільшенням бічного кроку w .

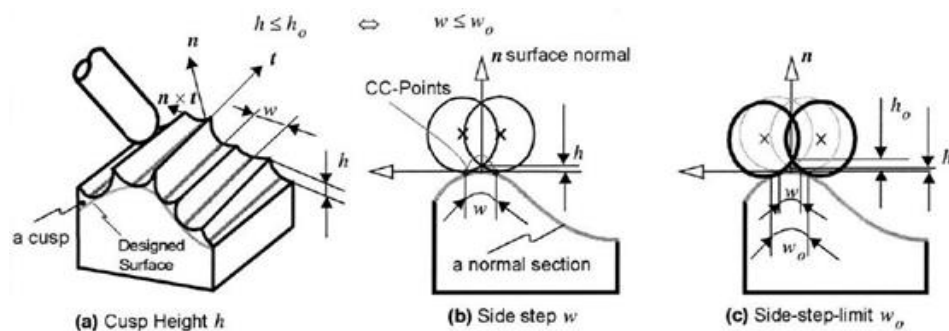


Рисунок 1.2 - Обмеження висоти уступів та бічних сходинок, що відповідають обмеженню висоти уступу [20].

Для дотичної до поверхні в точці на поверхні встановлена однозначна відповідність між бічним кроком w і висотою горба h (звичайно, для «малих» горбів). Отже, бічному кроку відповідає межа висоти піку хвилі h_o (рис. 1.2c), яка називається межею бічного кроку і позначається через w_o . Обмеження на висоту

вершини, $h < h_0$, тепер «еквівалентно» виражається наступною нерівністю: $w \leq w_0$. Ця еквівалентна форма виявляється зручнішою, ніж пряма форма. Зауважимо, що обмеження на бічний крок залежить від того, в якому напрямку рухається ріжучий інструмент - найбільш опуклий напрямок є найбільш підходящим з точки зору індивідуального ходу інструменту, оскільки він дозволяє зробити найширший розріз, іншими словами, найбільше обмеження на бічний крок.

Висота підйому і висота гребінця (ВГ) - це два терміни, існування яких взаємозалежне. Обидва ці фактори впливають на кінцеву якість роботи. Зазвичай всі операції обробки з ЧПК ґрунтуються на тому, що траєкторія руху фрези зміщується відносно сусідньої траєкторії на певну відстань. Ця відстань зсуву зазвичай називається кроком переходу. Вид зверху на траєкторію руху різця визначає картину зміщення, яка в термінах обробки називається переходом. Для кращого розуміння розглянемо графічний опис переходу при зигзагоподібному і контурному зміщенні інструменту, як показано на рис. 1.3 (1) і (2).

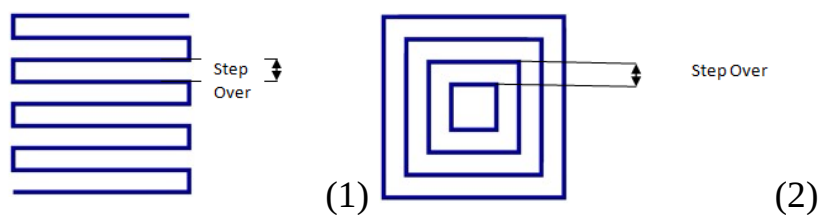


Рисунок 1.3 - 1) Траєкторія растрового інструмента;
2) Траєкторія інструмента «Контурне зміщення» [21].

Перехід часто супроводжується ВГ або висотою вершини, висотою запасу, що залишився в результаті нульової обробки - первинний продукт переходу, ефект якого можна побачити тільки при вивченні збоку. Це відбувається з тієї причини, що жоден інструмент не має прямолінійної геометрії. Викривлення інструменту призводить до того, що певна частина поруч з КР-точкою не має контакту з поверхнею, що призводить до утворення запасу, і коли інструмент переходить на наступну траєкторію, висота гребінця виділяється. Це небажаний фактор, який призводить до надлишкової обробки, а отже, і до збільшення витрат. На рис. 2.4 інструмент рухається вправо і вліво. Коли інструмент робить зсув, частина поверхні залишається недоторканою, і ця область позначена червоним кольором. Висота від поверхні до вершини залишку запасу є висотою гребінця.

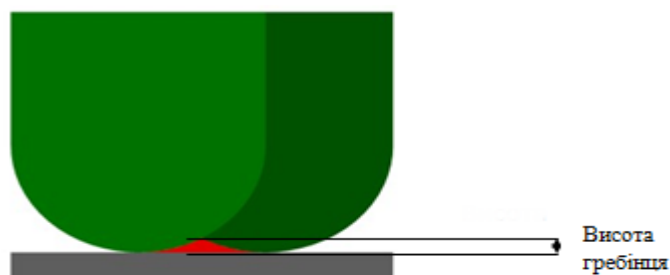


Рисунок 1.4 - Гребінець показаний червоним кольором між сусідніми фазами [22]

Крок переходу має пропорційну залежність від висоти гребінця. Збільшення кроку перекриття відображатиме пропорційне збільшення висоти гребінця. Однак на їх пропорційне співвідношення також може впливати діаметр інструмента. Діаметр визначає площу кривизни інструмента. Більший інструмент створює менший гребінь, що, в свою чергу, означає кращу обробку поверхні. Розглянемо наступну схему (рис. 1.5) для правильного розуміння цієї концепції. Площа гребінця позначена червоним кольором і має набагато меншу площу, коли діаметр інструменту великий - на правому рисунку поверхня має кращу якість обробки.



Рисунок 1.5 - Висота гребінця з меншим і більшим діаметром інструменту [22]

Можна зробити висновок, що якість обробки поверхні визначається рядом взаємопов'язаних параметрів. Вважається, що менший крок обробки має перевагу над більшим кроком при однаковому діаметрі інструменту. Але «якість» відносна і залежить від бажаної специфікації. Хоча менший крок забезпечує кращу обробку поверхні, це призводить до втрати часу на досягнення якості. І навпаки, більший крок економить час і вартість обробки, але жертвує якістю.

Отже, висота гребінця/зубця визначається комбінацією типу і діаметра інструменту та кроку переходу; в основному, що менший крок переходу, то менша висота гребінця або нижча висота зубця. Але це не завжди єдиний визначальний фактор, оскільки інструмент, який використовується, впливає на висоту гребеня, незалежно від розміру сходинки. Висота гребеня набагато

важливіша для кінцевої якості обробки, оскільки вона поєднує в собі всі змінні, які впливають на кінцеву якість роботи.

1.3.2 Загальна процедура генерації траєкторії руху інструмента

На етапах розробки виробу може застосовуватися пряме або зворотне проєктування (рис. 1.6).

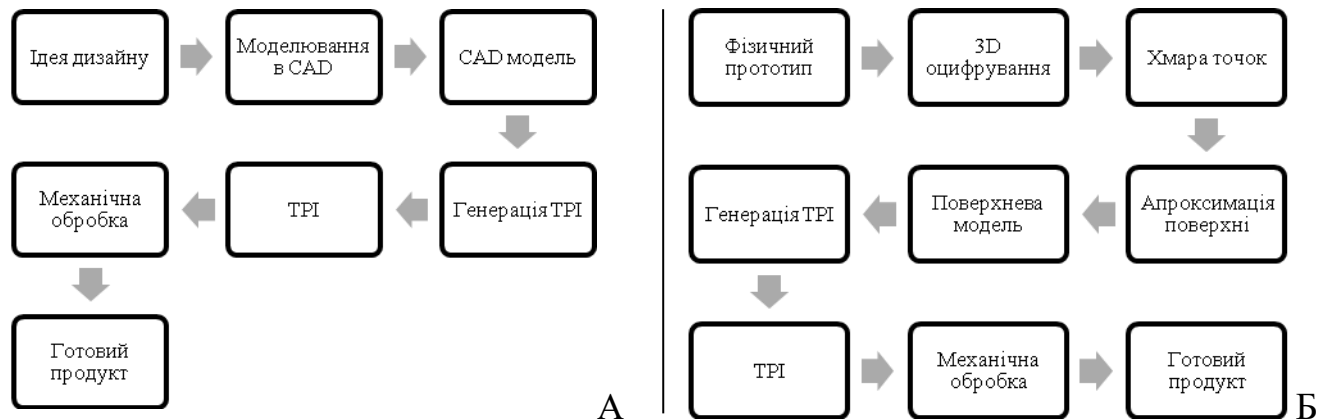


Рисунок 1.6 - Загальний робочий процес прямого інжинірингу (А); зворотного інжинірингу (Б) [23]

При прямому інжинірингу спочатку проєктується тривимірна твердотільна версія виробу в CAD-платформі та збирається інформація з CAD. Потім генерується відповідна статистика ТРІ, а виріб виготовляється з використанням точного виробничого методу (обробки з ЧПК). Однак при зворотному інжинірингу геометрична інформація повинна бути отримана безпосередньо з фізичної форми, і ця інформація перетворюється у формат, придатний для обчислень різними методами подальшої обробки.

1.4 Поточні дослідження - актуальність автоматизації

Сучасне промислове середовище потребує скорочення виробничих циклів через тиск на виробничі витрати. Шліфування є дорогим, тривалим, трудомістким і схильним до помилок процесом. Високий рівень автоматизації та контролю виробничих процесів сьогодні не відображається на процесах абразивної обробки,

де висококваліфіковані працівники витрачають величезний час і ресурси на ручне або напів-автоматизоване полірування.

У виробничих операціях значна частина виробничих витрат і часу припадає на шліфування. Існуючі автоматизовані методи шліфування та полірування майже не застосовуються до поверхонь вільної форми. Це змушує виконувати процес вручну.

Ручне шліфування пов'язане з високим ризиком травмування внаслідок взаємодії оператора з рухомими механізмами. Тому останніми роками багато ресурсів виділяється на зменшення взаємодії між оператором і машиною. Цей процес також споживає велику кількість ресурсів і часу, оскільки він є трудомістким і тривалим. Водночас він значною мірою покладається на кваліфіковану працю, коли оператор використовує свій досвід і судження, щоб довести поверхню деталі до відмінного рельєфу та шорсткості. Помилки, допущені людиною-оператором на цьому етапі, можуть також призвести до дорогої переробки та відбраковування.

Для того, щоб підвищити економічну ефективність і зменшити вплив людських помилок, життєво важливо автоматизувати процес обробки поверхонь. Як спроба скоротити виробничі цикли, автоматизоване шліфування стало предметом експериментів і досліджень. Існуючі процеси шліфування стали більш складними і потребують надзвичайних здібностей кваліфікованого майстра.

Промисловий робот може імітувати кінематичні характеристики людини з тією перевагою, що він може виконувати рухи майстра з більшою швидкістю. Було б важко уявити зростання продуктивності, якби ручні методи обробки не були автоматизовані. Усталені процедури шліфування, що виконуються вручну, повинні бути автоматизовані за допомогою робота з комп'ютерним управлінням. Це призведе до інкапсуляції знань, одночасно створюючи середовище, сприятливе для безперервного навчання.

Потенційний вплив автоматизованих технологій шліфування може бути перенесений на різні сектори промисловості, де цей процес широко використовується в медичних виробках, компонентах турбін, автомобільних

деталях і мехатронних компонентах тощо. На рис. 1.7 показано роботизоване полірування автомобільних компонентів.



Рисунок 1.7 - Автоматизоване шліфування [24]

Загалом, враховуючи, що верстати конструктивно дуже жорсткі і підходять для завдань, які вимагають участі оператора, більшої точності або великої сили обробки, існує два типи систем-кандидатів на автоматизовану фінішну обробку:

- комерційні роботи - маневрені, але з меншим корисним навантаженням, здатні позиціонувати та орієнтувати кінцевий інструмент відповідно до форми та контуру поверхні деталі;
- шліфувальні верстати з ЧПК - добре підходять для обробки поверхонь довільної форми, де потрібна висока швидкість обертання інструменту і висока об'ємна продуктивність зняття матеріалу.

На рис. 1.8 показана промислова робото-технічна система шліфування, в якій інструмент утримується нерухомо, в той час як елемент прикріплений до кінцевого ефектора.



Рисунок 1.8 - Процес полірування роботом [24]

Планування траєкторії шліфування є одним з аспектів, що становлять інтерес до роботів-шліфувальників - це сукупність точок в робочому просторі, які

маніпулятор повинен пройти, виконуючи заданий рух. Траєкторія шліфування визначається серією ліній або дуг, які називаються даними про розташування фрези, і генеруються за допомогою комерційних CAD/CAM-пакетів. Згодом генеруються виконувані виробничі коди.

Реалізація автоматизації в складних процесах абразивної обробки є безцінною пропозицією і буде ефективно сприяти значному скороченню витрат в галузі в найближчі десятиліття.

2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Методологія дослідження

У дослідженні нами застосовано описовий підхід з наступним математичним моделюванням розробки, коли дані спостерігаються та аналізуються за допомогою симуляцій, а результати згодом виводяться на основі аналізу в вигляді моделі. На рисунку 2.1 зображено методологію, яка була використана в даному дослідженні.

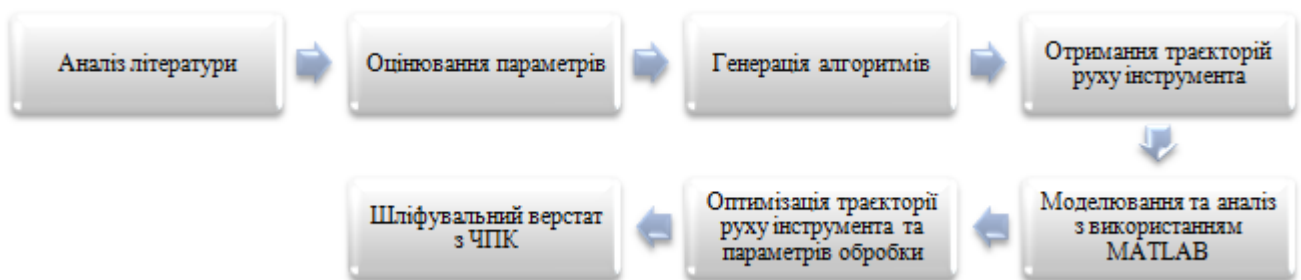


Рисунок 2.1 - Методологія дослідження

Дані, що базуються на меті дослідження (траєкторія руху інструмента (ТРІ) та оптимізаційні параметри (ОП)), аналізуються з літературних джерел та оцінюються для подальшого використання в дослідженні. Далі вони переводяться у вимоги проєкту, їхній діапазон звужується для подальшого прогнозування. Планування ТРІ виконується шляхом генерації відповідних алгоритмів ТРІ на мові програмування MATLAB, а отже, ТРІ отримуються з алгоритмів.

Наступний крок - з MATLAB екстрагується симуляція функції виведення інструмента зі згенерованим рухом інструмента або траєкторією інструмента. Отримані ТРІ оптимізуються на двох рівнях: візуальна оптимізація симуляції шляхом зміни значень змінних і проведення планування експерименту, котре виконується за допомогою методу оптимізації Тагучі, який перевіряє візуальну оптимізацію першого рівня. Під час процесу розглядаються і оцінюються такі параметри, як ТРІ, вплив різних параметрів, пов'язаних з процесом шліфування з ЧПК, таких як швидкість, тиск, ширина різання, глибина різання, на зняття

матеріалу. Це забезпечує виведення алгоритмів ТРІ, які можуть бути подані в якості кодів ЧПК на верстат.

2.2 Альтернативні методи

Розробка ефективного алгоритму планування ТРІ є важливою, оскільки якість шляху впливає на ефективність роботи всієї програми. Розроблена траєкторія повинна відповідати набору оптимізаційних характеристик, включаючи час обробки, споживання енергії та пройденої відстань, яка має прямий вплив на час та енергію.

2.2.1 Методи генерації траєкторії руху інструмента

Традиційний метод побудови ТРІ, що використовується в промисловості, полягає у визначенні точки контакту різця з поверхнею деталі, а потім зміщення цієї точки для отримання положення різця. Точка контакту різця (КР) - це місце, де інструмент торкається поверхні деталі. Розташування різця (РР) - це розташування центра інструмента. Існує ряд методів створення інструмента, які популярні в промисловості. Розглянемо найпоширеніші з них.

Ізопараметричний метод є одним з найпростіших алгоритмів побудови ТРІ, в якому КР визначаються вздовж ізопараметричних ліній на поверхні деталі. Ізопараметричні лінії - це криві з постійним значенням параметра на поверхні деталі. Ізопараметричні криві апроксимуються відрізками ліній (рис. 2.2). Однак, якщо лінійні відрізки великі, це може призвести до підрізів на скульптурних поверхнях моделі [25].

Траєкторії руху інструмента, як правило, страждають від надлишкової обробки. Окрім простоти процедури, немає жодних вагомих підстав стверджувати про «ефективність» ізопараметричної траєкторії інструмента. Ізопараметрична генерація траєкторії вимагає визначення найменшого інтервалу руху інструмента на кожному сусідньому шляху. Інтервал траєкторії інструмента використовується як постійне зміщення в наступній ТРІ.

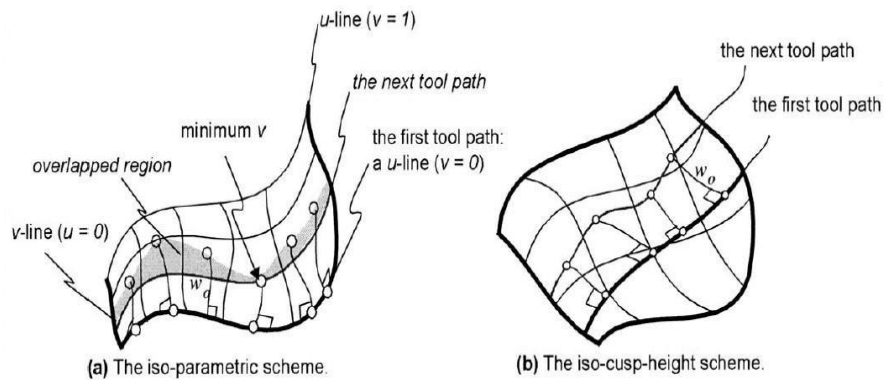


Рисунок 2.2 - Дві відомі схеми генерації ТРІ [26]

За винятком декількох окремих поверхонь деталі, генерація безперервних ізопараметричних траєкторій інструмента для складних поверхонь, як правило, неможлива. ТРІ набагато щільніші на одній поверхні, ніж на інших, через нерівномірне перетворення між параметричним і евклідовим просторами, що призводить до різного розподілу висоти залишкового гребінця і неоптимального часу обробки.

Ізопланарний алгоритм є одним з найбільш ранніх методів генерації ТРІ. У цьому алгоритмі інструмент рухається по плоских перерізах, створених шляхом перетину заданих поверхонь з набором паралельних площин. Цей підхід також називається декартовим плануванням траєкторії інструмента. У цьому алгоритмі, замість параметричних приростів, для переміщення площини розрізу по поверхні потрібно отримати відстань в напрямках u і v . Інтервал шляху або відстань між вертикальними площинами визначається на основі обмеження висоти залишкового гребінця. Генерування траєкторій інструмента вздовж плоских кривих перетину є дуже поширеним методом. Недоліками використання цього алгоритму є велика довжина траєкторії інструмента та нехтування геометрією деталі [27]. Схематична ілюстрація траєкторії ізопланарної обробки показана на рис. 2.3.

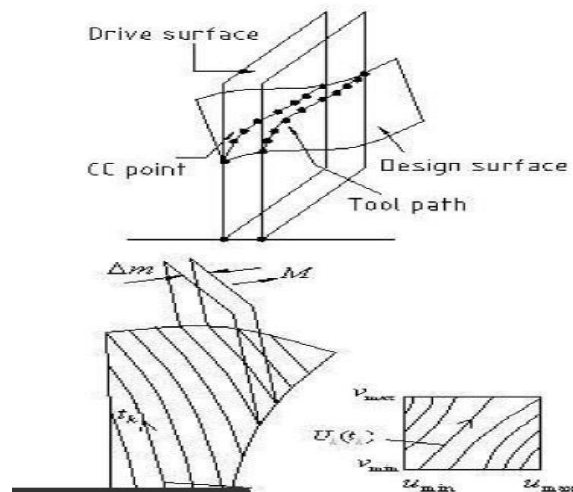


Рисунок 2.3 - Ізопланарні траєкторії обробки [27]

Декартовий метод. На відміну від визначення дій інструмента на основі параметрів поверхні деталі, декартовий метод дозволяє оператору генерувати траєкторії інструмента з прив'язкою до глобальних декартових координат X - Y - Z . Генератор траєкторії інструмента приймає координати X - Y положення різця в якості вхідних даних і обчислює значення Z положення різця. Миттєве положення інструмента також перевіряється на наявність строжки. Цей підхід складніше реалізувати для параметричних криволінійних поверхонь у порівнянні з ізопараметричною технікою. Це пов'язано зі складністю обчислення взаємозв'язку точок контакту різця [28].

Метод зміщених поверхонь концептуально подібний до декартового підходу. Ця методика генерує ТРІ за допомогою зміщення поверхонь деталі на радіус інструмента. Центр ріжучого інструмента переміщується вздовж зміщеної поверхні для обробки деталі, а ТРІ розраховується шляхом обчислення проходів інструмента по зміщеній поверхні. Однак, при виконанні алгоритму зміщеної поверхні необхідно виявити й виправити самоперетин ТРІ, що призводить до надрізу або порожнин підрізу. Е. Lee [29] згенерував гвинтовий хід інструмента для зміщених поверхонь з постійною висотою залишкового гребінця.

Шляхи зміщення є альтернативно складними геометричними об'єктами, а знаходження шляхів зміщення є глобальною проблемою, оскільки шукається глобальний мінімум відстані. Шляхи зміщення викликають значний інтерес через те, що вони описують зміщений маршрут інструментального центру. Траєкторії

зміщення забезпечують бажану точність на виготовленому елементі. З усіх доступних алгоритмів ТРІ, цей пропонує потенціал надання користувачеві прямого контролю над точністю виготовленої деталі [30].

2.2.2 Методи моделювання

Інтеграція систем автоматизованого проєктування та розрахунку (САПР або CAD) та автоматизованого виробництва (CAM) у промислову практику завжди була ключовим підходом до підвищення виняткової якості продукції та оптимізації часу виробництва. Методи CAD допомагають створювати порівнянну геометрію для швидкого пошуку електронних документів, в той час як CAM надає можливість відображати, контролювати і створювати ТРІ. Сучасні програмні пакети CAM пропонують повний набір верстатів і віртуальне середовище налаштування верстатів для динамічного моделювання операцій обробки. Динамічне моделювання допомагає у створенні, перевірці та вдосконаленні ЧПК-кодів. Це також корисно для виявлення помилок зіткнення. Моделювання процесу дозволяє дослідити і підтвердити дизайн ще до того, як буде виготовлено прототип.

2.2.3 Методи оптимізації траєкторії руху інструмента

Евристичні стратегії виявилися корисними в багатьох сферах застосування оптимізації в реальному житті. Найвідоміші методи, генетичні алгоритми, пошук за заборонами, імітація відпалу, оптимізація мурашиних колоній та оптимізація рою частинок, коротко описані нижче.

Генетичні алгоритми (ГА) запозичені з процесу біологічної еволюції. ГА ініціалізується скінченною множиною потенційних рішень, яка називається популяцією. Кожен потенційний розв'язок, який називається індивідуумом, може бути представлений у вигляді двійкового коду, фактично закодованого цілого числа або взятого з фіксованого алфавіту символів. Ці відповіді оцінюються за допомогою функції пристосованості (зазвичай цільової функції), і найбільш

пристосованим індивідам присвоюється висока ймовірність «відтворення» в наступному поколінні рішень. Усередині системи, що відтворюється, нові нащадки успадковують ознаки батьків (кросинговер) і піддаються мутаційним коригуванням. Нові нащадки приймаються за допомогою численних критеріїв, щоб сформувати пул нової популяції. ГА продовжує генерувати більш сприятливі рішення, поки не збігається до популяції з розподілом правильних рішень [31].

Пошук за заборонами - це метаевристичний метод, заснований на підході локального пошуку, який ітеративно переміщує поточний ітератор до сусіднього розв'язку, доки не буде задоволено певний критерій. Алгоритм допускає перехід до сусіднього розв'язку, який має гірше цільове значення. Тим часом, щоб запобігти поверненню до попередніх відповідей або нескінченним циклам, ведеться й оновлюється перелік табу або заборонених ходів [32].

Імітаційний відпал шукає сусідів, випадковим чином переміщуючись зі списку точок-кандидатів на сусідство. Якщо зустрічається краща точка-сусід, вона замінює поточний ітераційний цикл з ймовірністю, що дорівнює одиниці, а якщо гірша, то зі значенням ймовірності, строго меншим за одиницю. Ідеальне значення ймовірності визначається за допомогою різниці цільових значень. Для того, щоб алгоритм збігався, ймовірність переміщення ближче до гіршої точки повинна зменшуватися на кожній ітерації в міру зменшення додатного значення «температури» (температура — це параметр, який контролює ступінь випадковості в пошуку і поступово зменшується протягом ітерацій, забезпечуючи збіжність алгоритму до оптимального розв'язку) [33].

Оптимізація мурашиних колоній (ОМК) для задачі комівояжера. Метод був представлений Марко Доріго [34]. Задача комівояжера - це метод оптимізації, який можна розглядати як комівояжера, який вирушає зі своєї батьківщини, щоб відвідати певні міста клієнтів за найкоротший час, не відвідуючи жодне місто двічі в процесі. TSP (Time Stamp Protocol - протокол штамп часу) можна представити у вигляді повного зваженого графа, де вершинами (вузлами) є множина міст, що являє собою сукупність дуг. Кожній дузі присвоєно значення (довжину), тобто відстань між містами i та j .

Було описано застосунки, що використовують цей алгоритм. Наприклад, у роботі простий ОМК був застосований для отримання найкращого маршруту для мобільного робота. ОМК застосовувався для налаштування нечітких параметрів нечіткого логічного контролера для колісного мобільного робота, надається порівняльна оцінка ОМК і генетичних алгоритмів, застосованих для оптимізації нечітких систем (рис 2.4). У деяких випадках, перед включенням «феромону», маршрути, побудовані за допомогою мурах, можуть бути покращені за допомогою процедури локального пошуку.

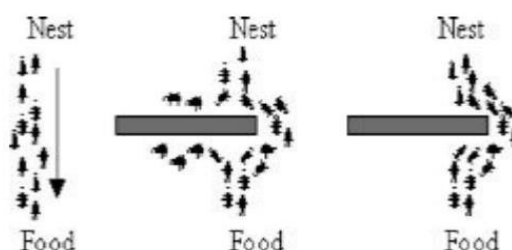


Рисунок 2.4 - Ілюстрація поведінки руху мурах в ОМК [35]

Оптимізація рою частинок - це форма еволюційного обчислювального підходу (підхід до пошуку, повністю заснований на природних системах), розроблений Кеннеді та Еберхартом. ОРЧ, як і генетичний алгоритм (ГА), є інструментом оптимізації на основі популяції (рою). Однак, на відміну від ГА, кросинговер і мутація в рої частинок відбуваються одночасно. Однією з найважливіших відмінностей між роєм частинок і звичайними еволюційними методами обчислень є те, що швидкості частинок регулюються, тоді як еволюційні індивідуальні позиції впливають на них; це виглядає так, ніби змінюється «доля», а не «стан» індивідуумів рою частинок [36].

Система спочатку має популяцію випадкових рішень. Кожному потенційному рішенню, яке називається часткою, надається випадкова швидкість, і воно пролітає через проблемний простір. Частинки мають спільну пам'ять, а кожна частинка пам'ятає попереднє найкраще положення і відповідну фізичну форму. Попереднє найкраще значення називається « p_{best} ». Таким чином, p_{best} асоціюється лише з конкретною частинкою. Є також ще одне значення, яке називається « g_{best} », що є найкращим значенням серед усіх частинок p_{best} у рої. Основна концепція методу ОРЧ полягає у прискоренні кожної частинки у

напрямку її p_{best} та g_{best} , а також її місцезнаходження на кожному часовому кроці. Прискорення має випадкову вагу як для p_{best} , так і для g_{best} локацій. Рис. 2.5 надає огляд підходу ройового інтелекту. У локальній версії ОРЧ g_{best} змінюється за допомогою l_{best} , а вся процедура залишається незмінною.

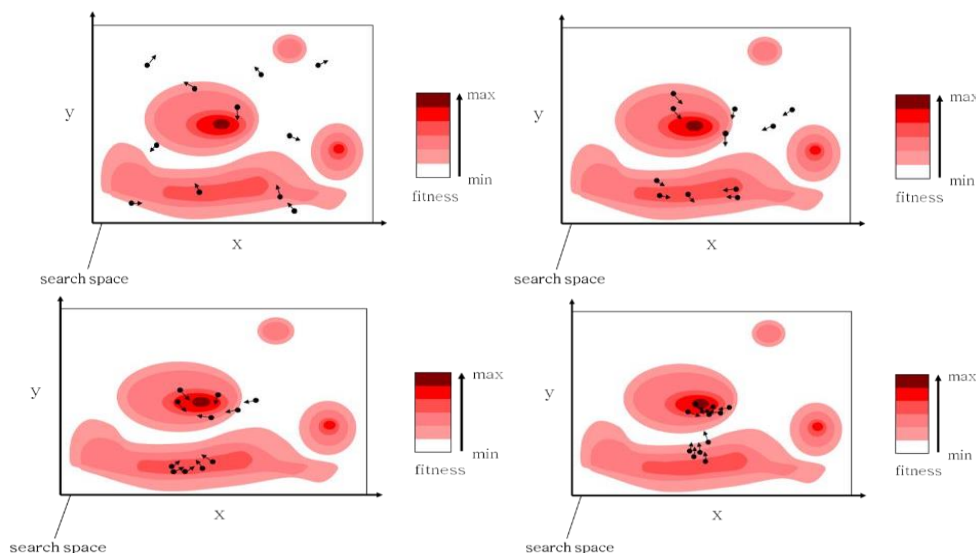


Рисунок 2.5 - Оптимізація рою частинок [36]

Евристичний підхід до оптимізації. Оптимізація фінішних операцій з контрольованим часом може бути досягнута за допомогою евристичного алгоритму (ЕА), який може вивести оптимальну комбінацію параметрів. Для цього необхідно написати скрипти оптимізації в MATLAB, а ЕА може бути використаний з інструментарію глобальної оптимізації, який підтримує змішану цілочисельну оптимізацію. Задача має бути визначена шляхом визначення змінних, які впливають на профіль похибки поверхні, де метою може бути визначення правильної комбінації параметрів процесу, яка може забезпечити необхідний рівень якості поверхні. Оцінка може бути виконана за допомогою ЕА і моделі *SimEvents* для пошуку оптимальної комбінації шляхом встановлення таких змінних, як ТРІ, тиск, швидкість, діаметр інструмента і крок переходу. *SimEvent* дуже тісно інтегрована в MATLAB, де маніпуляції з вхідними даними можна аналізувати та оптимізувати на основі моделі.

Далі створюється скрипт для оптимізації, який включає в себе: код, який налаштовує оптимізацію, значення, які обмежують межі змінної відгуку, що підлягає оптимізації, і аргументи, які викликають ЕА, який називається цільовою функцією. Це функція, яку ЕА мінімізує, в даному випадку це відношення E/R .

Значення функції оптимізації встановлюється у змінну, і ці змінні потім використовуються для встановлення цих значень у моделі *SimEvents*. Евристичний алгоритм походить з інструментарію глобальної оптимізації і вирішує проблеми оптимізації шляхом безперервної модифікації популяції окремих точок: змінних процесу. Моделювання повторюється для різних значень змінних, поки алгоритм не знайде оптимальне рішення [37].

2.3 Критичний аналіз альтернативних методів

Проведено детальний аналіз альтернативних методів та підходів до оптимізації процесу шліфування можемо провести їх критичний аналіз, виділивши переваги та недоліки, що актуалізує подальшу реалізацію методології даного дослідження. Критичну оцінку традиційних підходів виконаємо з урахуванням факторів, які охоплюють як контрольовану за траєкторією, так і контрольовану за часом обробку. Основну увагу приділимо оптимізації ефективності процесу шляхом усунення стратегій, які призводять до надмірності.

Генерування траєкторії. Серед існуючих підходів до генерації ТРІ можна виділити ізопараметричний, ізопланарний, ізофотний та ізокуспідальний методи.

Ізопланарний метод планування ТРІ є одним з найпростіших підходів до планування траєкторії. ТРІ плануються як криві перетину поверхні деталі з рядом паралельних площин. Відстань між двома сусідніми площинами визначається приблизно. В цьому алгоритмі все ще є деякі очевидні недоліки, притаманні цьому алгоритму:

1) оскільки нормалі точок КР на поверхні спрямовані в різні боки, хоча точки КР знаходяться на одній кривій площини перетину, пов'язані з ними точки РР можуть не лежати в одній площині - це може призвести до просторової кривої різки, де виявлення строжки буде складним;

2) якщо на поверхні є ділянки, де нахили поверхні близькі до площини перетину, інтервали ТРІ будуть розподілені нерівномірно. Ця проблема не може бути вирішена шляхом регулювання інтервалів ТРІ, оскільки бічні кроки інструмента є постійними для повної ТРІ. Нерівномірний розподіл інтервалів

може призвести до появи надлишкових траєкторій і, таким чином, значно збільшити загальну довжину ТРІ;

3) генерування траєкторії в паралельних площинах призводить до нерівномірних гребінців.

Метод ізопараметричної генерації ТРІ використовує ізопараметричні криві з поверхонь деталі як ТРІ для обробки поверхні, але крок між парою сусідніх ТРІ в цьому методі визначається консервативно. Однак застосування цього методу генерації траєкторій обмежене з наступних причин:

1) застосування алгоритму обмежене параметричними поверхнями;

2) просторові ТРІ, створені цим методом, ускладнюють керування подачами ЧПК для змінних об'ємів різання, що призводить до викривленої просторової кривої - це ускладнює виявлення строжки;

3) нерівномірна 3D-відстань між ізопараметричними кривими може призвести до надлишкової або недостатньої обробки.

Ізофотний метод займається тільки виявленням перешкод уздовж попередньо визначених ТРІ й усуненням сегментів ТРІ, які можуть викликати пошкодження.

Змінна відстань зміщення при генерації викликає топологічні проблеми, такі як петлі й горби під час зміщення.

Моделювання. Програмне забезпечення CAD/CAM допомагає генерувати симуляції ТРІ, наявних у базі даних, за допомогою параметрів, визначених користувачем, тоді як його застосування обмежене в створенні та моделюванні конкретних ТРІ та інновацій.

Хоча програмне забезпечення CAM корисне для оцінки часу обробки та визначення місця розташування помилок, йому не вистачає графічного представлення зняття матеріалу в залежності від часу в цілому або на певній ділянці робочої поверхні. Однак вони ефективні для оптимізації процесу.

Оптимізація. Генетичний алгоритм (ГА), як випливає з назви, - це алгоритм, що самонавчається на основі вхідних параметрів і своєї цільової функції. Незважаючи на те, що генетичний підхід є високоефективним

інструментом оптимізації в різних застосунках, у методу існує небагато, але потенційних проблем:

1) випадкові зміни значень у рядку призводять до появи дочірніх елементів у результаті кросинговеру, які можуть менш ефективно відповідати цільовій функції. Стратегія визначення ефективного кросинговеру не передбачена ГА, оскільки нова популяція створюється шляхом випадкового змішування генів батьків, пристосованість яких змінюється. Рядки, по суті, змінюються на протилежні шляхом заміни збережених двійкових цифр за допомогою процесу, відомого як мутація, що є екстравагантністю і збільшує час обчислень при оптимізації;

2) ГА може працювати з десятковими та неперервними змінними, а не лише з цілими числами. Однак, оскільки ГА обчислює шляхом попереднього перетворення значень у двійкові цифри, завдання обчислень стає складнішим, а отже, зі збільшенням необхідної точності різко зростає і кількість бітів;

3) клонування популяції відбувається в результаті випадкових експериментів. Клонована популяція відіграє життєво важливу роль у визначенні значення пристосованості. Випадкові експерименти іноді можуть призвести до створення меншої кількості копій особин з вищою пристосованістю. Це продовжує час, необхідний для досягнення бажаної оптимізації, оскільки наступні кросинговери відбуваються між генами з меншим значенням пристосованості;

4) ще одним недоліком ГА є його некерована мутація - це призводить до повільної збіжності.

Оптимізація роєм частинок може працювати з задачами оптимізації на коротких відстанях, але має і свої недоліки:

1) метод страждає від часткового оптимізму, що робить його менш точним при регулюванні швидкості та напрямку;

2) метод не може безпосередньо розв'язувати задачі розсіювання та оптимізації;

3) метод не може розв'язувати задачі в несиметричній системі координат, такі як правила руху частинок в полі.

Оптимізація мурашиних колоній підсумована в твердженнях, наведених нижче:

- 1) теоретичний аналіз є складним, має більше експериментальних спостережень;
- 2) метод включає послідовність випадкових рішень (не незалежних);
- 3) розподіл ймовірностей змінюється з кожною ітерацією, що призводить до ускладнення алгоритму;
- 4) час збіжності до рішення є невизначеним.

Метод пошуку заборон образно полягає у підйомі «на пагорб» у найкрутішому напрямку й зупинці на вершині, а потім рух вниз у пошуку іншого «пагорба» для підйому. Недоліком є те, що багато ітерацій витрачається на підйом на кожен пагорб, а не на пошук найвищого пагорба.

Оптимізація імітаційного відпалу стає неефективною для складних процесів:

- 1) повторюваний графік відпалу дуже повільний;
- 2) метод відстає в пошуку рішення для відносно гладких поверхонь;
- 3) метод не має знань про оптимальний розв'язок.

2.4 Реалізація методології дослідження

2.4.1 Створення траєкторії інструмента

Изогребінчаста обробка. Геометричні фактори, що мають відношення до побудови траєкторії в даній роботі, опишемо в цьому параграфі (рис. 2.6). Як і в більшості літературних джерел з автоматизованого виробництва, траєкторія розташування різця (РР) являє собою траєкторію центру різця для обраної ТРІ. Траєкторія контакту різця (КР) являє собою тангенціальну траєкторію між інструментом і поверхнею деталі. При обробці тривимірної поверхні, траєкторія РР знаходиться на зміщеній поверхні. Вона створюється шляхом зміщення поверхні заготовки всередині напрямку нормалі поверхні на величину, що дорівнює радіусу фрези (алгоритм зворотного зміщення інструмента) (рис. 2.7).

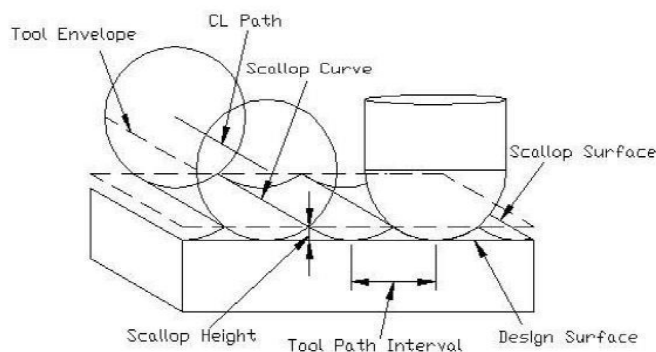


Рисунок 2.6 - Геометричні елементи обробленої поверхні [38]

Ця поверхня зміщення відома як поверхня центру інструмента. Коли ріжучий інструмент рухається вздовж ТРІ, створюється огинаюча поверхня інструмента. Цей контур можна описати за допомогою розгортання кола радіуса різця вздовж траєкторії РР. Горизонтальна відстань між сусідніми ТРІ відзначається як інтервал ТРІ або бічний крок, що призводить до утворення залишкового гребінця (ЗГ) на обробленій поверхні.

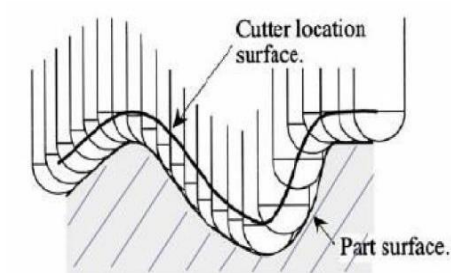


Рисунок 2.7 - Створення поверхні РР з проєктної поверхні [38]

Крива ЗГ визначається як тривимірна крива, яка відслідковує оброблену поверхню. Висота ЗГ являє собою відстань між кривою ЗГ і поверхнею розкладки. Для обробки з постійною висотою ЗГ, криві ЗГ знаходяться на зміщеній поверхні (поверхня ЗГ) площини розкладки з висотою ЗГ як відстанню зміщення. Насправді гребінчаста крива - це звичайна крива перетину двох огинаючих поверхонь суміжних ТРІ.

ТРІ для обробки з постійною висотою ЗГ визначається за допомогою двох послідовних кроків:

1) задана ТРІ та вимога до висоти ЗГ використовуються для визначення відповідної кривої ЗГ всередині напрямку бічного кроку;

2) відома крива ЗГ використовується для визначення наступної ТРІ.

На рис. 3.8 показані суміжні траєкторії РР і загальна крива ЗГ для оброблюваної поверхні. Для точки на траєкторії 1 РР площина, перпендикулярна до її дотичної, перетне криву ЗГ і буде лежати на окружності радіуса фрези в перпендикулярній площині. Дотична до гребінцевої кривої при в загальному випадку не паралельна дотичній до РР. Водночас площина, перпендикулярна до дотичної до кривої ЗГ, перетинає наступний маршрут РР (траєкторія 2 РР) і лежить на колі радіуса фрези з центром у перпендикулярній площині. Тангенс кута нахилу траєкторії 2 РР не паралельна тангенсу кута нахилу кривої ЗГ. Планування траєкторії базується на припущенні, що ці дотичні вектори паралельні [38].

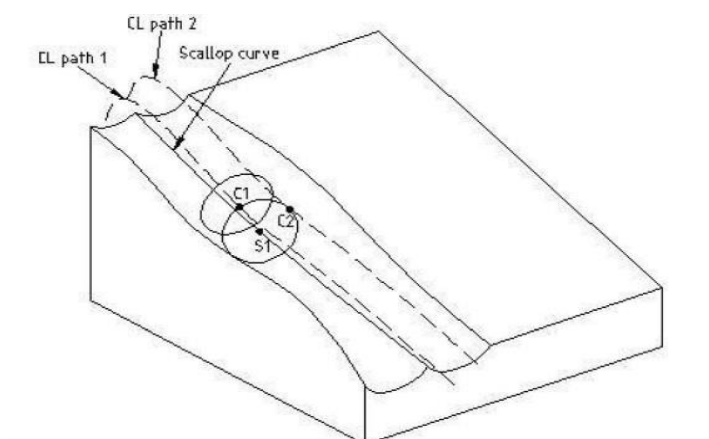


Рисунок 2.8 - Типові суміжні шляхи РР та спільна крива ЗГ [27]

Схема висоти ізовершин зберігає висоту кожної вершини рівною граничній висоті вершини, змінюючи обмеження $h_s < h_0$ або $w < w_0$ на вимогу рівності $h = h_0$ або $w = w_0$ [27]: крива поверхні вибирається як перша ТРІ; спостерігаються нові точки, зміщені від першої ТРІ на відстань граничного бічного кроку w_0 , як і раніше; інтерполяція такого нового набору точок визначає наступну ТРІ; етапи повторюються. Ця схема є крайнім випадком, який мінімізує кількість перекриттів обробленої ділянки. Однак, в цій схемі ТРІ можуть бути вирівняні неефективно.

Нагадаємо, що в ізопараметричному алгоритмі інструмент рухається вздовж паралельних площин, тобто, можна керувати лише максимальною висотою ЗГ між сусідніми траєкторіями. Для того, щоб керувати висотою ЗГ, вся ТРІ повинна

бути підтягнута. Ця стратегія забезпечує постійну висоту ЗГ і тому відома як алгоритм ізогребінця. Хоча висота ЗГ залишається незмінною вздовж ТРІ, крива ЗГ побудована таким чином, щоб лежати на поверхні висоти ЗГ. Починаючи з базової траєкторії, обчислюється крива перетину прочищеного об'єму з поверхнею постійної висоти ЗГ. На основі розрахованої кривої визначається суміжний шлях [39].

Згущення даних. Різниця між нелінійною кривою і вихідним відрізком називається нелінійною похибкою. ТРІ, що ігнорує нелінійність, не підходить для обробки. Тому важливо оптимізувати ТРІ в постпроцесорі для підвищення точності та плавності траєкторії.

Нелінійна похибка займає ключову позицію в геометричних похибках 5-координатних верстатів. Згущення даних - це найпоширеніший і найефективніший метод боротьби з нею (рис. 2.9).

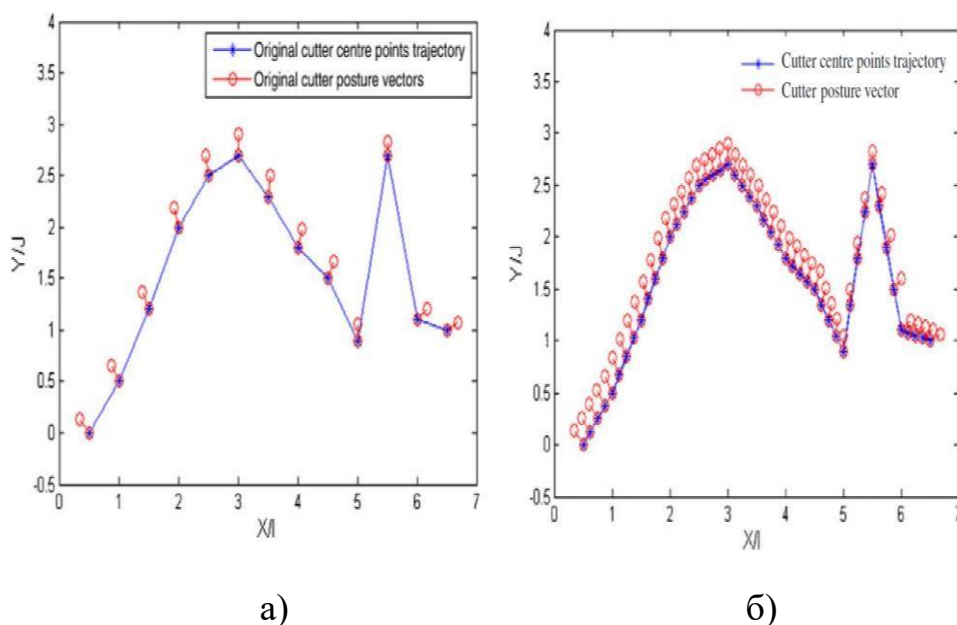


Рисунок 2.9 - Фрагмент оригінальної траєкторії інструмента, створеної за допомогою САМ-ПЗ (а); траєкторія інструмента за допомогою ущільнення даних (б) [40]

2.4.2 Математичне моделювання

На відміну від традиційного програмного забезпечення CAD/CAM, у цьому дослідженні генерація ТРІ, математичне моделювання функції знімання та оцінка

обсягів знімання матеріалу виконуються в середовищі MATLAB. MATLAB, широко застосовуваний у прикладній математиці, є програмним засобом, назва якого розшифровується як MATRIX LABORATORY. Його архітектура побудована навколо векторів і матриць, що робить MATLAB особливо корисним для виконання операцій лінійної алгебри. MATLAB забезпечує ефективне розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь, а також чисельного інтегрування. Водночас MATLAB є мовою програмування, подібною до C, яка відзначається простотою у написанні математичних програм та пропонує низку спеціалізованих рішень для конкретних застосувань, що дозволяє користувачам працювати з технологіями різного призначення.

Інструментарій MATLAB являє собою набір функцій, розроблених для вирішення унікальних класів задач у таких сферах, як обробка сигналів, системи керування, нейронні мережі, вейвлети, нечітка логіка, імітаційне моделювання та оптимізація траєкторій інструмента. У цьому дослідженні MATLAB демонструє свою ключову ефективність у визначенні часу знімання матеріалу з робочої поверхні, що є важливим аспектом досліджуваного процесу.

2.4.3 Оптимізація процесу

Метод оптимізації висоти від піку до западини. Шорсткість поверхні визначається як близько розташовані нерівності, які впливають на декілька функціональних властивостей деталей, таких як контакт, що викликає поверхневе тертя, зношування, відбиття світла, теплопередачу, здатність розподіляти і утримувати змазку, покриття або опір навантаженню. Відношення висоти вершини до висоти западини є показником загальної шорсткості профілю та може бути використано як метод оптимізації. Відношення переривчастих піків з симуляції зняття матеріалу з поверхні до загального зняття матеріалу з поверхні враховується і порівнюється за допомогою різних параметрів обробки, таких як тиск, швидкість, типи функцій інструмента, діаметр інструмента, крок і TPI. Проводиться ретельна оцінка і математичне моделювання для оптимізації цих стратегій обробки з метою отримання поверхні з мінімальними похибками,

високим загальним зняттям матеріалу і низькими піками, що дозволяє досягти високої якості поверхні. Цей підхід ефективний для визначення найкращої ТРІ та функції інструмента з запропонованих варіантів, а також для визначення оптимізованого діапазону параметрів обробки.

Метод оптимізації Тагучі. Генічі Тагучі, відомий інженер, значно вплинув на концепцію якості, запропонувавши методи, що сприяють досягненню надійного дизайну через зменшення варіабельності реакції та забезпечення надійності. Його підхід, заснований на дисперсійному аналізі (ANOVA) і внеску Фішера, дозволяє оптимізувати рішення за допомогою багатфакторних експериментів. Тагучі популяризував використання ортогональних масивів для проведення ефективних багатфакторних експериментів, що дозволяє краще розуміти взаємодію факторів і покращувати продуктивність.

Підхід Тагучі використовує статистичну міру загальної продуктивності, відому як відношення сигнал/шум (С/Ш), що враховує як середнє значення, так і варіабельність. Відношення сигнал/шум (S/N - signal-to-noise) - це відношення середнього значення (сигналу) до стандартного відхилення (шуму), залежить від якісних характеристик продукту/процесу, що підлягає оптимізації. Стандартні співвідношення S/N , які зазвичай використовуються, є наступними: Номінальне-найкраще (NB - nominal-is-best), нижче-найкраще (LB - lower-the-better) і вище-найкраще (HB - higher-the-better). Найкраще розміщення - це комбінація параметрів, яка має найкраще співвідношення S/N [41]. Тобто, незалежно від того, якими можуть бути критерії якості (NB, LB, HB), відношення S/N повинно постійно максимізуватися. Після того, як значення експериментальних даних (значення атрибуту якості) нормалізовано за допомогою стандартів NB/LB/HB; нормалізоване значення лежить між нулем і одиницею. Нуль представляє найгіршу якість, яку слід відкинути, а одиниця - максимальну виняткову якість. Враховуючи той факт, що відношення S/N виражається як середнє значення (сигнал) до шуму (відхилення від цілі), максимізація відношення S/N забезпечує мінімальне відхилення і, як наслідок, воно (відношення S/N) має бути максимізоване.

Існує багато різних типів експериментів, які можна проводити за умови, що в системі варіюється декілька факторів. Деякі з них включають експерименти з повним факторним плануванням, експерименти з дробовим факторним плануванням, експеримент з центральними кубоїдами або ортогональні експерименти. Всі ці експерименти використовують матриці, які контролюють кількість випробувань. У цій роботі ортогональний план експерименту використовується для визначення основного впливу змінних операції шліфування, в той же час передаючи багато інформації про поведінку системи.

Експерименти з ортогональним масивом (ОМ) можуть бути виконані для визначення впливу окремих параметрів на систему. Вони не можуть дати загального уявлення про взаємодію цих факторів між собою. Отримані дані можна додатково проаналізувати графічно, щоб визначити оптимальні налаштування факторів. Метод ОМ може бути використаний для швидкого звуження обсягу дослідницького проєкту, оскільки спеціальна конструкція ортогональних масивів дозволяє дослідити весь простір параметрів за допомогою невеликої кількості експериментів.

Використання методу Тагучі передбачає наступні кроки [41].

- 1) визначення основних функцій та їх побічних ефектів;
- 2) визначення факторів шуму, умов тестування та якісних характеристик;
- 3) визначити цільову функцію, що підлягає оптимізації;
- 4) визначити керуючі фактори та їх рівні;
- 5) вибрати відповідний ортогональний масив та побудувати матрицю;
- 6) провести матричний експеримент;
- 7) дослідити дані, спрогнозувати оптимальні рівні керуючого фактору та його продуктивність;
- 8) проведення перевірконого експерименту.

Переваги методу Тагучі:

- 1) акцентує увагу на середньому значенні характеристики, близькому до цільового значення, а не на значенні в певних межах специфікації, таким чином покращуючи якість продукції;

2) простий у застосуванні і має широку сферу застосування, що робить його дуже потужним інструментом;

3) економить час при плануванні експериментів, оскільки усуває необхідність проведення надмірно великої кількості експериментів. Наприклад, процес з 4 параметрами, кожен з яких має 3 рівні, потребував би 81 (34) експериментів для перевірки всіх параметрів. Однак, використовуючи ОМ Тагучі, необхідно лише 9 експериментів, що становить лише 0,11% від початкової кількості експериментів;

4) допомагає визначити ключові параметри, які найбільше впливають на значення характеристики продуктивності.

2.5 Порівняння методів

Генерація траєкторії інструмента. Порівняння різних методів генерації ТРІ можна виконати, проаналізувавши різні фактори на основі літературних досліджень, які мають пряме відношення до впливу траєкторії інструмента на якість поверхні.

Строжка - це явище надрізу або підрізу, яке виникає внаслідок взаємодії між геометрією моделі та геометрією або рухом різця. Результат виявлення виїмки має вирішальне значення для одночасного розгляду моделювання та виготовлення деталей. Просторові криві різання, отримані в результаті нерівномірної подачі, ускладнюють виявлення локальних задирок, в першу чергу при ізопараметричному та ізоплощинному методі генерації траєкторії. Ці нерівності зведені до мінімуму при ізогребінчастій обробці, і навіть якщо вони виникають, їх легко виявити. Нерівномірні інтервали ТРІ призводять до надлишкової обробки, але в порівнянні з альтернативою, ізогребінець з його остаточним бічним кроком практично виключає надлишкову обробку. Метод ізогребінця має більш рівномірні ЗГ, меншу довжину траєкторії, яку потрібно подолати при обробці, забезпечує більший контроль над швидкістю подачі і споживає менше часу на обробку в порівнянні з його аналогами. Ці фактори сприяють підвищенню ефективності обробки. Серед цих факторів сумісність поверхонь є домінуючим

фактором запропонованих методів, що спрощує вибір методу. Генерація траєкторії ізогребінчастим методом виявилася найбільш сумісною з усіма поверхнями, на відміну від ізопараметричного методу. У табл. 2.1 наведено порівняння різних підходів до генерації траєкторії інструмента.

Таблиця 2.1 - Порівняння методів генерації траєкторії руху інструмента

Фактори	Методи				
	Ізопараметричний	Ізопланарний	Декартовий	Ізо-гребінець	Зміщення
Виявлення строжки	складна	складна	помірна	легка	помірна
Надлишкова обробка	висока	висока	середня	дуже низька	середня
Рівномірність гребінців	середня	низька	середня	дуже висока	низька
Довжина траєкторії інструмента	висока	висока	висока	низька	дуже низька
Контроль швидкості подачі	середній	низький	високий	середній	середній
Час обробки	високий	високий	високий	низький	низький
Ефективність обробки	висока	низька	низька	висока	низька
Сумісність поверхонь	низька	помірна	висока	висока	помірна

Джерело: складено автором

Метод генерації траєкторії інструмента з ізокуполом або ізогребінцем є більш досконалим у порівнянні з альтернативними підходами, про які йшлося вище. Щоб зменшити надлишкову обробку для досягнення стабільної якості поверхні, деякі дослідники запропонували різні методи планування ізоцентричної генерації TPI, що забезпечує наступне:

- 1) постійний і рівномірний гребінь;
- 2) зменшення довжини TPI, що призводить до підвищення ефективності обробки;
- 3) менша кількість проходів практично виключає надлишкову обробку;
- 4) як недолік: само-взаємодія на нерівних поверхнях і накопичення помилок розрахунку.

Моделювання. Для вибору відповідного методу моделювання TPI та зняття матеріалу з поверхні необхідно враховувати різні фактори. Висока точність і менший час моделювання є бажаними характеристиками при виборі відповідного методу. Незважаючи на те, що і MATLAB, і CAM програмне забезпечення виконують моделювання, вважається, що MATLAB пропонує більш високу продуктивність завдяки своїй здатності обробляти складні математичні розрахунки. MATLAB також має можливості для графічного представлення поверхні та її корекції. Однак, траєкторії обробки і TPI в CAD/CAM програмному

забезпеченні визначені заздалегідь і надають користувачеві меншу гнучкість для інновацій. На відміну від цього, моделювання в MATLAB базується на параметрах, визначених користувачем, і відповідно до вимог і специфікацій, встановлених користувачем (табл. 2.2)

Таблиця 2.2 - Порівняння методів моделювання

Фактори	Методи	
	MATLAB	ПЗ CAD/CAM
Витрати часу	низькі	низькі
Точність моделювання	дуже висока	висока
Аналіз зняття матеріалу в залежності від часу	так	ні
Введення параметрів обробки та траєкторій руху інструмента	визначається користувачем і є гнучким	визначено заздалегідь; менше варіацій
Ефективність	дуже висока	висока
Виявлення та виправлення помилок	так	так

Джерело: складено автором

Оптимізація. Оцінюючи оптимізаційні підходи, слід враховувати такі фактори, як час і ефективність обчислень, кількість ітерацій, що беруть участь у розрахунку, складність і обмеження методу. Як ГА, так і метод Тагучі забезпечують точні результати при високій обчислювальній ефективності за менший час з мінімальними обмеженнями порівняно з альтернативними методами. ГА має перевагу, коли мова йде про ітерації, оскільки він досягає рішення за меншу кількість ітерацій. Однак, більша складність у виконанні алгоритму робить його менш бажаним. Крім того, близькість отриманого розв'язку залежить від цільової функції, а її здатність до самонавчання є палицею з двома кінцями.

Таблиця 2.3 - Порівняння методів оптимізації

Фактори	Методи					
	ГА	ОМК	ОРЧ	Тагучі	Імітація відпалу	Пошук табу
Обчислювальна ефективність	Висока	Помірна	Помірна	Висока	Помірна	Помірна
Обчислювальний час	Низький	Помірний	Помірний	Низький	Високий	Високий
Ітерації	Низькі	Високі	Високі	Помірні	Високі	Високі
Обмеження методу	Помірні	Високі	Високі	Помірні	Високі	Високі
Складність	Висока	Помірна	Висока	Низька	Помірна	Низька
Наближеність до оптимального рішення	Коливається	Низька	Помірна	Висока	Низька	Невисока
Кількість параметрів, що оптимізуються	Поодинокі	Поодинокі	Поодинокі	Кілька	Поодинокі	Поодинокі
Відносний аналіз параметрів	Ні	Ні	Ні	Так	Ні	Ні

Джерело: складено автором

Найбільша близькість до оптимальних розв'язків досягається при оптимізації методом «від піку до западини» разом із плануванням експериментів за методом Тагучі. Ще однією особливістю, яка зміцнює вибір методу Тагучі для оптимізації, є те, що він пропонує функцію оптимізації за багатьма змінними. Це також допомагає у проведенні аналізу відносної залежності задіяних параметрів. У таблиці 2.3 наведено порівняння різних методів оптимізації.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз отриманих результатів

В даному розділі підсумуємо результати розробки моделі оптимізації, які є найбільш важливими для визначення якості поверхні після обробки.

3.1.1 Обґрунтування процесу моделювання

Функція впливу інструмента. В області роботизованого або комп'ютерного полірування характеристики зняття фінішного інструмента декларуються як функція впливу або функція зняття. Функція впливу, як описано в теоретичному розділі, ілюструє розподіл швидкості зняття матеріалу за розміром полірувального або шліфувального інструмента та зазвичай зберігається у вигляді масиву даних. Розмір масиву даних корелює з реальним розміром фінішного інструмента і може бути змінений за допомогою масштабу комірок масиву даних. Для цілей цього дослідження було використано моделювання функції видалення окремих інструментів з мови програмування MATLAB для подальшого аналізу в роботі. Шліфувальні інструменти або накладки можуть бути гнучко спроектовані в різних формах, що дозволяє нам отримувати різні TIF-файли.

На основі функції Престона були згенеровані наступні функції впливу інструментів.

Дисковий або роторний інструмент. Моделювання в MATLAB функції зняття плунжерного інструмента дає симетричну функцію зняття матеріалу, оскільки інструмент симетричний відносно осей. Крім того, інструмент має круглу форму і демонструє характеристики зняття відповідно до рівняння Престона. На основі функції Престона [42], $dt / dh = k \times P \times v$, де

dt / dh - швидкість зносу (зменшення товщини шару матеріалу); k - коефіцієнт Престона, що залежить від матеріалу, абразиву та умов обробки; P - контактний тиск між поверхнею інструмента та матеріалом; v - відносна швидкість руху між поверхнями.

Так, розподіл швидкості профілю змінюється по радіусу інструмента, що, в свою чергу, призводить до змін у розподілі глибини зняття матеріалу. Інтенсивність цих змін відображається кольоровими картами на рис. 3.1. Поверхня з синім кольором вказує на ділянку, на якій спостерігається максимальний зняття матеріалу або глибина. Як видно з рисунка, глибина зняття матеріалу поступово зменшується від зовнішнього кінця до центру інструмента. Крім того, кути інструмента не чинять видалення через кутові ефекти.

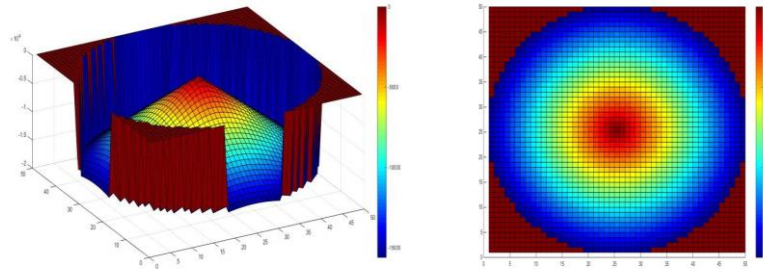


Рисунок 3.1 - Функція впливу інструмента (інструмент «Панель»)

Інструмент щітка. Функція зняття, що генерується інструментом щіткою, також симетрична відносно осей і рівномірна. Інструмент оснащений пучками, кожен з яких складається з численних волокон щітки, прикріплених до пластини інструмента. На рис. 3.2 зображено функцію зняття, отриману щітковим інструментом, коли інструмент оснащений 50 непарними пучками, розміщеними дуже близько один до одного.

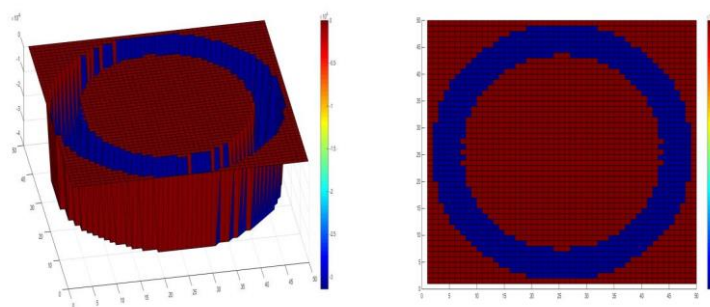


Рисунок 3.2 - Функція впливу інструмента (інструмент «Щітка»)

Більш рівномірне зняття матеріалу досягається при використанні інструмента щітки, що відображається безперервною синьою ділянкою. Ця ділянка вказує на зону, в якій характеристика зняття має найбільший вплив.

На рис. 3.3 показано модель щіткового інструмента і функцію зняття, що зображає кожен і всі пучки в інструменті.

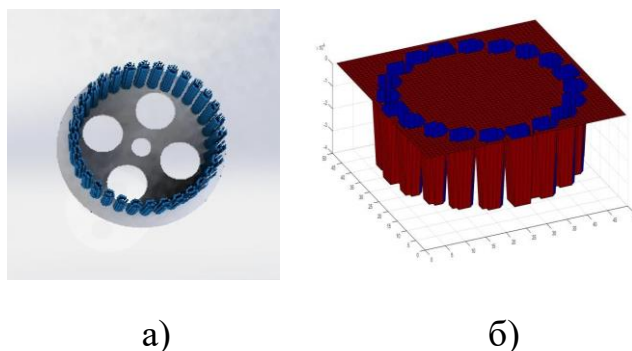


Рисунок 3.3 - Модель інструмента «Щітка» (Brush Solidworks) (а); функція інструмента з меншою кількістю пучків (б)

Радіальний інструмент. На відміну від двох попередніх функцій впливу інструмента, радіальний інструмент створює асиметричні характеристики зняття, оскільки інструмент рухається паралельно поверхні. Тут ширина інструмента також відіграє важливу роль, оскільки вона також впливає на площу охоплення інструментом поверхні, що, в свою чергу, впливає на функцію зняття. Характеристики зняття матеріалу радіальним інструментом на певній ділянці робочої поверхні представлені на рис. 3.3.

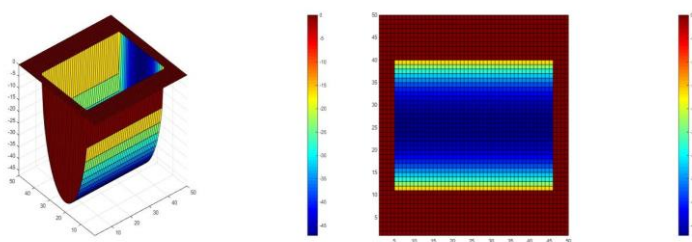


Рисунок 3.3 - Функція впливу інструмента (радіальний інструмент)

ТРІ та моделювання зняття матеріалу. Генерація ТРІ складається з побудови траєкторій на двовимірній площині та відображення траєкторії на тривимірну поверхню за допомогою моделі поверхні. Представлено та реалізовано алгоритм генерації ТРІ, який може забезпечити рівномірне охоплення поверхонь довільної форми під час автоматизованої обробки.

ТРІ є одним з ключових факторів для автоматичного полірування поверхонь. У цьому дослідженні розглянуто п'ять різних ТРІ:

- 1) рух по лінії сканування;
- 2) зигзагоподібний рух;
- 3) рух зі зміщенням контуру;
- 4) рух по спіралі з постійним перекриттям;
- 5) паралельний рух по спіралі.

Алгоритми генерації ТРІ були розроблені в ПЗ MATLAB таким чином, що інструмент рухається по певній траєкторії, згенерованій алгоритмом, і охоплює весь зразок, забезпечуючи таким чином карту зняття матеріалу.

Рух інструмента по лінії сканування - це найпростіший шлях інструмента, отриманий з набору алгоритмів ТРІ. ТРІ передбачає один прохід і, отже, є односпрямованою. У дослідженні напрямку, в якому інструмент рухається зліва направо по робочій поверхні (рис. 3.4), ідентифікується як напрямок лінії траєкторії або напрямок прямої подачі, а напрямок, перпендикулярний до нього, приймається як ортогональний напрямок.

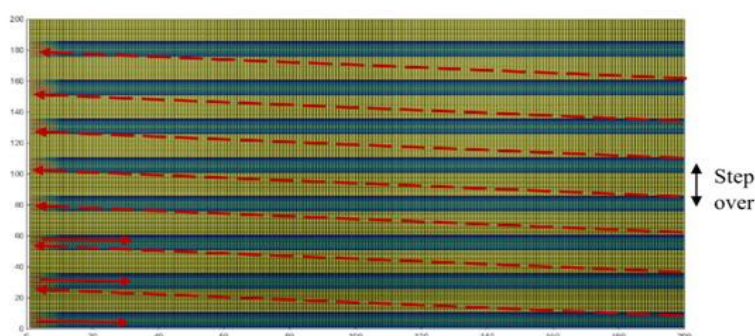


Рисунок 3.4 - Рух по лінії сканування

ТРІ починається з переміщення інструмента зліва направо в напрямку лінії траєкторії. Як тільки інструмент досягає кінця оброблюваної поверхні в напрямку лінії траєкторії, він повертається в початкову точку, змістившись на відстань, що дорівнює кроку в ортогональному напрямку. Таким чином, відстань між сусідніми лініями траєкторії в ортогональному напрямку утворює крок переходу для траєкторії. Ця процедура повторюється до тих пір, поки інструмент не досягне кінця робочої поверхні в ортогональному напрямку.

Після визначення ТРІ, характеристики зняття застосовуються до функції інструмента. Інструмент з функцією зняття переміщується вздовж визначеної траєкторії і таким чином створює карту зняття матеріалу для всієї поверхні. На

рис. 4.5 показано симуляцію зняття матеріалу, коли на робочій поверхні реалізовано ТРІ по лінії сканування і коли інструмент переміщується з кроком 50% від діаметра інструмента. Кольорові діапазони вказують на інтенсивність швидкості зняття матеріалу, де максимальне зняття матеріалу позначено ділянками, заштрихованими синім кольором, а найменше зняття матеріалу визначено червоною ділянкою. Послідовне зняття стружки при різанні вгору та вниз можна підтримувати. Однак, існує значна кількість непродуктивного часу на повернення інструмента в початкову позицію.

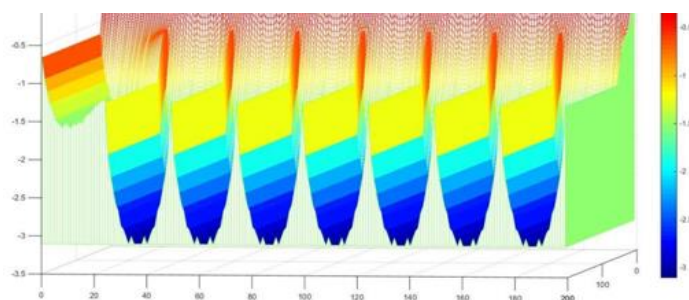


Рисунок 3.5 - Імітація видалення матеріалу за допомогою траєкторії інструмента по лінії сканування

Зигзагоподібна ТРІ включає в себе прямі незамкнуті криві, подібно до руху по лінії сканування, але відрізняється тим, що пропонує кілька проходів. Тобто інструмент рухається як по лінії траєкторії, так і в ортогональному напрямку. Двонаправлений рух інструмента призводить до видалення матеріалу як в прямому, так і в зворотному напрямках. Рівномірне зняття матеріалу при зигзагоподібних ТРІ досягається завдяки безперервним прямим кривим траєкторії (рис. 3.6-3.7). Подібно до руху лінії сканування, зигзаг починається з лівого торцевого кута робочої поверхні й рухається вправо в напрямку подачі вперед. Потім інструмент проходить короткий відрізок шляху довжиною, що дорівнює розміру кроку, в ортогональному напрямку. Після завершення першого короткого відрізка шляху інструмент рухається в зворотному напрямку в напрямку лінії траєкторії на відміну від початкового руху, тобто справа наліво. Коли інструмент досягає кінця оброблюваної поверхні під час руху в попередньому напрямку, він зустрічається з іншим коротким відрізком шляху, після чого повторює рух в обох напрямках, поки інструмент не пройде всю довжину оброблюваної поверхні.

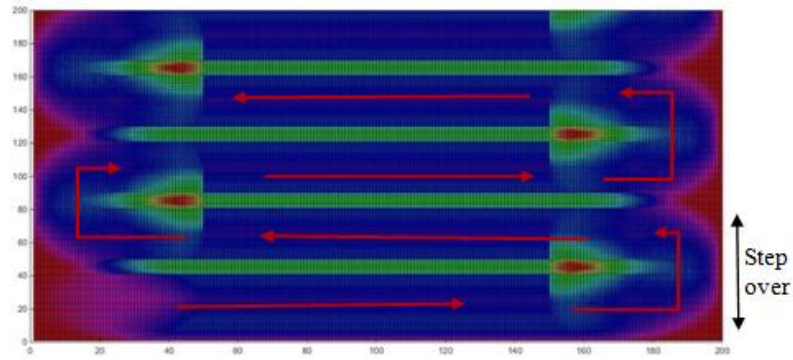


Рисунок 3.6 - Зигзагоподібний рух інструмента

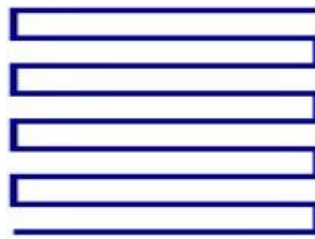


Рисунок 3.7 - Схема зигзагоподібного руху

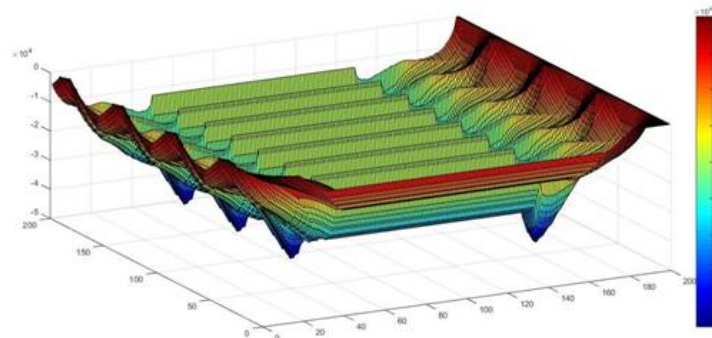


Рисунок 3.8 - Моделювання зняття матеріалу за допомогою зигзагоподібної траєкторії інструмента

Послідовний рух інструмента по зигзагоподібній траєкторії допомагає усунути час втягування інструмента, який є основним фактором при русі по лінії сканування, що впливає на тривалість процесу. Безперервні рухи інструмента як в прямому, так і в ортогональному напрямку забезпечують рівномірність зняття матеріалу з поверхні (рис. 3.8). За винятком кутів або країв робочої поверхні, рівномірна швидкість зняття матеріалу спостерігається по всій поверхні. Часткове зняття матеріалу на краях можна пояснити різкою зміною напрямку руху інструмента. Для руху використовується крок 50%.

ТРІ зі зміщенням контуру складається з серії замкнутих контурів межі оброблюваної поверхні (рис. 3.9-3.10).

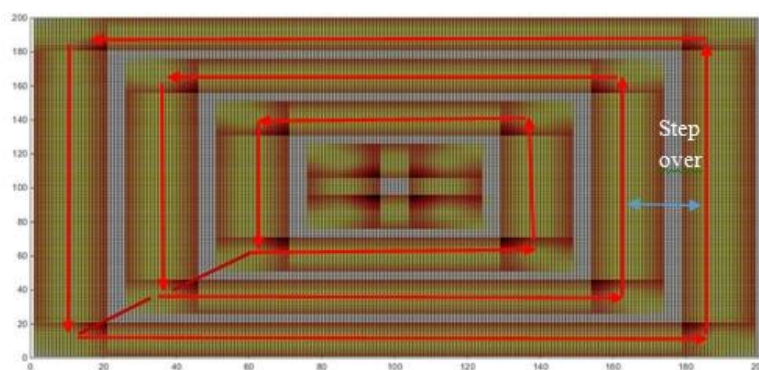


Рисунок 3.9 - Шлях інструмента «Зміщення контуру»

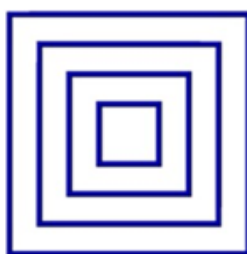


Рисунок 3.10 - Схема руху зі зміщенням контуру

Інструмент рухається вздовж цих замкнутих контурів, поки не буде оброблена вся поверхня. Проміжок між двома послідовними контурами визначається значенням кроку переходу. Цей тип ТРІ в основному використовується для обробки заглиблень. На початковому ході інструмент проходить всю довжину оброблюваної поверхні вздовж лінії траєкторії та в ортогональному напрямку, як в прямому, так і в зворотному напрямку так, що утворює перший замкнутий контур. Відразу після першого контуру інструмент виходить із зовнішнього контуру і рухається вздовж лівого діагонального продовження, щоб досягти внутрішнього контуру після зміщення на довжину переходу. Ця процедура продовжується до тих пір, поки не буде оброблена вся заготовка.

Карта зняття матеріалу з поверхні після реалізації траєкторії переміщення інструмента зі зміщенням по контуру з кроком 50% від діаметра інструмента показана на рис. 3.11. Безперервні зіткнення інструмента з кутами вздовж наступних контурів можуть призвести до високих піків для цього типу траєкторії

інструмента. Ці аспекти будуть проаналізовані та оптимізовані в наступних розділах.

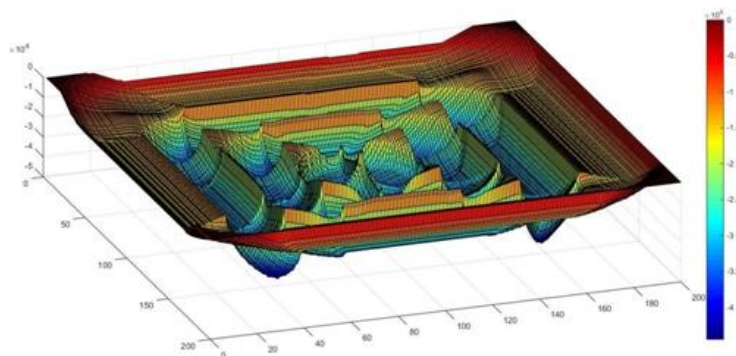


Рисунок 3.11 - Моделювання зняття матеріалу зі зміщенням ТРІ по контуру

Спіральна ТРІ з постійним перекриттям, як і траєкторії зі зміщенням по контуру, добре підходять для контурної обробки заглиблень. Однак час обробки значно скорочується в порівнянні з ТРІ зі зміщенням по контуру, оскільки вона забезпечує безперервний рух інструмента по всій площі поверхні й усуває час на перепозиціонування інструмента, який виникає в траєкторії зі зміщенням по контуру. Як результат, цей шаблон траєкторії вбирає в себе якість як контурної, так і спіральної траєкторії інструмента. На рис. 3.12-3.13 пояснюється рух інструмента при постійному перекритті спіральної траєкторії інструмента. Аналогічно до траєкторії зміщення контуру, цей рух відбувається як уздовж лінії траєкторії, так і в ортогональному напрямку в прямому і зворотному напрямках. Але безпосередньо перед замиканням контуру, на відміну від контурного зміщення, інструмент продовжує рух у внутрішній контур і виконує попередній рух, зберігаючи зміщення, що дорівнює кроку над попереднім контуром інструмента. Рух продовжується до тих пір, поки не буде оброблений весь робочий зразок.

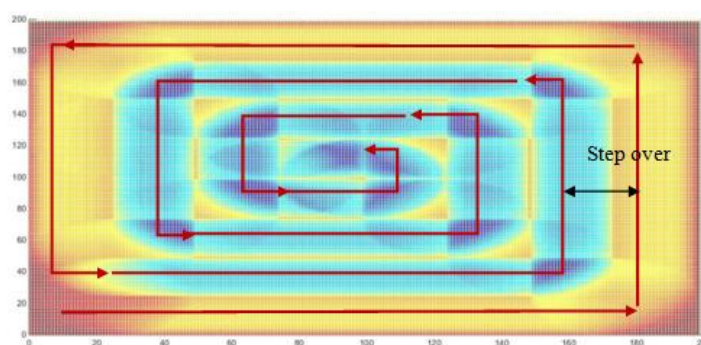


Рисунок 3.12 - Шлях інструмента «Спіраль з постійним перекриттям»

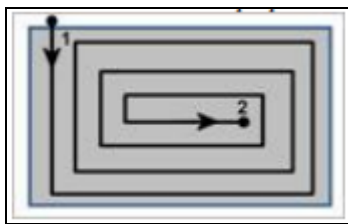


Рисунок 3.13 Постійний рух по спіралі з перекриттям

Моделювання зняття матеріалу з робочої поверхні після виконання спірального руху з постійним перекриттям з кроком перекриття 50% представлено на рис. 3.14. Значний вплив кутових ділянок відчувається і на цій схемі траєкторії. Хоча піки, зумовлені цими факторами, можуть бути мінімізовані, а ТРІ оптимізовані на основі модифікації параметрів і умов процесу.

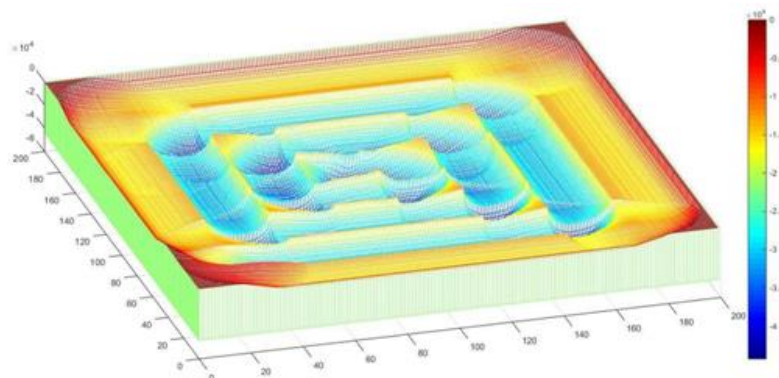


Рисунок 3.14 - Моделювання зняття матеріалу спіральною ТРІ з постійним перекриттям

Паралельна спіральна ТРІ. Паралельна спіраль - це фактично адаптація руху по спіралі з постійним перекриттям, що включає в себе характеристики зигзагоподібного руху (рис. 3.15). Ця траєкторія складається з серії коротких і довгих відрізків шляху. Спочатку інструмент рухається вздовж лінії траєкторії і, досягнувши кута, спрямовується в ортогональному напрямку. Потім інструмент рухається у зворотному напрямку вздовж напрямку подачі, виконує короткий відрізок шляху (довжина переходу) і продовжує рух вздовж лінії траєкторії в прямому напрямку, поки не досягне точки, яка зміщена від початкової траєкторії в ортогональному напрямку на величину кроку переходу. Далі інструмент робить зворотний рух в ортогональному напрямку і зміщується в напрямку лінії траєкторії, зберігаючи при цьому величину кроку, і виконує зворотний рух. Потім

інструмент зустрічається з коротким відрізком шляху, який забезпечує перехід до лінії траєкторії від зворотного до прямого напрямку. Ці кроки повторюються до тих пір, поки не буде оброблена вся поверхня.

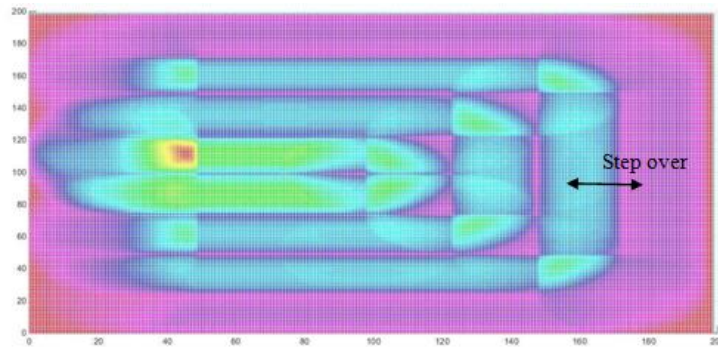


Рисунок 3.15 - Паралельна спіральна ТРІ

Моделювання зняття матеріалу виконується з паралельною спіральною ТРІ з кроком 50% (рис. 3.16).

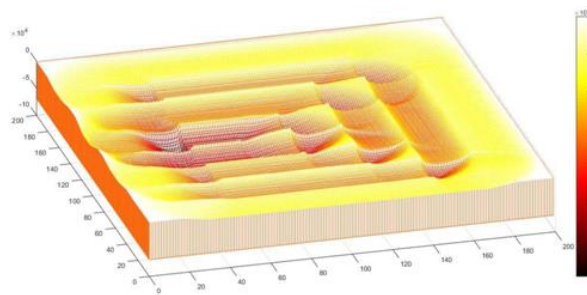


Рисунок 3.16 Моделювання зняття матеріалу

Алгоритм генерації ТРІ для всіх траєкторій подано в Додатку А.

3.1.2 Обґрунтування процесу оптимізації

Різні параметри для одного й того ж типу ТРІ можуть призвести до різної якості роботи. Нижче нами розглянуто характеристики зняття матеріалу, засновані на різних ТРІ, а також розроблено математичну модель оптимізації параметрів і стратегій для контролю поверхні і найбільш раціонального результату шліфування.

Ущільнення даних є процесом оптимізації - це метод вибору більшої кількості точок ТРІ під час обробки в напрямку лінії траєкторії, що забезпечує

дискретність руху, є ефективним для зменшення впливу нелінійних похибок на поверхню (рис. 3.17).

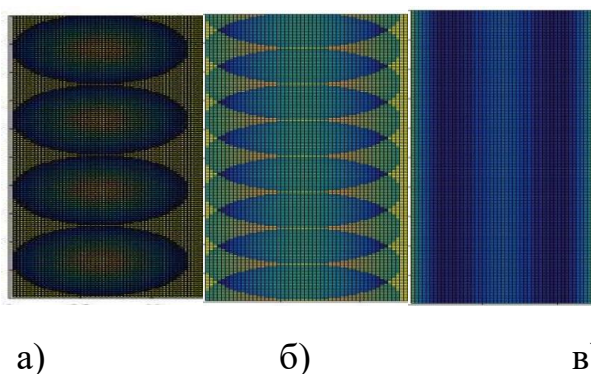


Рисунок 3.17 - Ущільнення даних: а) мінімальна кількість точок траєкторії; б) помірно; в) високодискретизоване

Ущільнення даних досягається в дослідженні шляхом представлення скінченних рухів інструмента від точки до точки на оброблюваній поверхні. Для цього конкретного руху робоча поверхня визначається як матриця унікальної довжини в програмі MATLAB, де інструмент контактує з кожною коміркою в сітці, забезпечуючи таким чином бажані дискретизовані рухи. Ущільнення в основному здійснюється при русі інструмента вперед або подачі вперед через рух всередині в альтернативному напрямку; бічний крок або рух вбік значно залежний від величини кроку переходу. Подача вперед також має вирішальне значення в технології ТРІ, оскільки рух верстата дискретизується на скінченні фрагментарні рухи. Нагадаємо про параметризацію поверхні для визначення розміру кроку одночасно з підтриманням похибок обробки в межах бажаного допуску. Для визначення відхилення між фактичною прямолінійною ТРІ та бажаною поверхнею використовується лінійне переміщення інструмента з подачею вперед між двома положеннями [43].

Крок переходу, тобто відстань між сусідніми ТРІ в межах траєкторії підведення, використовується для визначення висоти ЗГ, які залишаються після процесу обробки. З цієї причини, маршрут інструмента в основному діагностується як набір позицій, які проходить інструмент, і інтерполюється в плавний рух. Таким чином, методика визначення позицій інструмента є фактором, який може вплинути на якість обробки деталей [44].

Від піку до западини. У звичайному сценарії, максимальний об'єм зняття і мінімальний об'єм зняття в певній точці під час циклу чистової обробки задаються як Z_{max} і Z_{min} відповідно. Різниця об'ємів зняття $\Delta Z = Z_{max} - Z_{min}$ береться як інструмент для аналізу. Однак, за числовими розрахунками, ΔZ змінюється з робочим простором на основі різних тенденцій траєкторії. Рівномірність шліфування не може бути повністю оцінена, якщо розглядати лише різницю величини зняття ΔZ , оскільки різний простір шліфування має різну максимальну величину зняття Z_{max} . Таким чином, коефіцієнт співвідношення різниці, Z_{pv} / Z_{max} , вводиться для усунення впливу Z_{max} на ΔZ . Z_{pv} являє собою висоту від піку до западини обробленої поверхні. Рівномірність зняття впливає на шліфування, а в деяких випадках і на точність форми шліфованої поверхні. Цей коефіцієнт співвідношення, який в наступному розділі називається «Похибка/сумарне зняття», може краще відображати рівномірність величини зняття по ТРІ та служить ефективним параметром для аналізу. Алгоритм розрахунку коефіцієнта співвідношення в ПЗ MATLAB для знаходження E / R наведена в Додатку Б.

Вплив кроку переходу. Традиційні стратегії траєкторії шліфування не враховують площу покриття, що утворюється між шліфувальним інструментом і поверхнею деталі в результаті контактної дії між ними. З цим пов'язані наступні проблеми:

1) великий вихід за межі - між траєкторіями шліфування утворюється просвіт з неполірованої області. Це означає, що інструмент не контактував з деталлю на цій ділянці та призводить до утворення шорсткої поверхні. У таких випадках потрібні додаткові шляхи, щоб видалити таку поверхню й гарантувати повне покриття під час обробки;

2) малий крок призводить до перекриття сусідніх траєкторій - перекриття може погіршити якість поверхні деталі та зменшити термін служби шліфувального інструмента. Це призводить до збільшення часу виробництва та виробничих витрат.

Таким чином, розрахунок оптимального діапазону переходу є тривіальним, а зміни в карті зняття матеріалу для різних ТРІ при різних діапазонах переходу

повинні пильно спостерігатися. Аналіз виконується шляхом моделювання зняття матеріалу для кожної ТРІ при різних діапазонах переходу (від 1 до 100% діаметра інструмента). Відношення похибки до зняття приймається як аспект, на основі якого можна визначити ефективність процесу.

Значення відношення похибки до зняття було розраховано на основі симуляції зняття матеріалу при використанні всіх 5 ТРІ при широких діапазонах переходу (від 1 до 100%) з використанням TIF-файлів з пластинчастого або ротаційного інструмента. Для цілей аналізу розглядалася область від внутрішньої поверхні до робочої поверхні, щоб зменшити фактор крайового ефекту, коли відносно невелика кількість матеріалу знімається на зовнішніх краях робочої поверхні. Рисунок 3.18 ілюструє вплив переходу на траєкторії інструмента і, зрештою, на похибки поверхні. Відношення було розраховано для TIF-файлів, отриманих щіткою та радіальним інструментом. Результати наведено в Додатку В

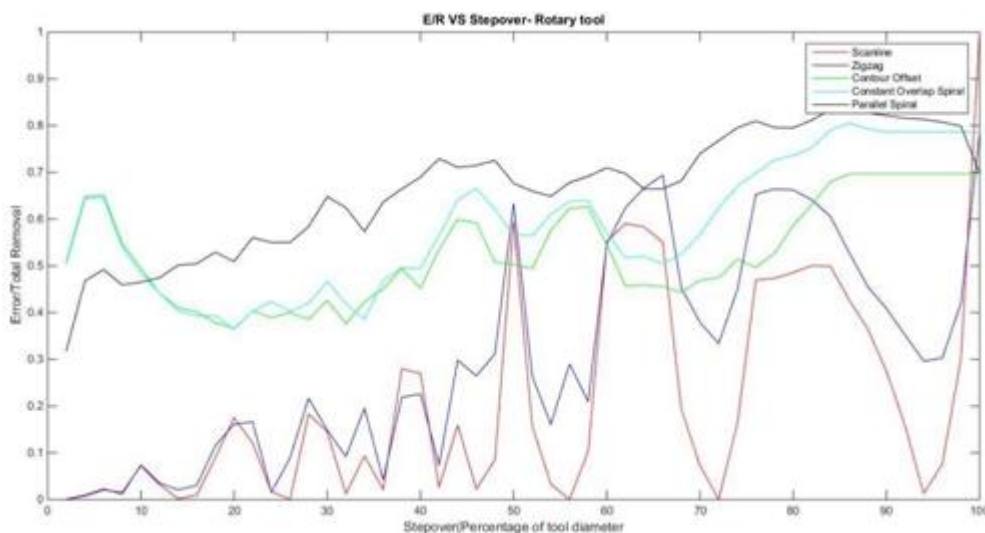
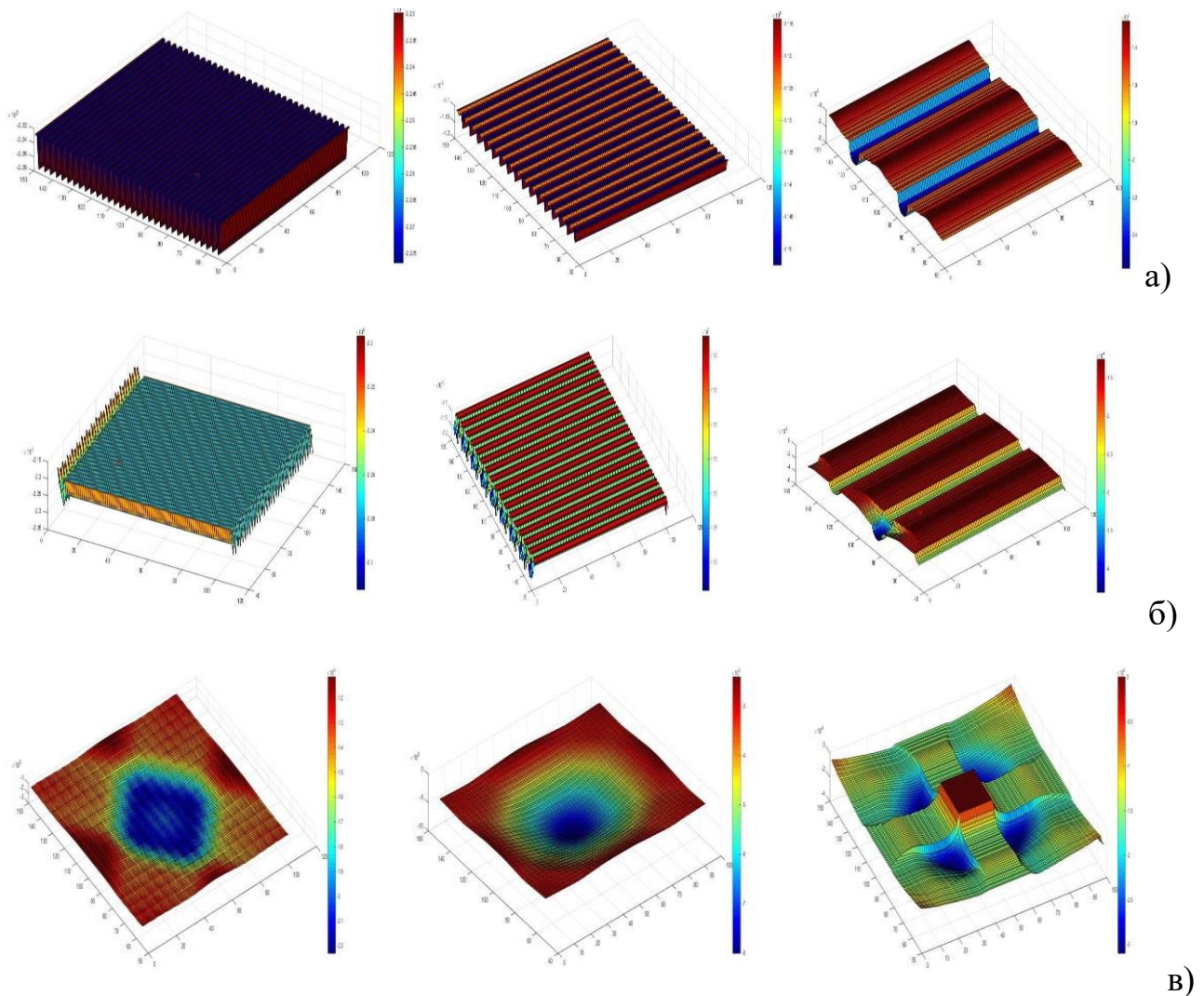


Рисунок 3.18 - Залежність E/R від кроку переходу для ротаційного інструмента

З графіка видно, що відношення похибки до зняття є низьким для низьких діапазонів переходу і зростає зі збільшенням значення переходу. Така ж тенденція спостерігається для всіх доступних ТРІ. Отриманий результат узгоджується з даними, наведеними в теорії. Відношення похибки до зняття виявилось мінімальним при діапазонах переходу від 10 до 20, враховуючи всі переміщення ТРІ. Незважаючи на те, що діапазони кроку переходу в 5% дають дуже низькі похибки для траєкторій сканування і зигзагоподібних траєкторій, цей діапазон не можна вважати оптимальним, оскільки при таких надзвичайно низьких діапазонах

кроку перекриття сусідніх ТРІ є дуже високим, що може навіть призвести до виходу за межі оброблюваної ділянки поверхні. Крім того, безперервне переміщення інструмента по дуже близьких сусідніх траєкторіях матиме негативний вплив на термін служби інструмента і збільшить час обробки, що є небажаними аспектами для підприємств. Таким чином, на основі аналізу було вирішено, що діапазон переходу 10-20% є оптимальним.

Враховуючи відношення похибки до зняття для кожної ТРІ, як лінія сканування, так і зигзагоподібна траєкторія дають низькі похибки поверхні на всіх діапазонах переходу в порівнянні з іншими ТРІ. Високі значення похибки при малих діапазонах переходу для контурного зміщення, спіральної траєкторії з постійним перекриттям і паралельної спіральної траєкторії можна пояснити кутовими ефектами. Нерівномірне зняття відбувається на кутах ТРІ через різкі зміни напрямку. Накопичення цих кутів на ТРІ при малих діапазонах переходу призводить до накопичення помилок на поверхні (рис. 3.19).



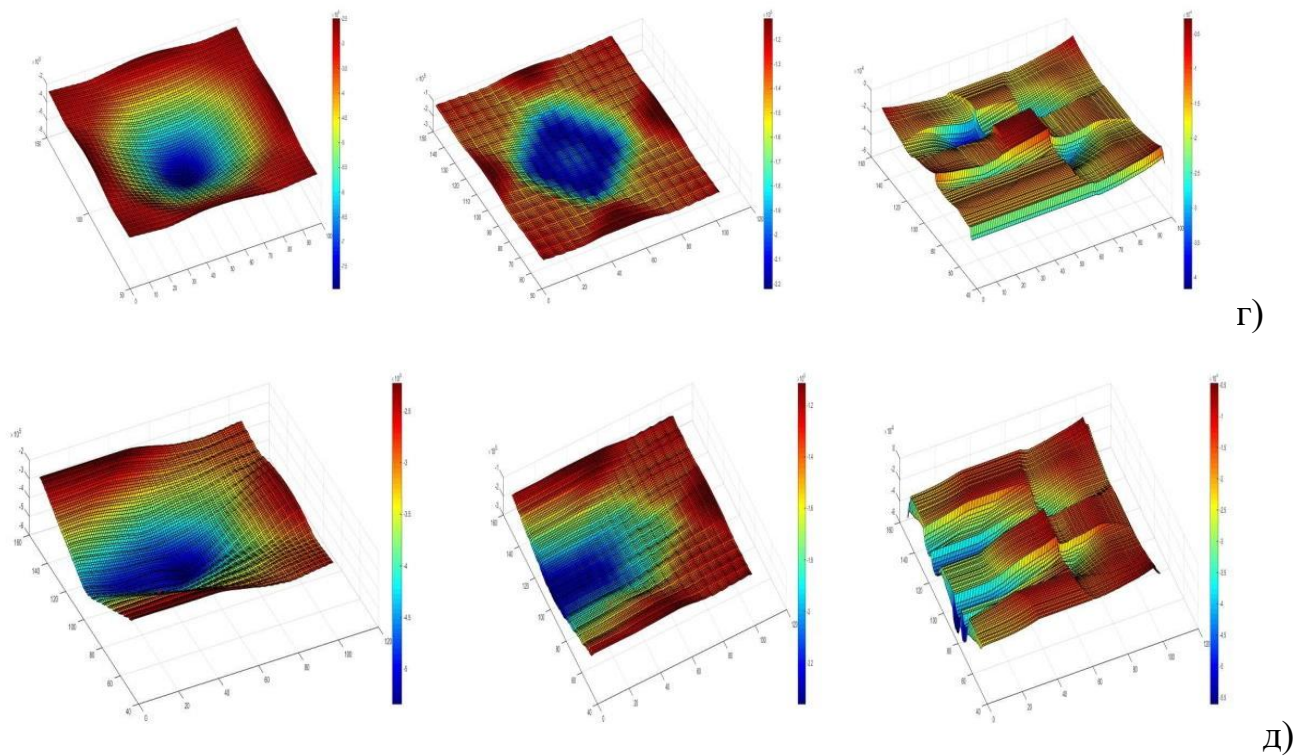


Рисунок 3.19 - Моделювання зняття матеріалу при кроці переходу = 6%, 12% і 80%: лінія сканування (а); зигзаг (б); зміщення контуру (в); спіраль з постійним перекриттям (г); паралельна спіраль (д)

Моделювання показало, що для різних траєкторій руху інструмента при різних значеннях перекриття спостерігаються відмінності у знятті матеріалу. Було виявлено, що діапазон зміщення 10-20% при використанні поворотного інструмента на лінії сканування або зигзагоподібної траєкторії інструмента дає мінімальне відношення похибки до зняття.

Вплив типу інструмента. Функція впливу інструмента визначає характеристики зняття матеріалу при чистовій обробці на основі різних параметрів. Тип і геометрія інструмента відіграють значну роль у визначенні функції впливу, оскільки вони визначають область контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, що, в свою чергу, впливає на зняття матеріалу і похибки поверхні. Для дослідження було використано три типи інструментів: плунжерний або ротаційний інструмент, щітковий інструмент та радіальний інструмент (рис. 3.20).

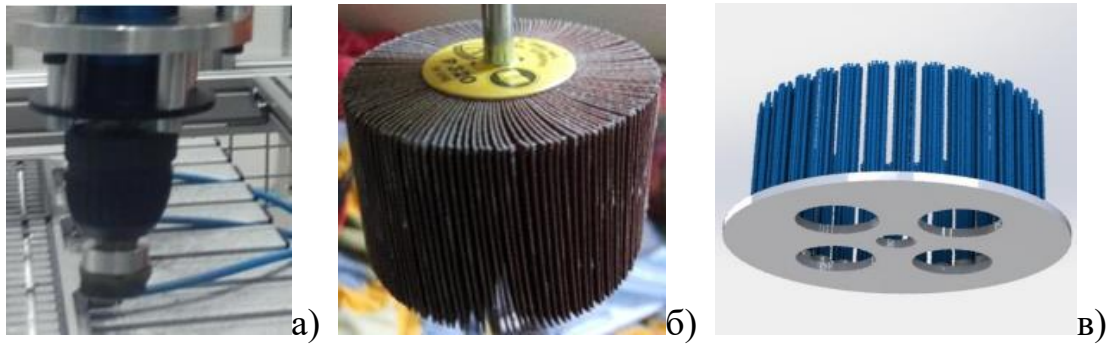


Рисунок 3.20 - Інструменти, що використовуються для чистової обробки: обертовий (пластинчастий) інструмент (а); радіальний інструмент (б); щітка (в)

Визначення впливу інструмента на зняття матеріалу та похибку поверхні має першорядне значення. Для цього було проаналізовано вплив на відношення похибки до зняття матеріалу для зигзагоподібної ТРІ при широкому діапазоні переходу (від 1 до 100%) при використанні трьох різних інструментів (рис. 3.21).

Спостереження з рис. 3.21 показують, що накладка або обертовий інструмент демонструють мінімальну похибку поверхні при широких діапазонах переходу в порівнянні з щітковим і радіальним інструментом. Незважаючи на незначні відхилення, коли аналогічний аналіз проводився для інших ТРІ, було виявлено, що використання роторного інструмента призводить до мінімальної похибки.

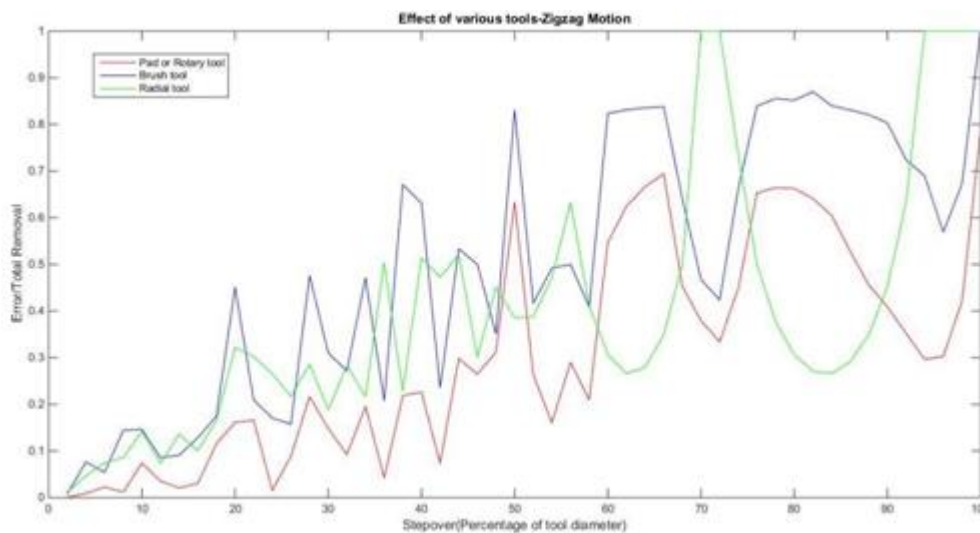


Рисунок 3.21 - Відношення похибки до видалення для різних інструментів

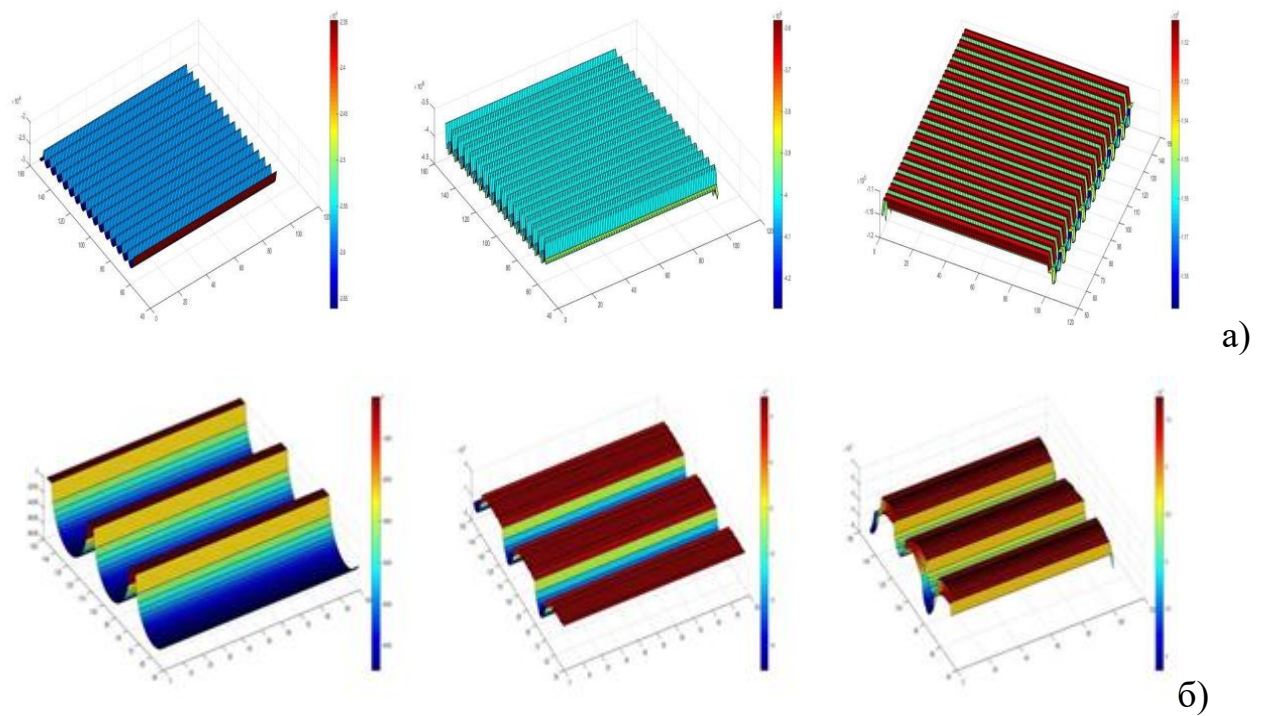


Рисунок 3.22 - Моделювання зняття матеріалу для ротаційних, щіткових та радіальних інструментів, коли вони здійснюють зигзагоподібний рух: крок переходу=12% (а); крок переходу=70% (б)

Цей аналіз додатково підтверджується рис. 3.22, який доводить, що зняття матеріалу відбувається рівномірно при використанні ротаційного інструмента. Симетрична форма та геометрія інструмента забезпечує максимальну площу контакту з робочою поверхнею, що призводить до рівномірного зняття матеріалу та, як наслідок, до низьких помилок. Було виявлено, що при використанні інструмента з зигзагоподібною ТРІ і лінією сканування значення E/R є найнижчим. Вплив інструментів на інші ТРІ при широких діапазонах переходу продемонстровано в Додатку Г.

Вплив діаметра інструмента (ДІ). Як зазначалося вище, форма і геометрія інструмента має значення для зняття матеріалу і шорсткості поверхні, що є кінцевим ефектом помилок поверхні. Крім того, розмір інструмента впливає на характеристики похибки поверхні, оскільки різні розміри інструмента забезпечують різну площу контакту з поверхнею, тому, аналіз, заснований на розмірі інструмента, зокрема ДІ, є дуже важливим.

На рис. 3.23 показує, що інструменти малого розміру (малих діаметрів) демонструють високе відношення похибки до зняття незалежно від ТРІ. Малі

розміри вимагають вищої точності позиціонування інструмента, щоб уникнути залишкових слідів інструмента, які є джерелом помилок середньо-просторової частоти. Крім того, використання малих інструментів збільшує загальний час обробки.

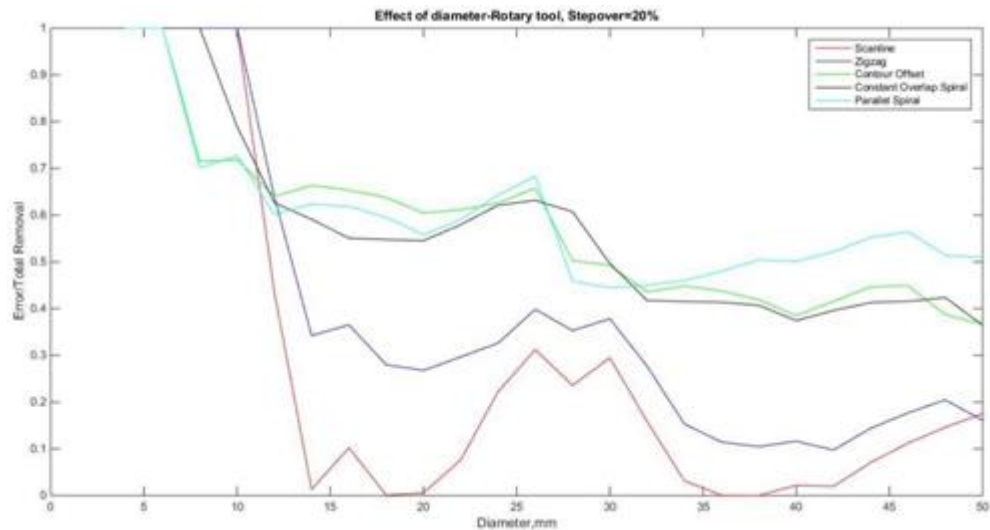
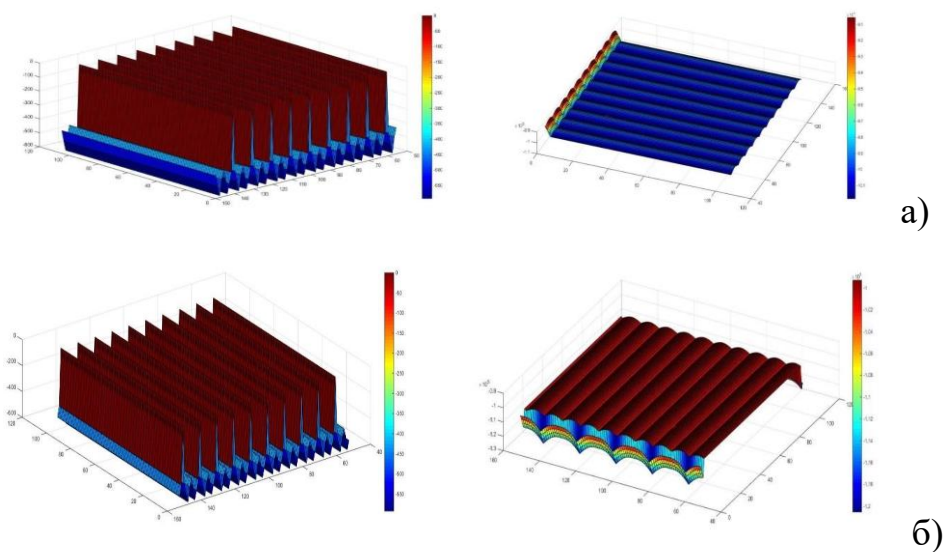


Рисунок 3.23 - Залежність E/R від діаметра (ротаційний інструмент)

Моделювання, показане на рис. 3.24, підтверджує нашу гіпотезу - інструмент діаметром 10 мм має відносно високі нерівності поверхні порівняно з інструментом діаметром 40 мм. Цей аналіз в основному проводився для ротаційного інструмента. Аналіз відношення похибки до зняття для щіткового та радіального інструментів наведено в Додатку Д.



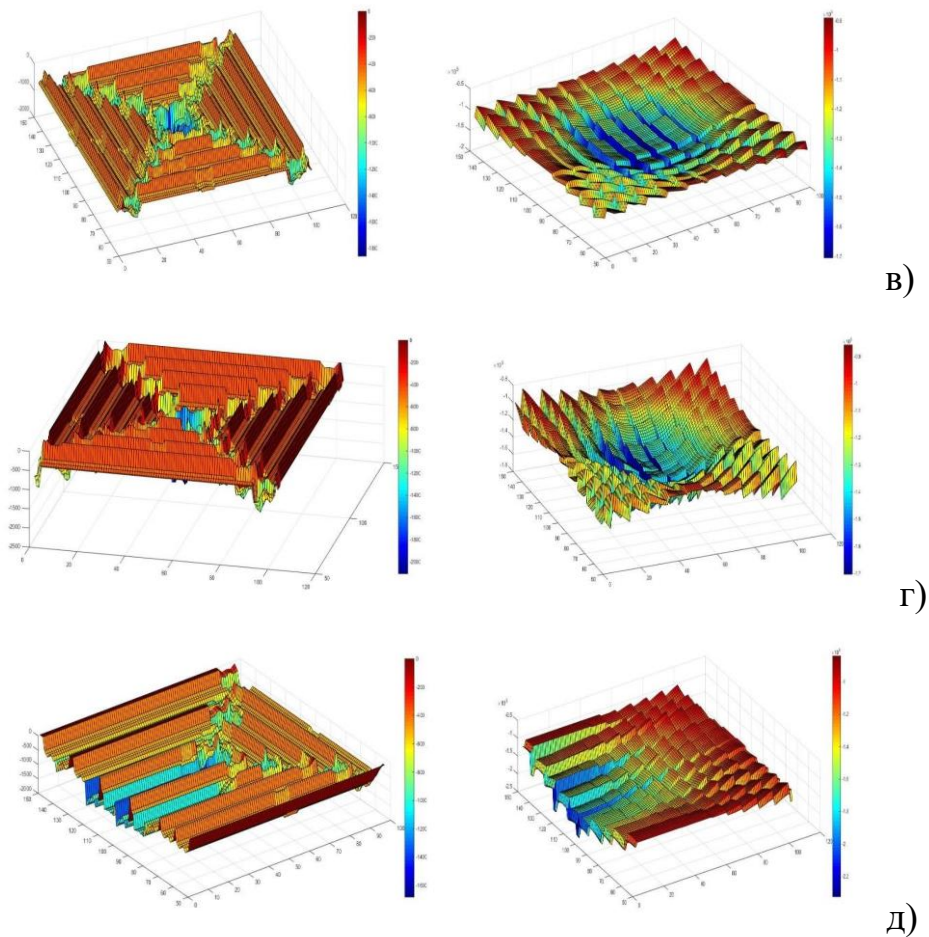


Рисунок 3.24 - Моделювання видалення матеріалу при діаметрах 10 мм і 40 мм: лінія сканування (а); зигзаг (б); зміщення контуру (в); спіраль з постійним перекриттям (г); паралельна спіраль (д)

Рис. 3.25 пояснює вплив ДІ на похибку поверхні при різних діапазонах переходу. Для спостереження було обрано 5 випадкових ДІ: 20 мм, 30 мм, 36 мм, 44 мм, 50 мм. Інструмент рухався по зигзагоподібній траєкторії, а відношення похибки до зняття було розраховано для різних значень кроку переходу. Хоча в цілому було виявлено, що більші інструменти дають вищу якість поверхні, деякі додаткові результати були отримані після детального аналізу.

Було виявлено, що 44-міліметровий інструмент при 15% переході має нижчий показник E/R у порівнянні з 50-міліметровим інструментом при 27% переході. Таким чином, величина переходу в поєднанні з ДІ має вирішальне значення при оцінці характеристик похибки обробки поверхні. Більші ротаційні та щіткові інструменти виявилися більш ефективними для мінімізації похибок. На

протипагу цьому, радіальні інструменти середнього розміру показали відносно низькі похибки, що дозволяє використовувати менші радіальні інструменти для шліфувальної обробки.

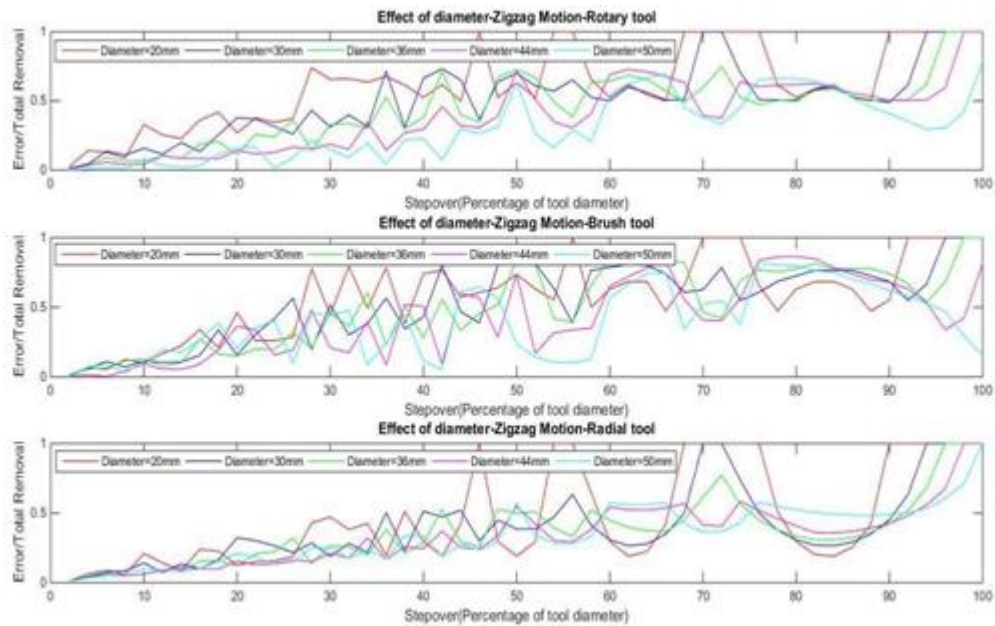


Рисунок 3.25 - Співвідношення Е/Р та кроку при різних діаметрах для роторного, щіткового та радіального інструмента

Функція впливу повороту інструмента. Несиметричність радіального інструмента призводить до генерації асиметричної функції впливу інструмента (TIF - Tool influence function). З рис. 3.26 видно, що вплив інструмента вздовж однієї осі не відповідає впливу на іншій.

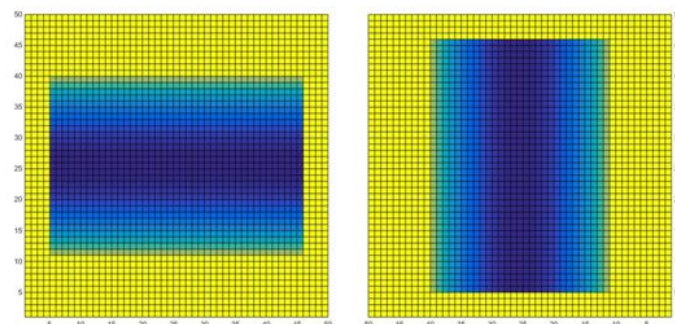


Рисунок 3.26 - Несиметрична функція впливу радіального інструмента

У загальному випадку TIF фіксуються на одній осі, коли він проходить всю поверхню обробки по заданій ТРІ. Високі похибки поверхні при зміщенні контуру, постійному перекритті спіральних і паралельних ТРІ через їх кутові ефекти спонукали до пошуку шляхів оптимізації цих траєкторій, а також до

вирішення проблеми кутових ефектів в ТРІ і шорсткості поверхні. Алгоритм повороту TIF-файлу описано в Додатку Е.

Процедура полягає в обертанні TIF щоразу, коли ТРІ досягає кута. Були розраховані характеристики зняття та E/R відношення похибки до зняття. Значення похибки були розраховані як для звичайної стратегії, так і для нової стратегії з поворотом TIF на кутах. Потім їх було порівняно, щоб оцінити вплив такого повороту на характеристики поверхні. Аналіз (рис. 3.27) показав, що відношення похибки до зняття або похибки поверхні значно зменшуються, коли TIF обертається або повертається на кути при будь-якому значенні переходу, особливо в діапазоні 20-30%. Це можна пояснити різницею в площі покриття, яку забезпечує поворот TIF по кутах. Поворот TIF на кутах забезпечує рівномірність зняття матеріалу з робочої поверхні, оскільки піки, що виникають при русі інструмента в одному напрямку, компенсуються впливом повернутого TIF.

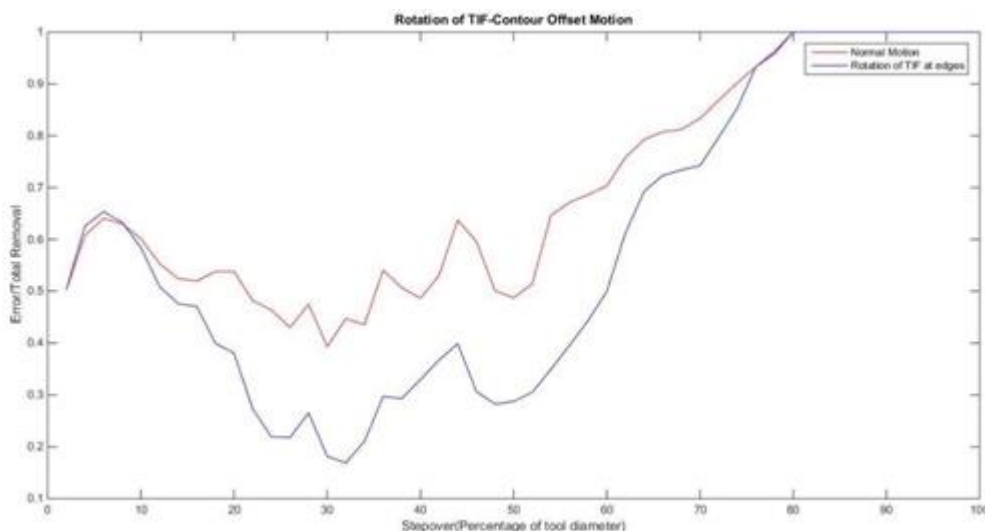


Рисунок 3.27 - Порівняння E/R та кроку переходу - звичайний рух та поворот TIF

Спостереження з рис. 3.28 підтверджують той факт, що поворот TIF на кутах має позитивний вплив на похибку поверхні. Відношення похибки до зняття також було обчислено для інших ТРІ. Подібні результати спостерігалися у всіх випадках, як можна побачити в Додатку Є. Ця стратегія може бути в першу чергу прийнята як підхід до оптимізації ТРІ для контурного зміщення, спіралі з постійним перекриттям і паралельної спіралі, коли ці ТРІ застосовуються, наприклад, при обробці заглиблень.

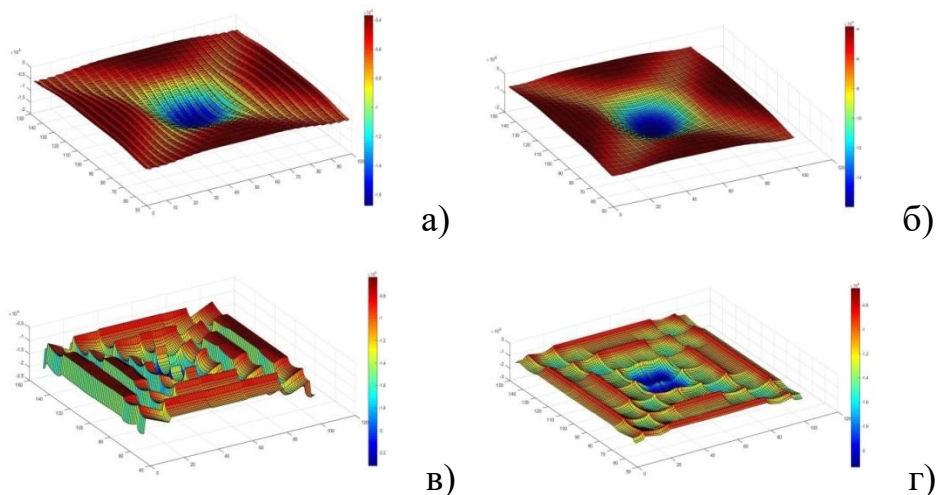


Рисунок 3.28 - Моделювання зняття матеріалу радіальним інструментом (а); зміщення контуру при переході через крок = 8% (б); з поворотом TIF (в); зміщення контуру при переході через крок = 30% (г)

Кілька ТРІ на одній поверхні. Було виявлено, що зміщення контуру, спіраль з постійним перекриттям і паралельні спіральні ТРІ призводять до високих помилок поверхні. У цьому випадку необхідно застосувати ефективну стратегію оптимізації інструмента, щоб зменшити похибки, спричинені цими ТРІ, і, як наслідок, підвищити якість процесу. Застосування однієї ТРІ над іншою було прийнято до уваги як стратегія, і значення похибки зняття були розраховані для цієї множини ТРІ. Отримані значення порівнювалися зі значеннями похибки при відпрацюванні тільки однієї ТРІ. Оскільки значення похибки для траєкторій сканування та зигзагоподібних траєкторій є мінімальними, ці ТРІ були виключені з аналізу. Ця стратегія була запропонована як оптимізаційний підхід.

На рис. 3.29 показано порівняння E/R відношення похибки до зняття при русі по спіралі з постійним перекриттям при різному кроці та при комбінації з іншими траєкторіями, такими як лінія розгортки, зигзаг, зсув контуру та паралельна спіраль при використанні ротаційного інструмента. Спочатку застосовується ТРІ спіраль з постійним перекриттям. Після того, як ТРІ завершена, поверх неї виконується інша траєкторія, наприклад, зигзагоподібна.

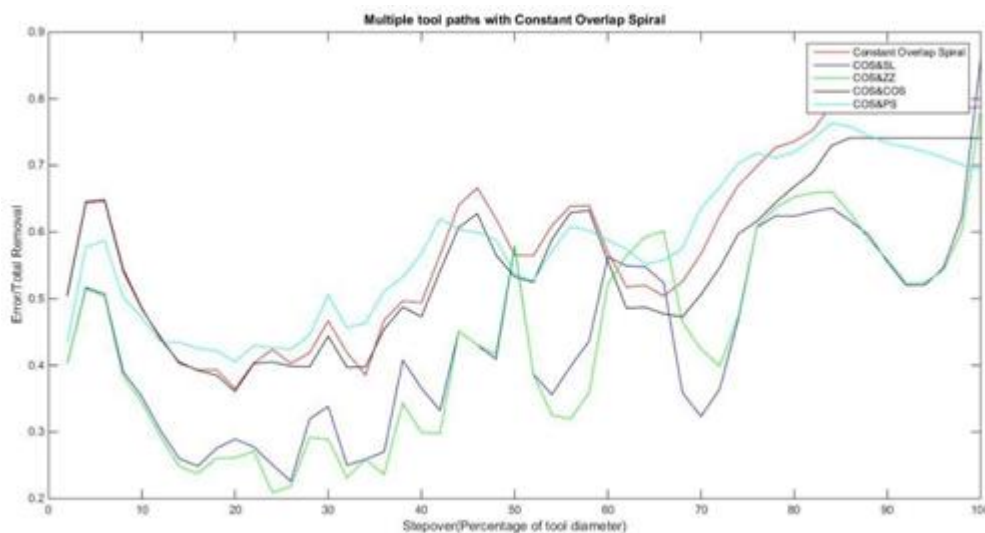


Рисунок 3.29 - Залежність E/R від кроку переходу - ТРІ з постійним рухом по спіралі з перекриттям в комбінації з кількома іншими ТРІ (ротаційний інструмент)

На рис. 3.30 показано зміну зняття матеріалу, коли до постійного руху по спіралі з перекриттям додається інша ТРІ при використанні ротаційного інструмента з кроком перекриття 24%. Аналіз, проведений щодо руху по спіралі з постійним перекриттям, і спостереження з симуляцій показали, що виконання ТРІ типу зигзаг або лінія сканування над попередньо виконаною траєкторією по спіралі з постійним перекриттям (рис. 3.29) значно зменшить E/R похибку до величини зняття, тим самим забезпечуючи аспект оптимізації. Однак комбінація спіралі з постійним перекриттям і зміщенням контуру не показала значних відхилень від початкового результату. Паралельна спіраль, додана до ТРІ зі спіраллю з постійним перекриттям, призвела до збільшення E/R відношення похибки до зняття, доводячи, що така комбінація не є доцільною.

Моделювання також проводилося для ТРІ зі зміщенням контуру і паралельною спіраллю, в яких відповідні ТРІ комбінувалися з іншими доступними ТРІ. Вони були проаналізовані при використанні всіх трьох інструментів. Моделювання та відповідні графіки залежності E/R від кроку для кожної з варіацій подано в Додатку Ж. Траєкторії інструмента з високими похибками поверхні в поєднанні з зигзагоподібною траєкторією дали найкращі результати з точки зору мінімізації E/R відношення похибки до зняття. Комбінація ТРІ, наприклад, контурне зміщення з зигзагоподібним, дала кращі

результати, оскільки піки або нерівності, залишені контурним зміщенням, виправляються і згладжуються при наступному русі інструмента, в даному випадку, зигзагоподібним.

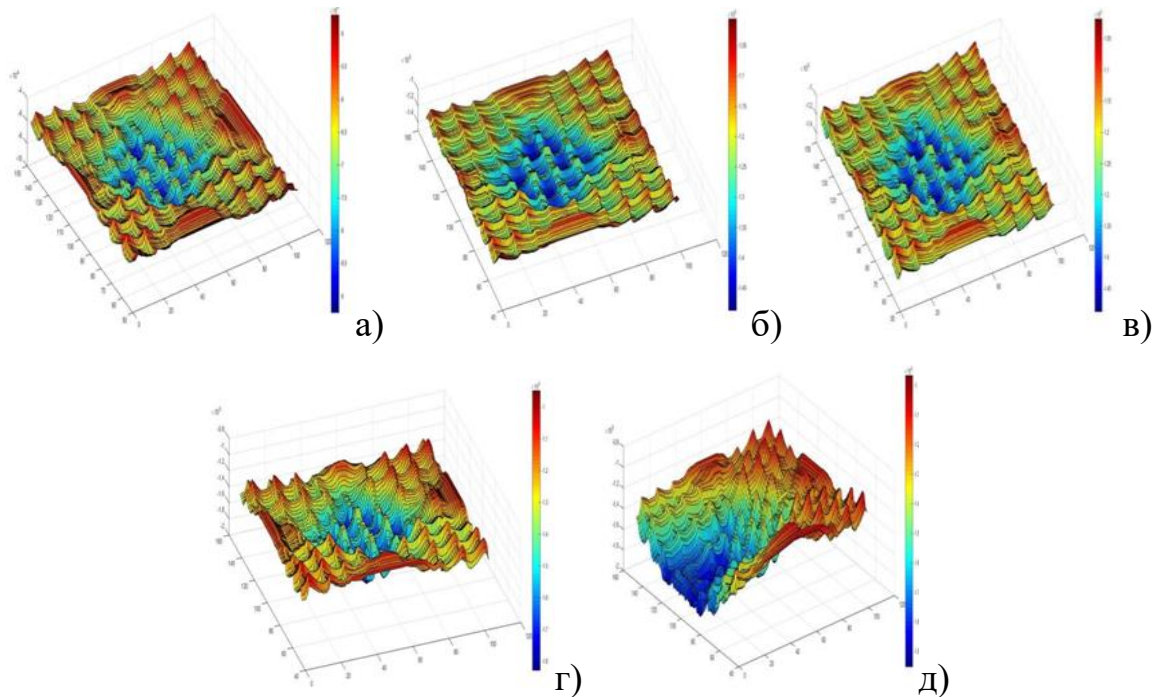


Рисунок 3.30 - Моделювання зняття матеріалу при кроці перекриття = 24%:
спіраль з постійним перекриттям (а); спіраль з постійним перекриттям + ТРІ лінія
сканування (б); спіраль з постійним перекриттям + ТРІ зигзаг (в); спіраль з
постійним перекриттям + ТРІ зміщення контуру (г); спіраль з постійним
перекриттям + ТРІ паралельна спіраль (д)

Отже, стратегія виконання декількох ТРІ одна за одною дала позитивні результати для оптимізації і сприяла поліпшенню рівномірності профілю зняття матеріалу.

Вплив розподілу тиску на поверхню обробки. Під час шліфування розподіл тиску по всій поверхні є важливим фактором, який визначає якість поверхні. Для цього конкретного аналізу тиск, що застосовується для обробки, поступово зменшувався від початкового тиску до заданого мінімального значення рівними кроками, коли інструмент рухався в напрямку, ортогональному ТРІ, або коли він робив бічний крок. В даному моделюванні інструмент рухається з однаковим тиском по всій поверхні як в прямому, так і в ортогональному напрямку. Зокрема, при малих діапазонах переходу, проходження інструментом замкнутих ліній

траєкторії в ортогональному напрямку призведе до нерівномірності розподілу тиску по поверхні.

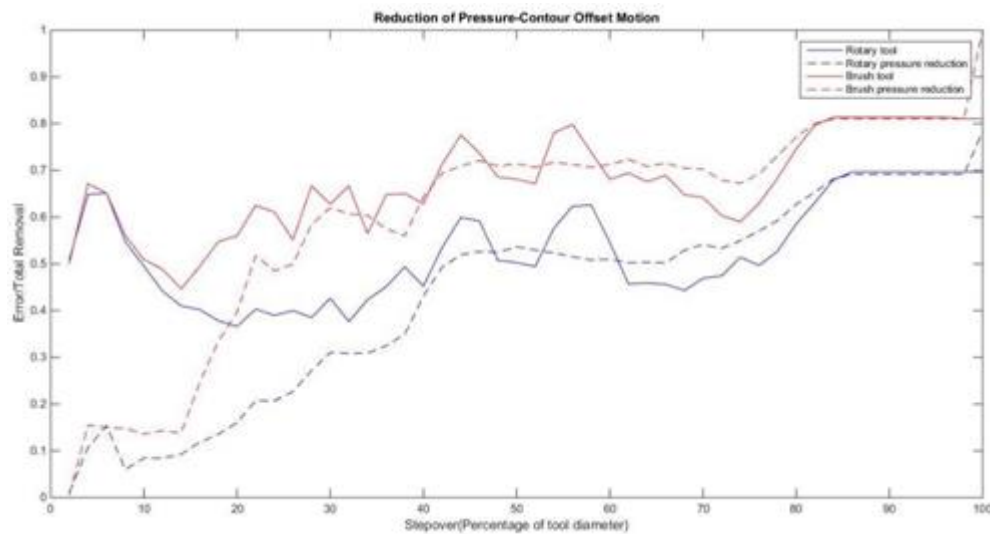


Рисунок 3.31 - Залежність E/R від величини кроку переходу, зменшення тиску

На рис. 3.31 показано вплив зменшення тиску вздовж напрямку бічного кроку на відношення похибки до зняття при контурному зміщенні інструмента під час використання ротаційного інструмента. На рис. 3.32 показано зміни зняття матеріалу при контурному зміщенні інструмента під дією зменшення тиску в ортогональному або бічному напрямку для ротаційного і щіткового інструмента.

Аналіз обох рисунків створює враження, що поступове зменшення тиску в бічному напрямку призводить до зменшення E/R відношення похибки до зняття. Зазвичай, коли по всій поверхні прикладається постійний тиск, сусідні лінії траєкторії призводять до вищого відносного результуючого тиску на цій лінії ТРІ порівняно з попередньою лінією ТРІ через перекриття ТРІ. Це, в свою чергу, призведе до нерівномірності зняття поверхні, що призведе до більших похибок на поверхні. Однак у цій новій стратегії зменшення тиску рівними кроками вздовж напрямку бічного кроку забезпечує рівномірність розподілу тиску по поверхні. Отже, зняття поверхні відбувається рівномірно, що призводить до менших помилок.

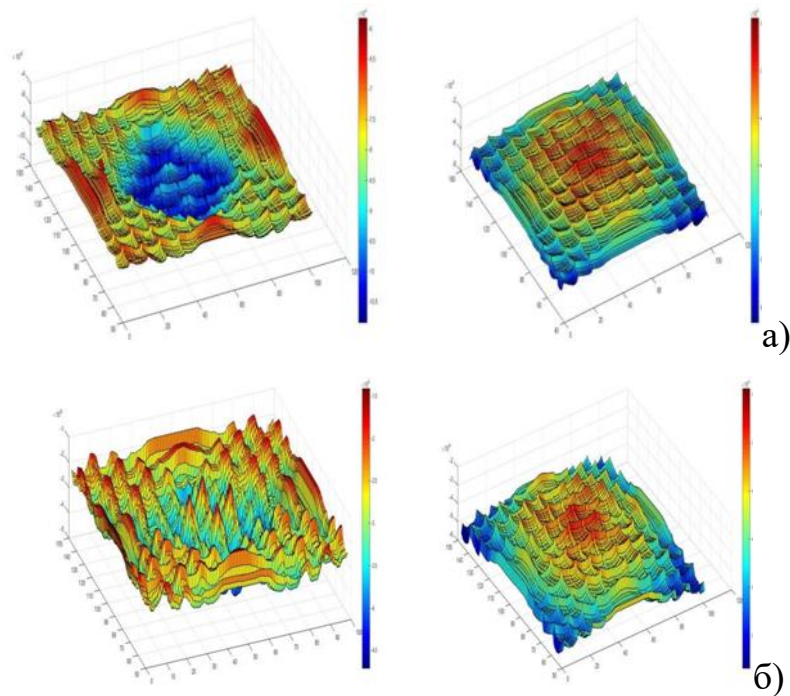


Рисунок 3.32 - Моделювання зняття матеріалу при зміщенні контуру на 20% при постійному тиску та зі зменшенням тиску при бічному переміщенні: обертовий інструмент (а); щітка (б)

Хоча стратегія дала позитивні результати для спіральних траєкторій з постійним перекриттям, зміщенням контуру і паралельних спіральних траєкторій, Е/Р відношення похибки до зняття збільшилося для траєкторій сканування і зигзагоподібних траєкторій із застосуванням цієї нової стратегії (рис. 3.33).

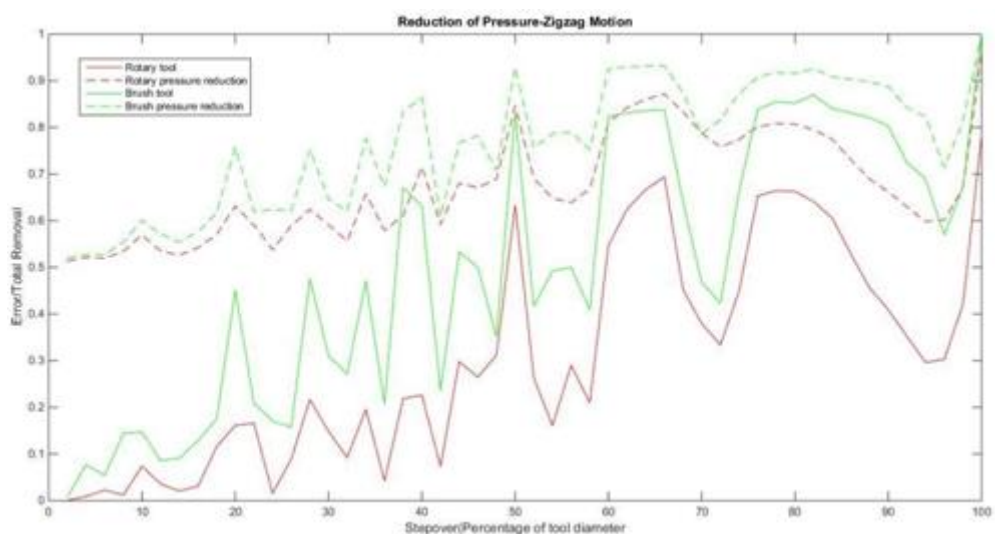


Рисунок 3.33 - Відношення Е/Р в порівнянні з переходом, зменшенням тиску (зигзагоподібна ТРІ)

Зменшення тиску також було застосовано для інших ТРІ, що подано в Додатку 3. Зменшення тиску в ортогональному напрямку було здійснено для всіх траєкторій руху інструменту з урахуванням впливу кожного інструменту. Потім для всіх випадків було обчислено похибку знімання. Результат показує, що в цій модифікованій ситуації роторний інструмент, який рухається по паралельній спіральній траєкторії, забезпечує найнижче значення E/R в порівнянні з іншими траєкторіями (Додаток 3, рис. 4).

Оптимізація Тагучі - планування експериментів. Надійна конструкція функціональних поверхонь деталей обладнання має вирішальне значення для забезпечення стійкості до динамічних зовнішніх і внутрішніх змін, а також змін між окремими одиницями обладнання.

Для того, щоб зменшити варіабельність оброблюваної поверхні, важливо виявити значущі змінні, які впливають на процес шліфування. Під час процесу шліфування численні параметри взаємодіють один з одним і впливають на якість обробки: крок, ДІ, ТРІ тощо. Неправильна комбінація цих параметрів може спричинити різні виробничі ускладнення у вигляді багаторазових проходів по обробленій поверхні та тривалого часу виконання замовлення, що, в свою чергу, знижує конкурентну цінову перевагу продукту. Визначення найбільш активних змінних, які мають найбільший вплив на якість поверхні, може бути ефективно досягнуто за допомогою методу оптимізації Тагучі.

Ключові керовані фактори для оптимізації визначені на основі результатів моделювання в MATLAB та аналізу літератури. До них відносяться: ТРІ, ДІ, швидкість, тиск і крок. Максимальна ефективність оцінки досягається, коли рівні параметрів є мінімальними. Для кожного з п'яти параметрів визначено чотири рівні. Хоча існує п'ять рівнів генерування ТРІ, паралельна спіраль не береться до уваги, оскільки вона показала значущо високі рівні похибки до відношення зняття (E/R) при всіх значеннях кроку переходу. Рівні переходу визначалися на основі змодельованого графіка, де відношення E/R було відносно низьким для інших взаємодіючих параметрів, і приймалися як відсоткове значення ДІ. Значення ДІ, відносної швидкості та тиску визначалися на основі імітаційної поведінки функції впливу інструмента (TIF). Експерименти проводилися згідно з ортогональним

масивом L16', оскільки він відповідає обраній кількості параметрів та рівнів. Масив генерує три набори значень E/R для 16 експериментів (табл. 3.1). Значення бралися з попередньо згенерованих алгоритмів MATLAB.

Таблиця 3.1 - Параметри оптимізації Тагучі

№ експер.	Параметри					Підходи		
						(E/R) ₁	(E/R) ₂	(E/R) ₃
	Шлях інструмента	Крок переходу (% від ДІ), мм	Тиск, Па	Швидкість, об./хв.	ДІ, мм	Роторний інструмент	Щітка	Радіальний інструмент
1	Лінія сканування	10	10	500	20	0,2491	0,1429	0,1429
2	Лінія сканування	20	15	1000	30	0,2947	0,2778	0,2429
3	Лінія сканування	30	20	1500	40	0,2788	0,1333	0,2103
4	Лінія сканування	40	25	2000	50	0,2700	0,1176	0,1910
5	Зигзаг	10	15	1500	50	0,0738	0,2364	0,1448
6	Зигзаг	20	10	2000	40	0,1163	0,4615	0,2016
7	Зигзаг	30	25	500	30	0,3111	0,5500	0,3006
8	Зигзаг	40	20	1000	20	0,5254	0,6875	0,4200
9	Зміщення контура	10	20	2000	30	0,6335	0,6538	0,6623
10	Зміщення контура	20	25	1500	20	0,6048	0,6111	0,6259
11	Зміщення контура	30	10	1000	50	0,4262	0,6889	0,3530
12	Зміщення контура	40	15	500	40	0,7516	0,2069	0,4849
13	Спіраль з постійним перекриттям	10	25	1000	40	0,5372	0,6490	0,6331
14	Спіраль з постійним перекриттям	20	20	500	50	0,3647	0,5488	0,5215
15	Спіраль з постійним перекриттям	30	15	2000	20	0,6582	1	0,5594
16	Спіраль з постійним перекриттям	40	10	1500	30	0,5553	0,3939	0,3783

Розрахунок відношення сигнал/шум (S/N - signal-to-noise) здійснюється за формули (3.1), із застосуванням значень, наведених в табл. 3.1. Розглянемо математичні розрахунки першого експеримента.

$$S_{N1} = 10 \cdot \log \left(\frac{\frac{1}{N} \cdot (S_{m1} + V_{E1})}{V_{E1}} \right), \quad (3.1)$$

де S_{N1} - відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, S/N);

N - кількість підходів (для 3 інструментів), у даному випадку $N = 3$;

S_{m1} - середньоквадратичне значення (середня похибка);

V_{E1} - середньоквадратичне значення залишкової змінності (варіація похибки).

Розрахуємо значення S_{m1} - середню похибку для першого експерименту за формулою:

$$S_{m1} = \left(\frac{(E/R)_1 + (E/R)_2 + (E/R)_3}{3} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$S_{m1} = (0,2491 + 0,1429 + 0,1429)^2 / 3 = 0,10112688$$

Наступний крок - розрахунок V_{E1} (варіація похибки) за формулою:

$$V_{E1} = \frac{S_{E1}}{N - 1} \quad (3.3)$$

При цьому

$$S_{E1} = S_{T1} - S_{m1}, \quad (3.4)$$

а

$$S_{T1} = ((E/R)_1)^2 + ((E/R)_2)^2 + ((E/R)_3)^2 \quad (3.5)$$

тоді $S_{T1} = (0,2491)^2 + (0,1429)^2 + (0,1429)^2 = 0,10768866,$

відповідно $S_{E1} = 0,10768866 - 0,10112688 = 0,00656178$

врахуємо, що N = кількість підходів = 3, тоді

$$V_{E1} = 0,00656178 / (3 - 1) = 0,00656178 / 2 = 0,00328089$$

Підставивши відповідні значення, отримано значення S_{N1} ,

$$S_{N1} = 10 \log (1/N) \times (S_{m1} - V_{E1}) / V_{E1} \text{ отримаємо}$$

$$S_{N1} = 10 \log (1/3) \times (0,10112688 - 0,00328089) / 0,00328089 = 9,9743$$

Аналогічно розраховувалися значення S/N для решти 16 експериментів (табл. 3.2) та планували експерименти з оптимізації шліфування за методом Тагучі (табл. 3.3).

Таблиця 3.2 - Відношення S/N

№ експеримента	S_{m1}	S_{T1}	S_{E1}	S_N
1	0,10112688	0,10768866	0,00656178	9,9743
2	0,10112688	0,22302134	0,00139652	20,2339
3	0,22162572	0,13972442	0,01059716	8,9150
4	0,11159265	0,12321076	0,011618107	7,8319
5	0,06900833	0,08229844	0,013290107	4,9530
6	0,20248812	0,26715050	0,064662380	2,4477
7	0,44984896	0,48964357	0,039794607	8,5753
8	0,88878747	0,92510141	0,036313940	12,0366
9	1,26828012	1,26874358	0,000463460	32,6103
10	1,13074241	1,13097706	0,000234647	35,0681
11	0,71843920	0,78083865	0,062399447	8,6583
12	0,69446785	0,84283818	0,148370327	4,4515
13	1,10328416	1,11060045	0,007316287	20,00086
14	0,68640833	0,70614978	0,019741447	13,5882
15	1,63924992	1,74615560	0,106905680	9,9515
16	0,58741875	0,60662619	0,019207440	13,0222

Таблиця 3.3 - Планування експериментів за методом Тагучі

№ експ.	Шлях інструмента	Крок переходу (% від ДІ), мм	Тис, Па	Швидкість, об./хв.	ДІ, мм	Роторний інструмент	Щітка	Радіальний інструмент	S_N
1	Лінія сканування	10	10	500	20	0,2491	0,1429	0,1588	9,9743
2	Лінія сканування	20	15	1000	30	0,2947	0,2778	0,2429	20,2339
3	Лінія сканування	30	20	1500	40	0,2788	0,1333	0,2103	8,9150
4	Лінія сканування	40	25	2000	50	0,2700	0,1176	0,1910	7,8319
5	Зигзаг	10	15	1500	50	0,0738	0,2364	0,1448	4,9530
6	Зигзаг	20	10	2000	40	0,1163	0,4615	0,2016	2,4477
7	Зигзаг	30	25	500	30	0,3111	0,5500	0,3006	8,5753
8	Зигзаг	40	20	1000	20	0,5254	0,6875	0,4200	12,0366
9	Зміщення контура	10	20	2000	30	0,6335	0,6538	0,6623	32,6103
10	Зміщення контура	20	25	1500	20	0,6048	0,6111	0,6259	35,0681
11	Зміщення контура	30	10	1000	50	0,4262	0,6889	0,3530	8,6583
12	Зміщення контура	40	15	500	40	0,7516	0,2069	0,4849	4,4515
13	Спіраль з постійним перекриттям	10	25	1000	40	0,5372	0,6490	0,6331	20,00086
14	Спіраль з постійним перекриттям	20	20	500	50	0,3647	0,5488	0,5215	13,5882
15	Спіраль з постійним перекриттям	30	15	2000	20	0,6582	1	0,5594	9,9515
16	Спіраль з постійним перекриттям	40	10	1500	30	0,5553	0,3939	0,3783	13,0222

Окремі параметри об'єднували разом для обчислення значення Δ , яке є різницею між максимальним і мінімальним значеннями відношення S/N сигнал/похибка в таблиці окремих параметрів. Нижче в табл. 3.4-3.8 наведено відповідну теорію.

Таблиця 3.4 - Параметр: TPI

Траєкторія руху інструмента	Середні значення
Лінія сканування	11,7388532
Зигзаг	7,0032004 (<i>Min</i>)
Зміщення контура	20,1970802 (<i>Max</i>)
Спіраль з постійним перекриттям	14,1301713
$\Delta = \text{Max} - \text{Min}$	13,19387984

Таблиця 3.5 - Параметр: діаметр інструмента

Діаметр інструмента, мм	Середні значення
20	16,75766
30	18,61045 (<i>Max</i>)
40	8,95581
50	8,75781 (<i>Min</i>)
$\Delta = \text{Max} - \text{Min}$	9,8525

Таблиця 3.6 - Параметр: крок інструмента

Крок переходу (% від діаметра інструмента), мм	Середні значення
10% діаметра інструмента	16,8865
20% діаметра інструмента	17,8344 (<i>Max</i>)
30% діаметра інструмента	9,0251 (<i>Min</i>)
40% діаметра інструмента	9,3356
$\Delta = \text{Max} - \text{Min}$	8,8093

Таблиця 3.7 - Параметр: швидкість поворот інструмента

Швидкість, об./хв.	Середні значення
500	9,1473 (<i>Min</i>)
1000	15,2344
1500	15,4897 (<i>Max</i>)
2000	13,2103
$\Delta = Max - Min$	6,342391

Таблиця 3.8 - Параметр: тиск інструмента

Тиск, Па	Середні значення
10	8,52566 (<i>Min</i>)
15	9,89752
20	16,65033
25	17,87099 (<i>Max</i>)
$\Delta = Max - Min$	9,345328

Різниця Δ з найбільшим значенням вважається кращою і представляє візуальний висновок про важливість відносного інтерактивного параметра (табл. 3.9-3.10).

Таблиця 3.9 - Ранжування параметрів

Рівні	Шлях інструмента	Діаметр інструмента, мм	Тиск, Па	Крок переходу (% від ДІ), мм	Швидкість, об./хв.
1	11.7388532	16.75766	8.52566	16.8865	9.1473
2	7.00320040	18.61045	9.89752	17.8344	15.2344
3	20.1970802	8.95581	16.65033	9.02515	15.4897
4	14.1301713	8.75781	17.87099	9.33560	13.2103
Δ	13.19387984	9.8525	9.3453284	8.8093393	6.342391
Місце в рейтингу	1	2	3	4	5

Таблиця 3.10 - Ранжування в низхідному порядку

Місце в рейтингу	Параметр
1	ТPI
2	Діаметр інструмента, мм
3	Тиск інструмента, Па
4	Крок переходу (% від діаметра інструмента), мм
5	Швидкість інструмента, об./хв.

Цей набір з 16 експериментів дозволяє зробити висновок, що ТPI має найбільше значення для формування висновку про ефективність результатів проведеної роботи.

3.2 Обговорення результатів

Рівномірність зняття матеріалу впливає на фінішну обробку, таку як шліфування, а в деяких випадках і на точність форми обробленої поверхні. На рівномірність зняття матеріалу впливають різні параметри. Дослідження було присвячено аналізу впливу TPI на зняття матеріалу та якість поверхні. TPI, згенеровані за допомогою алгоритмів в MATLAB, були прийняті разом з функцією впливу для генерації симуляції зняття матеріалу з робочої поверхні, яка слугувала основою для аналізу спостережень. З метою характеристики процесу шліфування під впливом різних факторів за показник для порівняння було взято E/R відношення похибки до зняття. Цей показник має прямий вплив на рівномірність зняття матеріалу і точність форми поверхні, а також на висоту вершини до западини, що має прямий зв'язок з шорсткістю поверхні. В ході дослідження були зроблені наступні спостереження:

1) для оцінки відносної важливості параметрів, які впливають на похибку поверхні і, як наслідок, на якість поверхні, було проведено планування експериментів за методом Тагучі. Аналіз проводився серед різних факторів, таких як TPI, тиск, швидкість, крок і ДІ. Вивчався вплив кожного з цих параметрів на поверхню, однак до критичних умов, першорядне значення має визначення основного фактору. Результати методу Тагучі показали, що TPI має найбільше значення при обчисленні та оцінці характеристик похибки поверхні. Теорії моделювання та аналізу зняття матеріалу в автоматизованих процесах обробки також наголошують на важливості TPI для кінцевої якості поверхні. Таким чином, було підтверджено важливість TPI у визначенні якості поверхні;

2) аналіз впливу кроку переходу на зняття матеріалу і похибки поверхні показав, що похибки поверхні збільшуються зі збільшенням значення кроку переходу, тоді як швидкість зняття матеріалу зменшується. Отже, як зазначено в літературі, в процесах обробки бажано використовувати нижчі діапазони набігання, ніж зазначено в літературі. Однак, дуже низькі діапазони підведення можуть призвести до перевитрат на оброблюваній поверхні, що може негативно вплинути на термін служби інструмента. Крім того, надзвичайно низький крок

переходу призводить до тривалого часу обробки. Враховуючи всі ці фактори, оптимальним для шліфувальної обробки виявився діапазон переходу 10-20% від ДІ. Аналіз також показав, що зигзагоподібні та скануючі траєкторії інструмента мають найменші похибки серед ТРІ, що використовувалися в цьому дослідженні, при всіх значеннях величини кроку переходу;

3) досліджено вплив геометрії інструмента на похибку поверхні. Результат спостережень показав, що ротаційний або пластинчастий інструмент дає мінімальне відношення похибки до зняття. Симетрична природа і геометрія пластинчастого інструмента забезпечує максимальну площу контакту з робочою поверхнею, що призводить до рівномірного зняття матеріалу та, як наслідок, до низьких похибок. Було виявлено, що при використанні інструмента з зигзагоподібною ТРІ та лінією сканування значення E/R є найнижчим;

4) за результатами експерименту Тагучі, ДІ посів друге місце в рейтингу відносної значущості факторів, що впливають на якість поверхні. Спостерігалися характеристики похибки зняття при різних ДІ. Аналіз показав, що використання менших інструментів призводило до більших похибок поверхні. Це пояснюється тим, що менші інструменти вимагають більш високої точності позиціонування, щоб уникнути залишкових слідів на робочій поверхні, які є ще одним джерелом середньопросторових частотних похибок. Водночас використання малих інструментів збільшує загальний час обробки. Інструменти з відносно більшими діаметрами забезпечують значну площу контакту з оброблюваною поверхнею, тим самим забезпечуючи рівномірність профілю зняття. Аналіз також показав, що для досягнення максимальної ефективності можна використовувати більші роторні та щіткові інструменти, а також радіальні інструменти помірних розмірів;

5) поворот TIF на кутах є відносно новою концепцією, яка була застосована для того, щоб забезпечити основу для оптимізації траєкторій контурних інструментів, які регулярно стикаються з кутами, що в кінцевому підсумку призводить до високих похибок поверхні. Зняття на кутах є вищим, виходячи з відносного часу перебування інструмента, оскільки швидкість зняття може бути різною на коротких сегментах траєкторії через ймовірне накопичення сміття в місці контакту з інструментом, де напрямок ТРІ змінюється поблизу кутів.

Спостереження та аналіз показали, що поворот TIF дійсно допоможе зменшити похибки поверхні TPI і в першу чергу застосовується для контурних траєкторій. Це можна пояснити різницею в площі покриття, яку забезпечує поворот TIF на кутах. Поворот TIF по кутах забезпечує рівномірність зняття з робочої поверхні, оскільки піки, що виникають при русі інструмента в одному напрямку, компенсуються впливом повернутого TIF;

6) звичайні траєкторії інструмента можна модифікувати або навіть додавати додаткові траєкторії до TPI, щоб отримати максимальну віддачу від TPI в верхній частині лінії. Було досліджено вплив проходження по поверхні однієї TPI за іншою, і спостереження показали, що такий метод додавання TPI значно зменшує відношення похибки до зняття. Контурні траєкторії при нанесенні зигзагоподібних траєкторій показали найкращий результат серед різних комбінацій. Піки, що залишаються після процесу видалення під одним контуром інструмента, згладжуються наступним контуром інструмента, забезпечуючи відносно низьку похибку поверхні;

7) інша нова стратегія, застосована в цьому дослідженні, полягала в зменшенні тиску під час переміщення інструмента в напрямку бічного кроку або в ортогональному напрямку. Детальний аналіз показав, що зменшення тиску вздовж напрямку бічного кроку сприяє зменшенню відношення похибки до зняття для контурних траєкторій. З цією новою стратегією зменшення тиску рівними кроками вздовж напрямку бічного кроку забезпечує рівномірність розподілу тиску по поверхні. Однак було виявлено, що ця стратегія демонструє зворотний ефект при застосуванні до зигзагоподібної або скануючої TPI;

8) незважаючи на те, що рівномірність розподілу тиску є бажаним аспектом, зміна тиску не призвела до жодних змін у значенні співвідношення похибки до зняття матеріалу. Швидкість зняття матеріалу різко змінювалася при зміні як тиску, так і швидкості, проте не спостерігалось жодних змін у співвідношенні похибки до зняття, як показано на рис. 3.34.

Як бачимо, зигзагоподібна TPI показала мінімальне відношення похибки до зняття матеріалу в порівнянні з іншими TPI при різних діапазонах тиску. Це підтверджує той факт, що зигзагоподібна TPI є найбільш ефективною при

чистовій обробці, забезпечуючи рівномірне зняття матеріалу і високу якість поверхні. Незважаючи на те, що ТРІ по скануючій лінії також дає низькі похибки, постійне переміщення інструмента по цій траєкторії збільшує час обробки, що робить цю ТРІ менш ефективною.

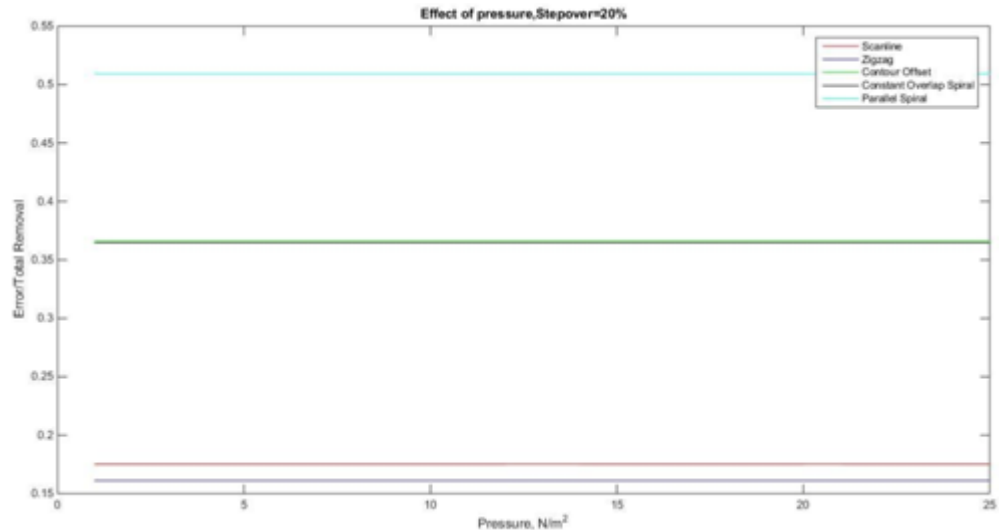


Рисунок 3.34 - Залежність E/R від тиску, крок переходу = 20%

Детальний аналіз різних факторів, що впливають на якість поверхні, проведений в цьому дослідженні, допоміг оцінити процес з різних точок зору і запропонував суттєві рішення, що забезпечують високу якість поверхні.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Вимоги охорони праці під час роботи зі шліфувальними верстатами

Безпека праці при експлуатації шліфувальних верстатів є важливим елементом загальної системи охорони праці на виробництві. Обробка матеріалів шліфуванням пов'язана з підвищеним ризиком отримання травм, впливом шкідливих виробничих факторів, а також з небезпекою виникнення аварійних ситуацій. Основними потенційними небезпеками є механічні травми внаслідок обертання абразивного круга, викид частинок, шум, вібрація, пил та небезпечні фізичні навантаження. Вимоги охорони праці регламентуються низкою нормативно-правових актів, включаючи Закони України «Про охорону праці», ДСТУ, ДБН та галузеві інструкції [45-46].

Перед початком роботи на шліфувальному верстаті працівник повинен пройти обов'язковий інструктаж з охорони праці, а також мати відповідну професійну підготовку. Дозволяється допуск до роботи лише осіб, які пройшли медичний огляд і не мають протипоказань до виконання робіт підвищеної небезпеки. Працівник зобов'язаний користуватися засобами індивідуального захисту: захисними окулярами або щитками, навушниками або протишумами, робочими рукавицями, спецодягом з вогнестійких матеріалів. За наявності високого рівня пиловиділення доцільне використання респіратора [47].

Перед запуском верстата необхідно здійснити його візуальний огляд. Особливу увагу слід звертати на стан шліфувального круга: він не повинен мати тріщин, вибоїн або інших пошкоджень. Кріплення круга має бути надійним і відповідати стандартам. Перед установленням нового круга його обов'язково перевіряють на балансування і на відсутність дефектів шляхом легкого постукування дерев'яною паличкою - якісний круг дає чистий дзвінкий звук. Шліфувальний круг повинен бути обраний відповідно до матеріалу обробки та режиму роботи. Заборонено використовувати круги з вичерпаним терміном придатності.

Пуск і зупинка верстата мають здійснюватися лише за допомогою штатної пускової апаратури. Забороняється запускати верстат за допомогою прямого вмикання в електромережу або вручну обертати круг. Після увімкнення верстат має працювати в холостому режимі не менше однієї хвилини. Це дозволяє виявити сторонні шуми, вібрацію або динамічну розбалансованість круга. Робота із заготовками дозволяється тільки після повної стабілізації режиму обертання.

Під час роботи забороняється застосовувати надмірне зусилля на подачу заготовки, оскільки це може призвести до перевантаження круга та його руйнування. Не допускається обробка деталей, що мають сторонні вклучення, тріщини або нестійку форму кріплення. Оброблювані заготовки повинні бути міцно закріплені, а їхнє переміщення здійснюється за допомогою пристроїв, які унеможливають контакт рук працівника з робочою зоною.

Одним з основних шкідливих факторів при шліфуванні є абразивний пил, який виникає в процесі обробки. Він має мікроскопічні розміри і може проникати в дихальні шляхи, що становить небезпеку для здоров'я працівників. У зв'язку з цим верстати повинні бути обладнані витяжною вентиляцією, а в приміщенні необхідно забезпечити регулярне прибирання з використанням промислових пилососів. Робоча зона має бути добре освітлена, а рівень шуму - не перевищувати гранично допустимих значень, що встановлені санітарними нормами. За необхідності використовують засоби активної шумозахисту.

Також важливо дотримуватися вимог електробезпеки. Шліфувальні верстати повинні бути заземлені, електрообладнання - ізольоване, а кабелі - цілісні. Обслуговування електричних частин допускається тільки електротехнічним персоналом. Забороняється працювати з відкритими клемми або при пошкодженій ізоляції. У разі виявлення несправностей верстата його експлуатація припиняється до повного усунення дефектів. Не допускається самостійне втручання працівника в конструкцію верстата без дозволу та інструкції від технічної служби.

Під час перерви в роботі або при завершенні зміни шліфувальний верстат необхідно зупинити, вимкнути від живлення та прибрати робоче місце. Заборонено залишати верстат у ввімкненому стані без нагляду. Особливу увагу

приділяють профілактичному технічному обслуговуванню верстатів - регулярно перевіряють стан кріплень, справність електросистеми, мастила рухомих частин та справність захисних кожухів.

Під час виникнення аварійної ситуації, наприклад, руйнування круга, займання або ураження електричним струмом, працівник повинен негайно зупинити верстат, повідомити керівника та вжити заходів для локалізації інциденту відповідно до інструкції з охорони праці. Кожне підприємство повинно мати затверджений порядок дій у разі нещасного випадку, а персонал - бути з ним ознайомлений [48].

Таким чином, дотримання вимог охорони праці під час роботи зі шліфувальними верстатами значно знижує ризик виробничого травматизму і сприяє створенню безпечних умов праці. Технічна справність обладнання, належна підготовка персоналу, систематичний контроль та використання засобів індивідуального захисту є основою запобігання нещасним випадкам на виробництві.

4.2 Журнали обліку та періодичні перевірки відповідності нормам безпеки при роботі зі шліфувальними верстатами

Забезпечення системного контролю за безпекою експлуатації шліфувальних верстатів неможливе без організації чіткого документообігу, зокрема ведення спеціалізованих журналів обліку. Згідно з вимогами нормативно-правових актів з охорони праці, на кожному підприємстві, де здійснюються роботи із застосуванням шліфувального обладнання, повинні бути впроваджені та постійно актуалізовані відповідні реєстраційні документи. Ці журнали є елементом системи управління охороною праці і мають юридичну силу у випадку перевірок або розслідування нещасних випадків.

До основних видів журналів, які ведуться у виробничих підрозділах, належать: журнал реєстрації інструктажів з охорони праці (вступного, первинного, повторного, позапланового, цільового), журнал обліку технічного обслуговування та ремонту верстатів, журнал обліку періодичних перевірок

технічного стану обладнання, а також журнал обліку несправностей та аварійних зупинок. Окремо може вестися журнал щоденного контролю працездатності засобів індивідуального захисту та стану вентиляційних систем [49].

Ведення журналів повинно здійснюватися у відповідності до встановлених форм, затверджених наказом по підприємству або відповідними галузевими інструкціями. Усі записи в журналах здійснюються ручним способом або в електронному вигляді з дотриманням правил збереження та архівування документації. Важливо, щоб усі записи мали підписи відповідальних осіб, зазначення дати, номери верстата або робочого місця, а також опис виявлених порушень або виконаних дій.

Періодичні перевірки технічного стану шліфувальних верстатів проводяться з метою підтвердження їх відповідності встановленим нормам безпеки, таким як ДСТУ, ГОСТ, технічні умови (ТУ), інструкції з експлуатації, а також правила улаштування та безпечної експлуатації обладнання підвищеної небезпеки. До обов'язкових перевірок належать: зовнішній огляд верстата, перевірка цілісності захисних кожухів, справність пускових пристроїв, герметичність вентиляційних каналів, а також перевірка шліфувального круга на відсутність дефектів.

Огляд обладнання проводиться щоденно перед початком зміни черговим майстром або оператором, а також періодично - не рідше ніж один раз на квартал - технічним персоналом або спеціалістами служби охорони праці. Щорічно здійснюється комплексне технічне обстеження верстатів із складанням акту, який зберігається разом з журналами у відповідному структурному підрозділі.

Особливу увагу під час перевірок приділяють стану електричних з'єднань, наявності заземлення, функціонуванню аварійного відключення, справності кріплень шліфувального круга, а також відповідності верстата вимогам щодо рівня шуму та пиловиділення. За результатами перевірок вносяться відповідні записи в журнали, з обов'язковим зазначенням виявлених порушень, термінів усунення, відповідальних осіб і підпису особи, яка проводила огляд [50].

У випадку виявлення критичних порушень, що становлять загрозу для життя чи здоров'я працівників, експлуатація верстата негайно припиняється, про

що також робиться відповідна відмітка в журналі. До моменту повного усунення несправностей забороняється його подальше використання.

Дотримання регламенту ведення журналів і проведення періодичних перевірок є важливою умовою безпечної організації праці на підприємстві. Це не лише підвищує технічну дисципліну серед працівників, а й дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні загрози, що сприяє зниженню ризику травматизму. Таким чином, системне ведення обліку і перевірка відповідності шліфувальних верстатів нормам безпеки є невід'ємною частиною ефективного управління охороною праці.

ВИСНОВКИ

Сучасне виробництво вимагає скорочення витрат і часу, однак шліфування залишається тривалим, дорогим і трудомістким процесом. У виробничих операціях значна частина виробничих витрат і часу припадає на шліфування. Існуючі автоматизовані методи шліфування та полірування майже не застосовуються до поверхонь вільної форми. Це змушує виконувати процес вручну.

Ручне шліфування є травмонебезпечним, трудомістким і залежить від досвіду оператора. Помилки призводять до втрат. Тому автоматизація процесу є ключем до підвищення безпеки, якості та ефективності виробництва. Враховуючи, що верстати конструктивно дуже жорсткі і підходять для завдань, які вимагають участі оператора, більшої точності або великої сили обробки, нами досліджено більш ефективну автоматизовану систему - шліфувальні верстати з ЧПК, які добре підходять для обробки поверхонь довільної форми, де потрібна висока швидкість обертання інструменту і висока об'ємна продуктивність зняття матеріалу. Реалізація автоматизації в складних процесах абразивної обробки є безцінною пропозицією і буде ефективно сприяти значному скороченню витрат в галузі.

Планування ТРІ шліфування є одним з аспектів, що становлять інтерес до шліфувальних верстатів з ЧПК - це сукупність точок в робочому просторі, які маніпулятор повинен пройти, виконуючи заданий рух. ТРІ шліфування визначається серією ліній або дуг, які називаються даними про розташування фрези, і генеруються за допомогою комерційних CAD/CAM-пакетів. Згодом генеруються виконувані виробничі коди.

У дослідженні використано описовий підхід з подальшим математичним моделюванням розробки, коли дані спостерігаються та аналізуються за допомогою симуляцій, а результати згодом виводяться на основі аналізу в вигляді моделі. ТРІ та оптимізаційні параметри аналізуються, оптимізуються за допомогою MATLAB і методу оптимізації Тагучі. Це дозволяє створити

ефективні алгоритми ТРІ, які можуть бути використані для програмування ЧПК верстатів.

Методи генерації та оптимізації ТРІ в обробці деталей мають важливе значення для підвищення ефективності виробничих процесів. Серед найбільш поширених методів виділяються ізопараметричний, ізопланарний та декартовий, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Інтеграція САПР (CAD) і САМ систем допомагає автоматизувати та оптимізувати процеси проектування та виготовлення. Евристичні методи, зокрема генетичні алгоритми, пошук за заборонами та імітаційний відпал, забезпечують ефективну оптимізацію траєкторій, сприяючи зменшенню часу обробки та підвищенню точності виготовлення деталей.

Критичний аналіз традиційних методів генерації та оптимізації ТРІ в обробці показує їхні обмеження, які можуть призвести до надмірностей або складнощів в управлінні процесом. Так, ізопланарний метод має проблеми з нерівномірним розподілом інтервалів та можливістю створення просторових кривих, що ускладнює управління. Ізопараметричний метод обмежений параметричними поверхнями, а ізофотний підхід може призвести до топологічних проблем через змінні відстані.

Алгоритми оптимізації, такі як генетичні, роєм частинок та мурашиних колоній, мають свої обмеження, зокрема у вигляді високих вимог до обчислювальних ресурсів, повільної збіжності та складностей в обробці складних поверхонь. Методи пошуку заборон та імітаційного відпалу мають свої недоліки в ефективності та швидкості досягнення оптимального рішення. Це вказує на необхідність подальшої розробки та удосконалення методів для підвищення точності та зниження часу обробки.

Розглянуто методи створення ТРІ в обробці, зокрема використання алгоритмів зворотного зміщення для досягнення оптимальної якості обробленої поверхні. Підхід до оптимізації, включаючи методи Тагучі та визначення висоти збереження гребінця, дозволяє мінімізувати похибки та забезпечити ефективність процесу обробки, зокрема в контексті знімання матеріалу. Моделювання та

згущення даних допомагають забезпечити точність та плавність ТРІ, що сприяє підвищенню якості поверхні.

Порівняння методів генерації ТРІ показало, що метод ізогребінця є найбільш ефективним у порівнянні з іншими підходами, забезпечуючи меншу довжину траєкторії, високий контроль швидкості подачі та високу ефективність обробки. Моделювання в MATLAB пропонує високу точність та гнучкість у введенні параметрів, на відміну від CAD/CAM, де параметри зазвичай визначаються заздалегідь. В оптимізації метод Тагучі демонструє високу ефективність та здатність працювати з багатьма змінними, надаючи оптимальні результати при меншій складності та часі обчислень у порівнянні з іншими методами.

На основі проведеного дослідження встановлено, що рівномірність зняття матеріалу є критичним фактором, який впливає на якість обробленої поверхні та точність її геометричних характеристик.

Аналіз показав, що найважливішим параметром для досягнення високої точності обробки є ТРІ. Зокрема, зигзагоподібна та скануюча траєкторії забезпечують найменше відношення похибки до зняття матеріалу. Оптимальним діапазоном переходу для фінішної обробки виявився інтервал 10-20% від діаметра інструмента, що дозволяє досягти балансу між точністю та часом обробки.

Результати дослідження підтвердили, що використання інструментів із більшою площею контакту, таких як пластинчасті або роторні інструменти, сприяє рівномірному зняттю матеріалу та зниженню похибок. Важливість геометрії інструмента також підтверджується спостереженнями, які демонструють перевагу використання інструментів із більшими діаметрами для забезпечення рівномірності обробки.

Встановлено, що додавання нових ТРІ, а також ротація TIF на кутах, дозволяє значно зменшити похибки при обробці складних контурів. Зменшення тиску в напрямку бічного кроку сприяло покращенню розподілу навантаження, однак ефективність цієї стратегії залежить від типу ТРІ. Вплив зміни тиску та швидкості на співвідношення похибки до зняття матеріалу виявився незначним, проте вони суттєво впливають на швидкість обробки.

Отримані результати сприяють кращому розумінню взаємозв'язку між параметрами процесу зняття матеріалу та якістю поверхні, що може бути використано для оптимізації методів фінішної обробки в автоматизованих системах.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Новіков Ф.В. Теоретико-імовірнісний підхід у теорії шліфування : монографія / Ф.В. Новіков, Г.В. Новіков. Дніпро : ЛІРА. 2023. 484 с.
2. Новіков Ф.В. Інноваційні рішення та технології металообробного виробництва : монографія / Ф.В. Новіков, В.О. Жовтобрюх, Д. Ф. Новіков. Дніпро: ЛІРА. 2023. 342 с.
3. Ning D., Shuna J., Jingsong D., Chao L., Shanfu C. Design of New Slotted Structured Grinding Wheel. *Journal of Physics: Conference Series., The 2020 6th International Forum on Engineering Materials and Manufacturing Technology (IFEMMT)* 2020. Vol. 1635. Pp. 17-19. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1635/1/012013>
4. Rodriguez R.L., Lopes J.C., Garcia M.V. et al. Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using CBN wheel. *Int J Adv Manuf Technol.* 2020. Vol. 107. Pp. 1265-1275.
5. Saad K.S. Enhancement of surface roughness and metal removal rate by using combined abrasives during magnetic abrasive finishing. *Engineering & Technology. International Journal of Research.* 2019. Vol. 7. Iss. 8. Pp. 1-8.
6. Zheng K., Liao W., Sun L., Meng H. Investigation on grinding temperature in ultrasonic vibration-assisted grinding of zirconia ceramics. *Machining Science and Technology An International Journal.* 2019. Vol. 23. Iss. 4. Pp. 612-628. DOI: <https://doi.org/10.1080/10910344.2019.1575405>
7. Виговський Г.М., Громовий О.А., Плисак М.М. Аналіз впливу схем розташування формоутворюючих різальних елементів на процеси деформації торцевих ступінчастих фрез. *Технічна інженерія.* 2023. № 1(91). С. 42-49. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-42-49](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-42-49)
8. Громовий О.А., Виговський Г.М., Балицька Н.О. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням. *Технічна інженерія.* 2020. № 2(86). С. 48-53.

9. Vyhovskyi H., Plysak M., Balytska N. Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling. *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham : Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_21.

10. Новіков Ф. В. Теоретичні основи фінішної механічної обробки : монографія / Ф. В. Новіков. – Дніпро: ЛІРА. 2023. 340 с.

11. Vyhovskyi H., Plysak M., Balytska N. Engineering Methodology for Determining Elastic Displacements of the Joint «Spindle Assembly-Face Milling Cutter» While Machining Planes. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham : Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_26

12. Melnyk O., Hlembotska L., Balytska N. The Imitation Study of Taper Connections Stiffness of Face Milling Cutter Shank Using Machine Spindle in the SolidWorks Simulation Environment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham : Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_60.

13. Виговський Г.М, Плисак М.М. Дослідження напружено-деформованого стану торцевої фрези для чистової обробки площин. *Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки*. 2019. № 1(83). Рр. 53-58. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-53-58](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-53-58).

14. Дерібо О.В., Лозінський Д.О., Сердюк О.В. Технології для верстатів з числовим програмним керуванням: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. Вінниця : ВНТУ. 2023. 116 с.

15. Лозінський Д.О., Петров О.В., Мироненко О.М. Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з дисципліни «САП верстатів з ЧПК». Вінниця : ВНТУ, 2018. 42 с.

16. Randy H. Learning SOLIDWORKS 2022 Modeling, Assembly and Analysis. Shih: SDC Publications. 2022. 542 p. URL: <https://www.solidcam.com/subscription/documentation>

17. Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи

програмування верстатів з числовим програмним керуванням : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин» / КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського. 2020. 158с.

18. Пилипець М.І., Комар Р.В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин. Тернопіль. 2019. 58 с.

19. Біланенко В.Г., Приходько В.П., Мельник О.О. Проектування технологічних процесів. Частина1. Оброблення деталей-тіл обертання. : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології машинобудування» та «Технології виготовлення літальних апаратів». НТУУ «КПП ім. Ігоря Сікорського». 2019. 232 с.

20. Hintze W., Klingelhöller C. Analysis and Modeling of Heat Flux into the Tool in Abrasive Circular Cutting of Unidirectional CFRP. *Procedia CIRP*. 2021. V. 66. Pp. 210-214.

21. How to choose a step over CNC Milling Feeds and Speeds cookbook. URL: <http://www.cnccookbook.com/CCNCNMillFeedsSpeedsStepover.html>

22. Lambropoulos J.C., Jacobs S.D., Ruckman J. Material removal mechanisms from grinding to polishing. *Ceram Trans*. 2020. № 102. Pp. 113-128.

23. Новіков Ф.В. Теоретичні основи фінішної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА. 2023. 340 с.

24. Типи верстатів з ЧПУ. URL: <https://get-it-made.co.uk/guides/cnc-machining-guide/>

25. Sung Gun Lee, Hyun Chul Kim, Min Yang Yang. Mesh based tool path generation for constant scallop height machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 37. Pp.15-22.

26. Shokrollahi N., Shojaei E. Experimental comparison of iso scallop, iso planar and iso parametric algorithms in machining sculptured surfaces. *Indian J.Sci.Res*. 2024. Vol. 1(2). Pp.475-481.

27. Lin R.S., Koren Y. Efficient tool-path planning free-form surfaces. *ASME Journal of Engineering for Industry*. Vol. 118. Pp.20-28.

28. Bobrow J.E. NC machine tool path generation from CSG part representations. *Computer-Aided Design*. Vol. 17(2). Pp.69-76.
29. Lee E. Contour offset approach to helical path generation with constant scallop height. *Journal of Computer-Aided Design, Elsevier*. 2023. Vol. 35. Pp.511-518.
30. Neff R.T., Farouki C.A. Analytic properties of plane offset curves. *Computer Aided Geometric Design*. 2019. Vol. 7. Pp. 83-99.
31. Schmitt L.M.. Theory of genetic algorithms II: Models for genetic operators over the string-tensor representation of populations and convergence to global optima for arbitrary fitness function under scaling. *TCS: Theoretical Computer Science*. 2024. №11.Pp. 310-318.
32. Glover F. Tabu search – part 1. *ORSA Journal on Computing*. 2018. Vol. 1. Pp.190-206.
33. Eglese R.W. Simulated annealing: A tool for operational research. *European Journal of Operations Research*. 2019. Vol. 46. Pp.271-281.
34. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge. 2020. 359 p.
35. Martinez A.C., Castillo O., Montiel O. Comparison between Ant Colony and Genetic Algorithms for Fuzzy System Optimization. *Soft Computing for Hybrid Intelligent Systems*. 2018. № 2. Pp. 71-86.
36. Kennedy J., Eberhart R. Empirical study of particle swarm optimization. *Proceedings. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia*. 2020. Vol. 4. Pp.1942-1948.
37. SimEvents. Model and simulate message communication and discrete-event systems. URL: <https://www.mathworks.com/products/simevents.html>
38. . Rauch M, Duc E., Hascoet J-Y. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modeling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2020. Vol. 49. Pp.375-383.
39. Duc C. Tournier E. Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 25. Pp. 867-875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-003-2054-7>.

40. Li J., Hongsheng Z., Yunjiang L. Tool path optimization in post-processor of five axis machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 68. Pp.2683-2691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013 4872-6>.
41. Mahapatra S.S., Chaturvedi V., Modelling and analysis of abrasive wear performance of composites using Taguchi approach. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2019. Vol. 1(1). Pp. 123-135.
42. Kim D.W., Kim S.W. Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes. *Opt. Express*. 2018. Vol. 13(3). Pp. 910-917.
43. Huang Y., Oliver J.H. Non consistent parameter NC tool path generation on Sculptured surfaces. *ASME Computer in Engineering*. 2017. Vol.1. Pp.411-419.
44. Yau H.T., Chuang C.M., Lee Y.C. Numerical control machining of triangulated sculptured surfaces in a stereo lithography format with a generalized cutter. *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 42 (13). Pp. 2573-2598.
45. Закон України «Про охорону праці». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст. 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>
46. ДСТУ 2293-93 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61781
47. НПАОП 28.01.30-12 «Правила охорони праці під час роботи з абразивним інструментом». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50029
48. Наказ «Про затвердження Правил охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями» від 19.12.2013 № 966. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14#Text>
49. Журнали з охорони праці (видавництво “ІНДУСТРІЯ”) – приклади форм обліку інструкцій і порушень. URL: https://industry.kh.ua/g18871727-zhurnali-ohoroni-pratsi?utm_source=chatgpt.com
50. Як ведеться журнал реєстрації інструктажів з охорони праці. URL: https://oppb.com.ua/articles/yak-vedetsya-zhurnal-reyestratsiyi-instrukтажiv-z-ohorony-pratsi?utm_source=chatgpt.com

ДОДАТКИ

Додаток А

Алгоритми генерації ТРІ

1) Алгоритм генерації зигзагоподібної ТРІ

```
%
% Симуляція зняття матеріалу на основі функції інструмента
%
% Розмір робочої поверхні
size_x = 200;
size_y = 200;

% Створення робочої поверхні
track_overlap = zeros(size_x,size_y);

% Зчитування TIF
TIF = importdata('TIF_rotary_tool.txt');

% Розмір інструмента
s = size(TIF);

fact=1;
c=1;

% Крок переміщення інструмента
track_distance = 25;

while fact<size_x

% Рух зліва направо
c=fact;d=1;f=1;
for i=1:(size_y-s(2))

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end
end
end
```

```

        else
            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
            d=d+1;
        end
    end
end

    end
    if i == 1
        d=1;
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
d=i+1;
f=d;
c=fact;
end

% Рух вниз з правого краю
c=fact;d=size_y-s(2);
for i=1:track_distance

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
    d=size_y-s(2);
    c=c+1;
end
c=i+fact;
%f=c;
d=size_y-s(2);
end

fact=fact+track_distance;

% Рух справа наліво
c=fact;d=size_y-s(2);f=1;
for i=1:(size_y-s(2))

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)

```

```

    if size_x > size_y
        if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    else
        if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    if i == 1
        d=size_y-s(2);
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
d=size_y-s(2)-i;
f=d;
c=fact;
end

% Рух вниз з лівого краю
c=fact;d=1;
for i=1:track_distance

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    d=1;
    c=c+1;
end
c=i+fact;
%f=c;
d=1;
end

fact=fact+track_distance;

end
% Відобразити результат
figure
surf(track_overlap)

```

2) Алгоритм генерації ТРІ по лінії сканування

```
%
% Симуляція зняття матеріалу на основі функції інструмента
%
% Розмір робочої поверхні
size_x = 200;
size_y = 200;

% Створення робочої поверхні
track_overlap = zeros(size_x,size_y);

% Зчитування TIF
TIF = importdata('TIF_rotary_tool.txt');

% Розмір інструмента
s = size(TIF);

% Тип операції обробки
choice='full length';
% Початкова точка
startcut=1;
% Довжина вздовж осі y
endpoint=size_y;
% Кінцева точка
endcut=size_x;

fact=startcut;
c=1;
if strcmp(choice,'full length')==1
    endpoint=size_y;
end

% Крок переміщення
track_distance=50;

while fact<endcut

% Рух зліва направо по лінії сканування
c=fact;d=startcut;f=startcut;
for i=1:(endpoint-startcut)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<endcut+1 && d<endcut+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<endcut+1 && d<endpoint+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end
end
```

```

        else
            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
            d=d+1;
        end
    end
end
end
if i == 1
    d=startcut;
else
    d = f;
end
c=c+1;
end
d=i+startcut;
f=d;
c=fact;
end

fact=fact+track_distance;

end

% Відобразити результат
figure
surf(track_overlap)

```

3) Алгоритм генерації ТРІ зі зміщенням контуру

```
%
% Симуляція зняття матеріалу на основі функції інструмента
%
% Розмір робочої поверхні
size_x = 200;
size_y = 200;

% Зчитування TIF
TIF = importdata('TIF_rotary_tool.txt');

% Розмір інструмента
s = size(TIF);

% Створення робочої поверхні
track_overlap = zeros(size_x,size_y);

fact=1;
lap=1;

% Крок переміщення
track_distance=25;

while fact<=size_x/2

% Рух зліва направо
c=fact;d=fact;f=fact;
for i=lap:(size_y-s(2)+1-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end
    if i == 1
        d=fact;
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
```

```

end
d=i+1;
f=d;
c=fact;
end

% Рух вверху з правого краю
c=fact;d=size_y-s(2)-fact;
for i=lap:(size_x-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
    d=size_y-s(2)-fact;
    c=c+1;
end
c=i+1;
%f=c;
d=size_y-s(2)-fact;
end

```

```

% Рух справа наліво
c=size_x-s(2)+2-fact;d=size_y-s(2)+1-fact;f=fact;
for i=lap:(size_y-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) =track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) =track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
end
if i == 1
    d=size_y-s(2)+1-fact;
else
    d = f;
end
c=c+1;
end
d=size_y-s(2)-i;
f=d;
c=size_x-s(2)+2-fact;
end

% Рух вниз з лівого краю
c=size_x-s(2)+2-fact;d=fact;
for i=lap:(size_x-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0 && c>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    d=fact;
    c=c-1;
end
c=size_x-i;
%f=c;
d=fact;
end

fact=fact+track_distance;
lap=lap+track_distance-1;

end

% Відобразити результат
figure
surf(track_overlap)

```

4) Алгоритм генерації спіральної ТРІ з постійним перекриттям

```
%
% Симуляція зняття матеріалу на основі функції інструмента
%
% Розмір робочої поверхні
size_x = 200;
size_y = 200;

% Зчитування TIF
TIF = importdata('TIF_rotary_tool.txt');

% Розмір інструмента
s = size(TIF);

% Створення робочої поверхні
track_overlap = zeros(size_x,size_y);

fact=1;
lap=1;
t=0;
u=0;

% Крок переміщення
track_distance=25;

while fact<=size_x/2

if fact==1

% Рух зліва направо
c=fact;d=fact;f=fact;
for i=lap:(size_y-s(2)+1-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end
if i == 1
    d=fact;
else
    d = f;
end
```

```

        c=c+1;
    end
    d=i+1;
    f=d;
    c=fact;
    end
    else
        % Рух зліва направо
        if fact>=track_distance
            u=lap+track_distance;
        else
            u=lap;
        end
        c=fact;d=fact-track_distance;f=fact-track_distance;
        for i=(lap-track_distance+1):(size_y-s(2)+1-u+track_distance-1)

        for a=1:s(1)
            for b=1:s(2)
                if size_x > size_y
                    if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                        if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                            d=d+1;
                        else
                            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                            d=d+1;
                        end
                    end
                else
                    if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                        if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                            d=d+1;
                        else
                            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                            d=d+1;
                        end
                    end
                end
            end
            if i == 1
                d=fact-track_distance;
            else
                d = f;
            end
            c=c+1;
        end
        d=i+1;
        f=d;
        c=fact;
    end

    end

    % Рух вверх з правого краю
    c=fact;d=size_y-s(2)-fact;
    for i=lap:(size_x-s(2)+1-lap)

    for a=1:s(1)
        for b=1:s(2)
            if size_x > size_y
                if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                    if TIF(a,b) == 0

```

```

        d=d+1;
    else
        track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
        d=d+1;
    end
end
else
    if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
        if TIF(a,b) == 0
            d=d+1;
        else
            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
            d=d+1;
        end
    end
end
end
d=size_y-s(2)+1-fact;
c=c+1;
end
c=i+1;
%f=c;
d=size_x-s(2)+1-fact;
end

% Рух справа наліво
c=size_x-s(2)+2-fact;d=size_y-s(2)+1-fact;f=fact;
for i=lap:(size_y-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end
if i == 1
    d=size_y-s(2)+1-fact;
else
    d = f;
end
c=c+1;
end
d=size_y-s(2)-i;
f=d;
c=size_x-s(2)+2-fact;
end
if fact>=50
    t=fact-track_distance;
    u=lap+track_distance;
else

```

```

    t=fact;
    u=lap+track_distance;
end

% Рух вниз з лівого краю
c=size_x-s(2)+1-t;d=fact;
for i=lap:size_x-s(2)+1-u

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0 && c>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    d=fact;
    c=c-1;
end
c=size_x-i;
%f=c;
d=fact;
end

fact=fact+track_distance;
lap=lap+track_distance-1;

end

% Відобразити результат
figure
surf(track_overlap)

```

5) Алгоритм генерації паралельної спіральної ТРІ

```
%
% Симуляція зняття матеріалу на основі функції інструмента
%
% Розмір робочої поверхні
size_x = 200;
size_y = 200;

% Зчитування TIF
TIF = importdata('TIF_rotary_tool.txt');

% Розмір інструмента
s = size(TIF);

% Створення робочої поверхні
track_overlap = zeros(size_x,size_y);

fact=1;
lap=1;

% Крок переміщення
track_distance=40;

while fact<=size_x/2

% Рух зліва направо
c=fact;d=1;f=1;
for i=1:(size_y-s(2)+1-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
    if i == 1
        d=1;
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
d=i+1;
```

```

f=d;
c=fact;
end

% Рух вверху з правого краю
c=fact;d=size_y-s(2)-fact;
for i=lap:(size_x-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
        d=size_y-s(2)-fact;
        c=c+1;
    end
    c=i+1;
    %f=c;
    d=size_y-s(2)-fact;
end

% Рух справа наліво
c=size_x-s(2)+2-fact;d=size_y-s(2)+1-fact;f=1;
for i=1:(size_y-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
        d=size_y-s(2)+1-fact;
        c=c+1;
    end
    c=i+1;
    %f=c;
    d=size_y-s(2)+1-fact;
end
if i == 1

```

```

        d=size_y-s(2)+1-fact;
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
d=size_y-s(2)-fact-i;
f=d;
c=size_x-s(2)+2-fact;
end

% Рух вниз з лівого краю
c=size_x-s(2)+2-fact;d=1;
for i=1:track_distance

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0 && c>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    d=1;
    c=c-1;
end
c=size_x-fact-i;
%f=c;
d=fact;
end

fact=fact+track_distance; lap=lap+track_distance-1;

% Рух зліва направо
c=size_x-s(2)-fact;d=1;f=1;
for i=1:(size_y-s(2)+1-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
    if i == 1
        d=1;
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
d=i+1;
f=d;

```

```

c=size_x-s(2)-fact;
end

c=size_x-s(2)+1-fact;d=size_y-s(2)-fact;
for i=lap:(size_x-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0 && c>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
        d=size_y-s(2)-fact;
        c=c-1;
    end
    c=size_x-i;
    %f=c;
    d=size_y-s(2)-fact;
end

c=fact;d=size_y-s(2)+1-fact;f=1;
for i=1:(size_y-s(2)-lap)

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
        d=size_y-s(2)+1-fact;
        if i == 1
            d=size_y-s(2)+1-fact;
        else
            d = f;
        end
        c=c+1;
    end
    d=size_y-s(2)-fact-i;
    f=d;
    c=fact;
end

c=fact;d=1;

```

```

for i=1:track_distance

for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
            if TIF(a,b) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    d=1;
    c=c+1;
end
c=i+fact;
%f=c;
d=1;
end

fact=fact+track_distance;
lap=lap+track_distance-1;

end

% Відобразити результат
figure
surf(track_overlap)

```

Додаток Б

Алгоритм розрахунку за коефіцієнтом «Похибка/сумарне зняття» (E/R)

```

function val=peakvalue(v,delta,startpoint1,endpoint1,startpoint2,endpoint2)

l=size(v);

if nargin < 3
    startpoint1=10;
    endpoint1=l(1)-10;
    startpoint2=10;
    endpoint2=l(2)-10;
end

pks=v(:);

% Стандартні значення максимуму та мінімуму
mx=-Inf;
mn=Inf;

% Знаходження найбільшого значення
for j=startpoint1:endpoint1
    for k=startpoint2:endpoint2
        this=v(j,k);
        if this > mx && this~=0
            mx=this;
        end
        if this < mn && this~=0
            mn=this;
        end
        if this > (mn+delta)
            mx=this;
        end
        if this < (mx-delta)
            mn=this;
        end
    end
end

% Сумарне зняття
total=min(pks);
% Похибка
range=total-mx;
% Коефіцієнт «Похибка/сумарне зняття»
val=range/total;

```

Додаток В

Вплив кроку переходу

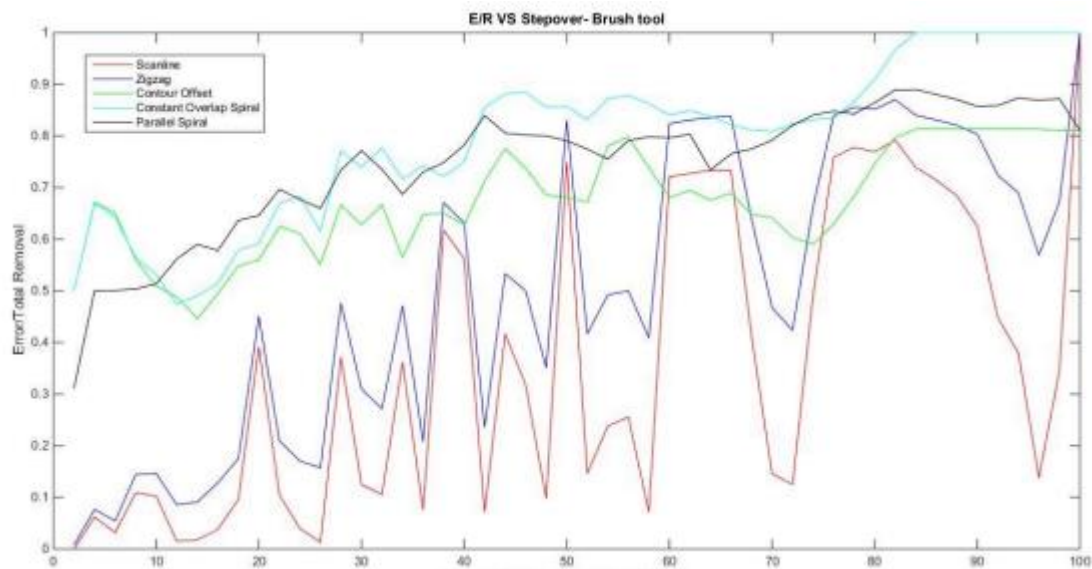


Рисунок 1 - Залежність E/R від кроку переходу для інструмента «Щітка»

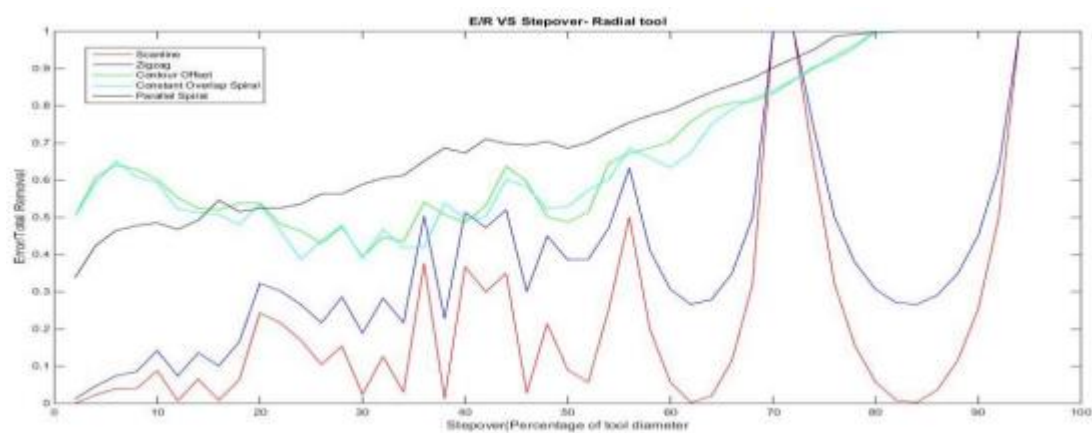


Рисунок 2 - Залежність E/R від кроку переходу для радіального інструмента

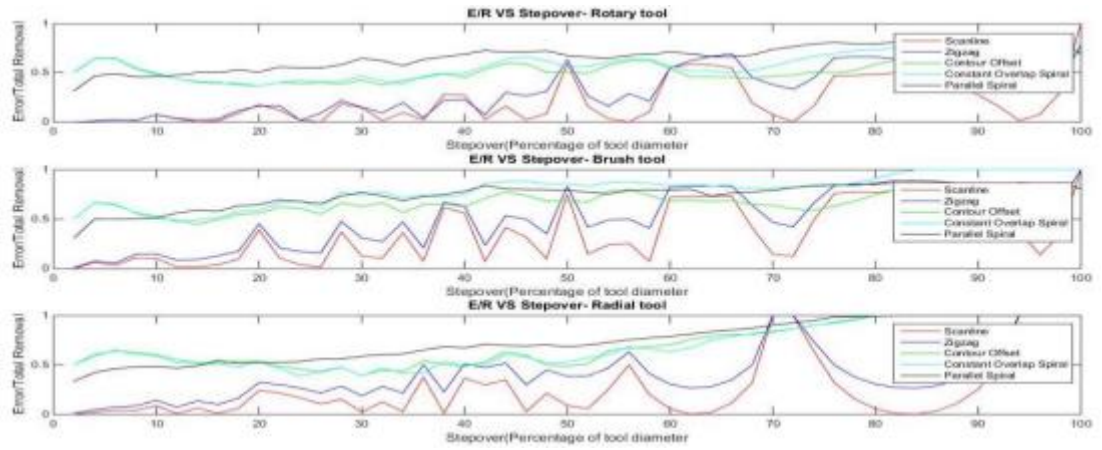


Рисунок 3 - Залежність E/R від кроку переходу для всіх типів інструментів

Додаток Г

Вплив типу інструмента

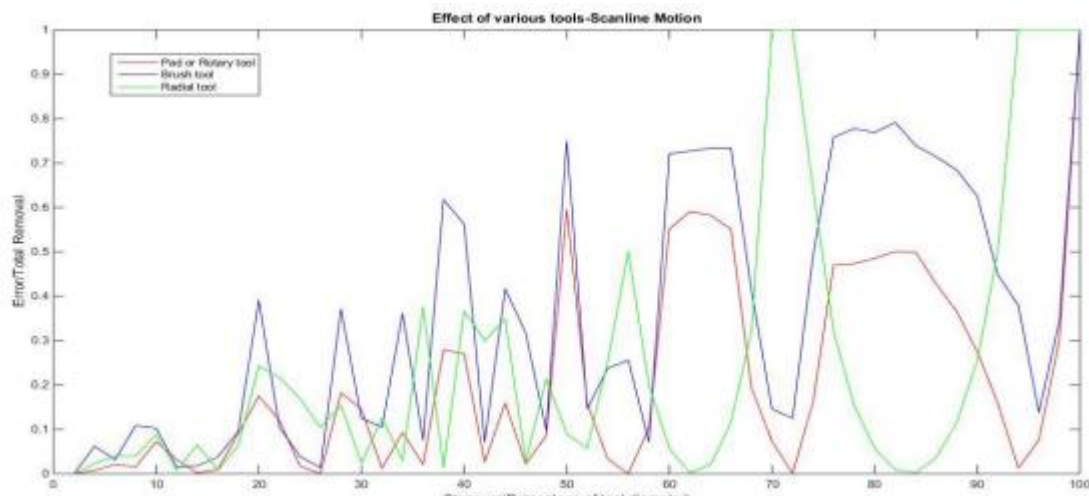


Рисунок 1 - Вплив усіх типів інструментів (рух по лінії сканування)

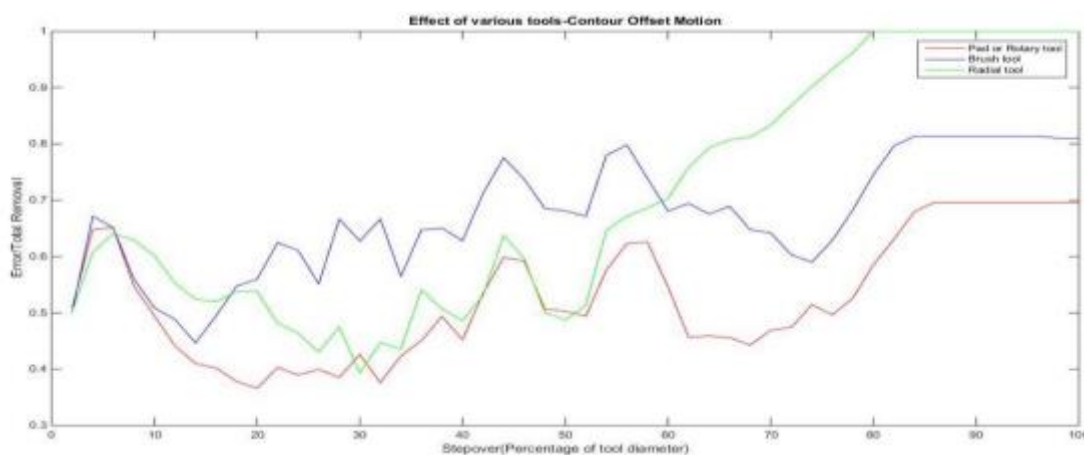


Рисунок 2 - Вплив усіх типів інструментів (рух зі зміщенням контуру)

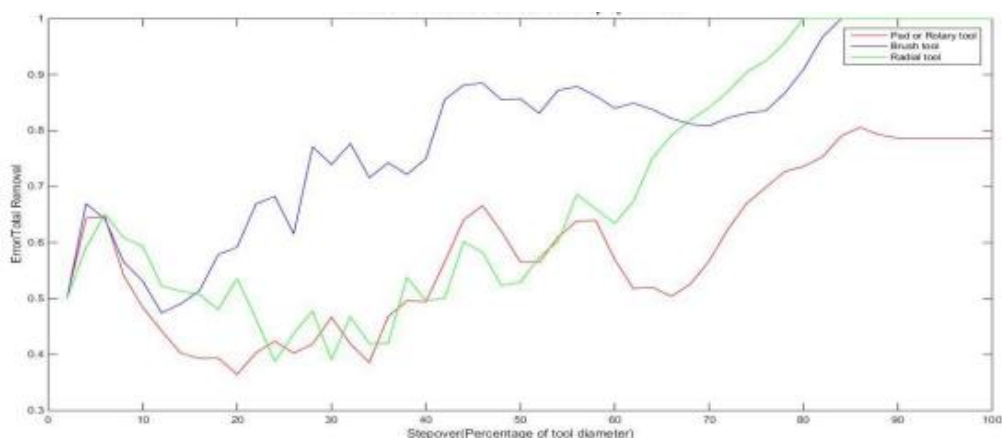


Рисунок 3 - Вплив усіх типів інструментів (постійний рух по спіралі з перекриттям)

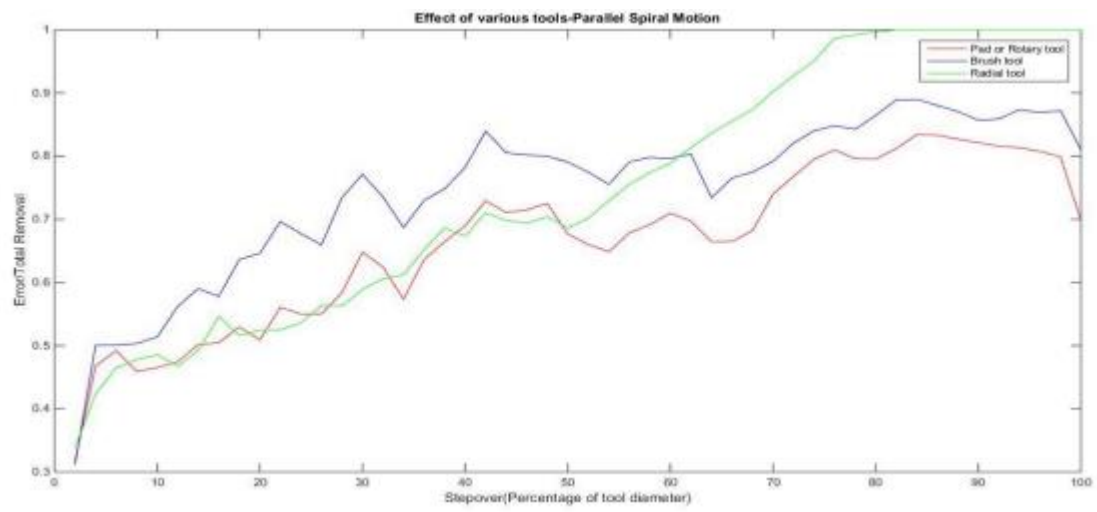


Рисунок 4 - Вплив усіх типів інструментів (паралельна спіральна ТРІ)

Додаток Д

Вплив діаметра інструмента

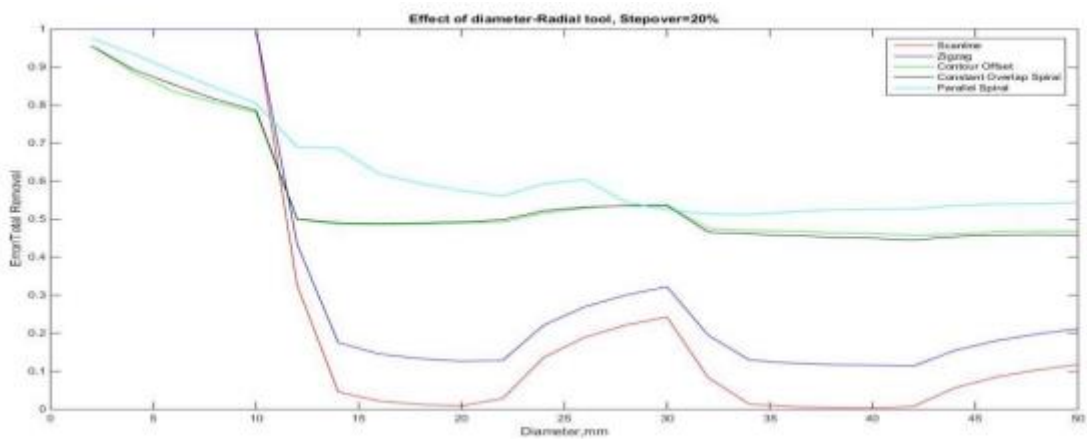


Рисунок 1 - Вплив діаметра радіального інструмента

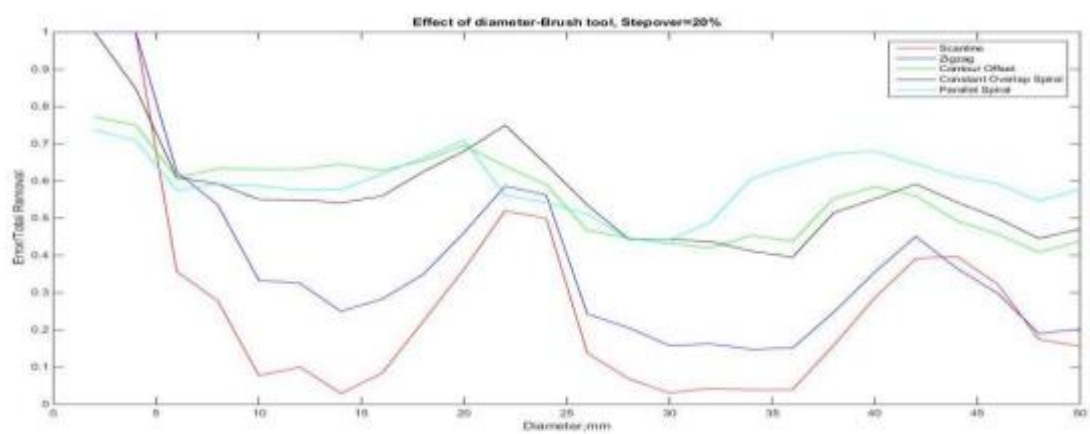


Рисунок 2 - Вплив діаметра інструмента щітки

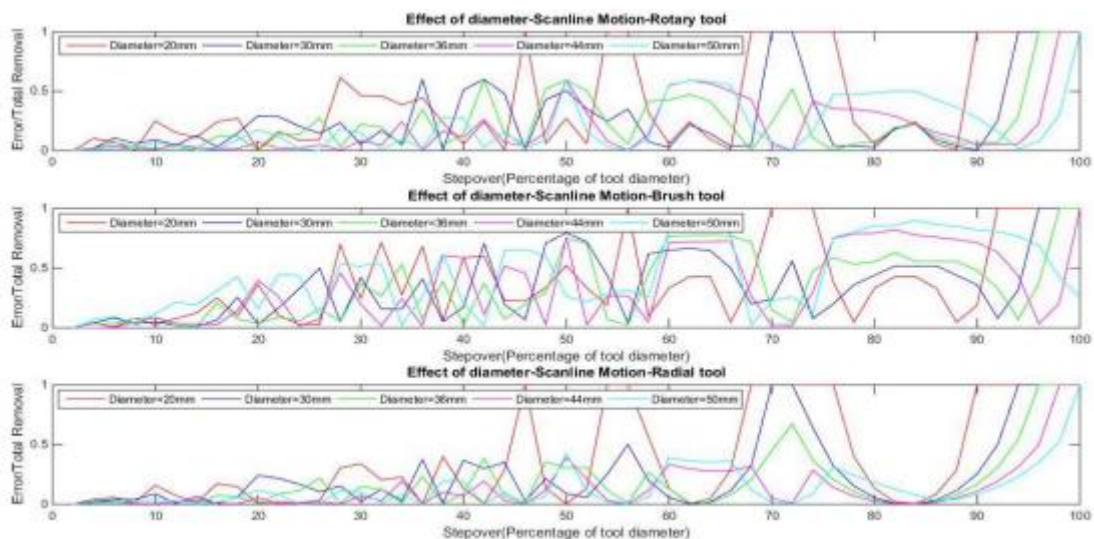


Рисунок 3 - Вплив діаметра для всіх типів інструментів (рух по лінії сканування)

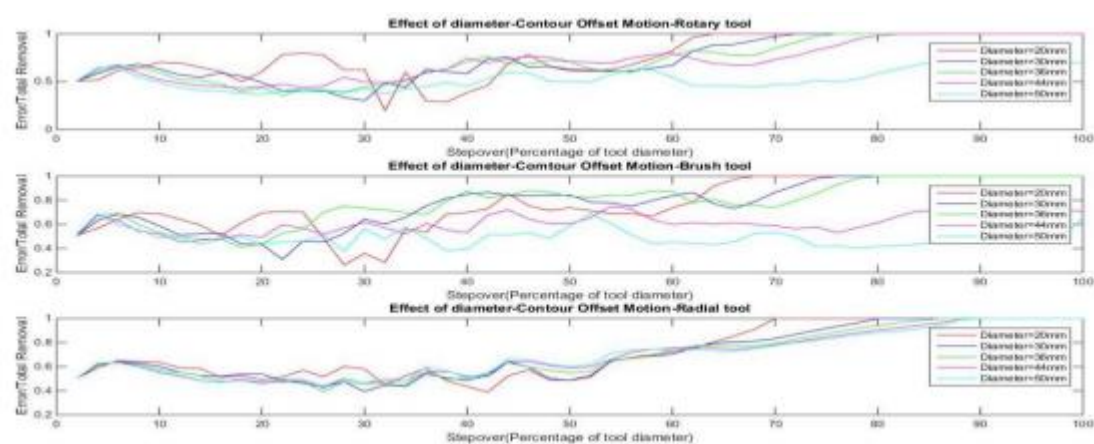


Рисунок 4 - Вплив діаметра для всіх типів інструментів (рух зі зміщенням контуру)

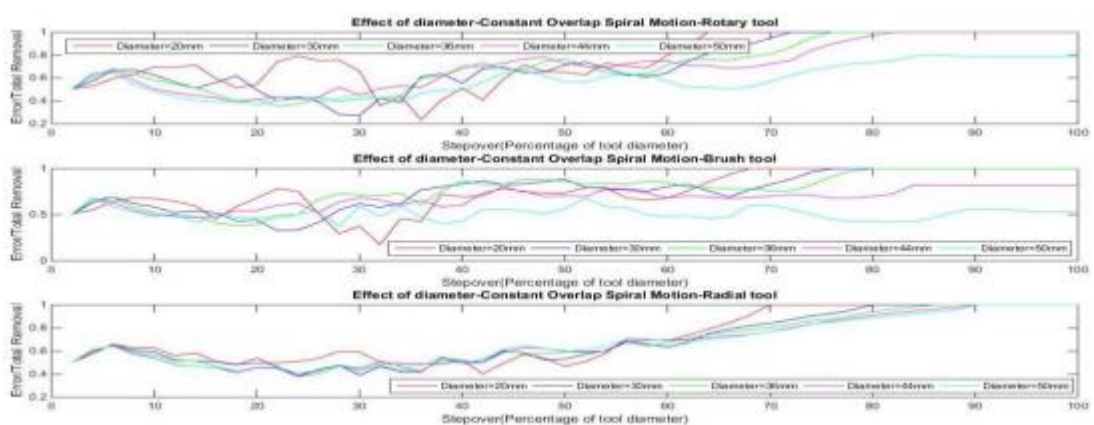


Рисунок 5 - Вплив діаметра для всіх типів інструментів (постійний рух по спіралі з перекриттям)

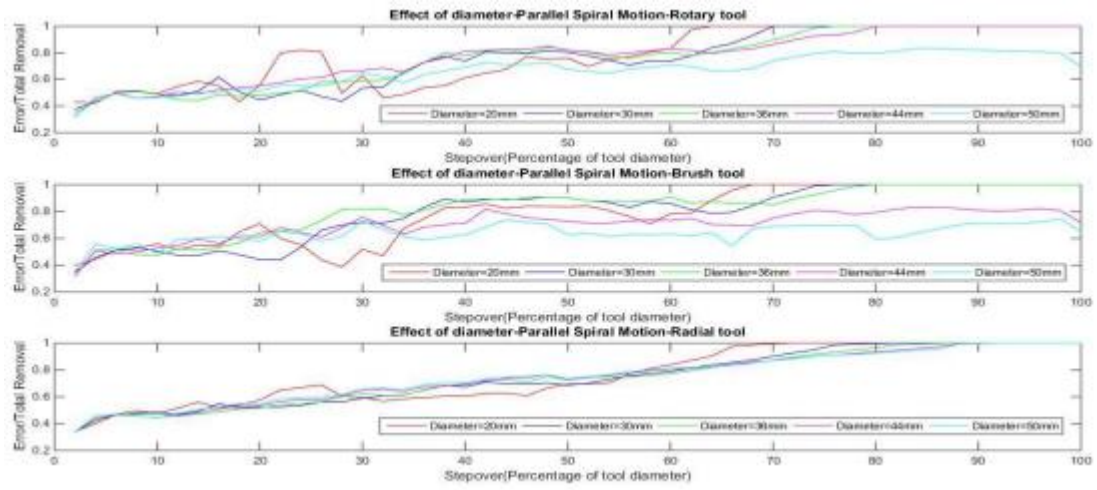


Рисунок 6 - Вплив діаметра для всіх типів інструментів (паралельна спіральна ТПІ)

Додаток Е

Алгоритм повороту TIF зі зміщенням контуру

```

%
% Симуляція зняття матеріалу на основі функції інструмента
%
% Розмір робочої поверхні
size_x = 200;
size_y = 200;

% Зчитування TIF
TIF = importdata('TIF_rotary_tool.txt');

% Розмір інструмента
s = size(TIF);

% Створення робочої поверхні
track_overlap = zeros(size_x,size_y);

fact=1;
lap=1;

% Крок переміщення
track_distance=50;

while fact<=size_x/2

% Рух зліва направо
% Звичайне положення інструмента
c=fact;d=fact;f=fact;
for i=lap:(size_y-s(2)+1-lap)

% Звичайне положення TIF
for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(a,b)&& track_overlap(c,d) == 0
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
end
    if i == 1

```

```

        d=fact;
    else
        d = f;
    end
    c=c+1;
end
d=i+1;
f=d;
c=fact;
end

% Рух вгору з правого кінця
% Інструмент повернуто
c=fact;d=size_y-s(1)-fact;
for i=lap:(size_x-s(2)-lap)

% TIF повернуто
for a=1:s(2)
    for b=1:s(1)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(b,a) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(b,a);
                    d=d+1;
                end
            end
        else
            if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
                if TIF(b,a) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(b,a);
                    d=d+1;
                end
            end
        end
    end
    d=size_y-s(1)-fact;
    c=c+1;
end
c=i+1;
%f=c;
d=size_y-s(1)-fact;
end

% Рух справа наліво
% Інструмент повернуто
c=size_x-s(2)+2-fact;d=size_y-s(2)+1-fact;f=fact;
for i=lap:(size_y-s(2)-lap)

% TIF повернуто назад до початкового положення
for a=1:s(1)
    for b=1:s(2)
        if size_x > size_y
            if c<size_x+1 && d<size_x+1 && d>0
                if TIF(a,b) == 0
                    d=d+1;
                else
                    track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);

```

```

        d=d+1;
    end
end
else
    if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0
        if TIF(a,b) == 0
            d=d+1;
        else
            track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(a,b);
            d=d+1;
        end
    end
end
end
if i == 1
    d=size_y-s(2)+1-fact;
else
    d = f;
end
c=c+1;
end
d=size_y-s(2)-i;
f=d;
c=size_x-s(2)+2-fact;
end

% Рух вниз з лівого кінця
% Інструмент повернуто
c=size_x-s(1)+2-fact;d=fact;
for i=lap:(size_x-s(2)-lap)

% Поворот TIF
for a=1:s(2)
    for b=1:s(1)
        if c<size_x+1 && d<size_y+1 && d>0 && c>0
            if TIF(b,a) == 0
                d=d+1;
            else
                track_overlap(c,d) = track_overlap(c,d)+TIF(b,a);
                d=d+1;
            end
        end
    end
    d=fact;
    c=c-1;
end
c=size_x-i;
%f=c;
d=fact;
end

fact=fact+track_distance;
lap=lap+track_distance-1;

end

% Відобразити результат
figure
surf(track_overlap)

```

Додаток Ж

Вплив повороту TIF на TPI

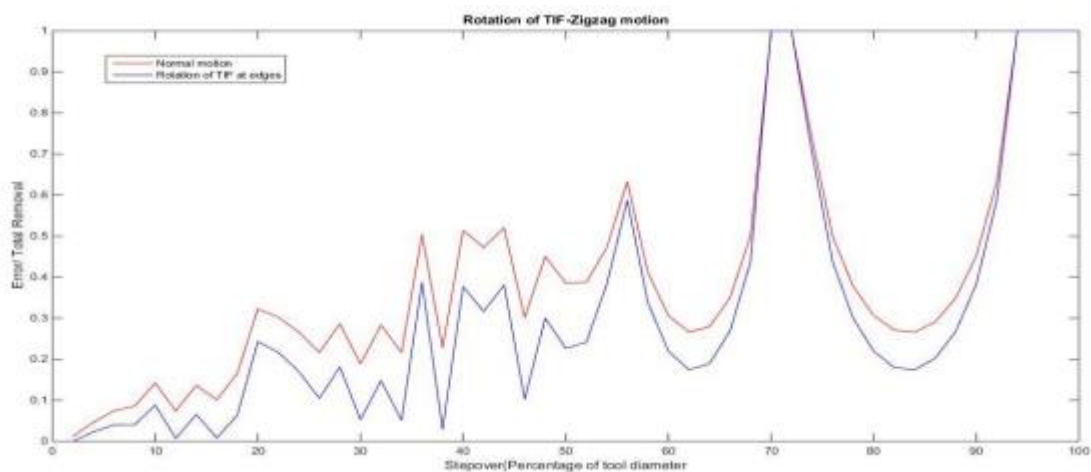


Рисунок 1 - Поворот TIF (зигзагоподібний рух)

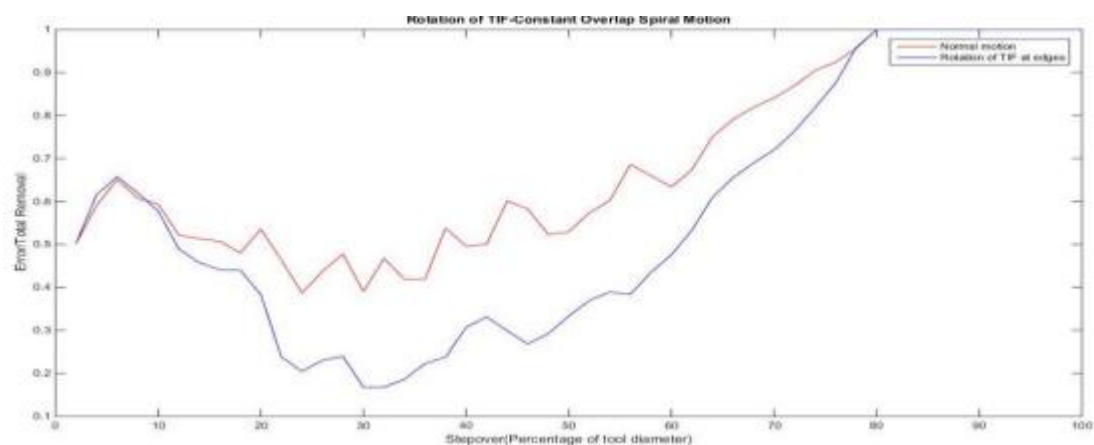


Рисунок 2 - Поворот TIF (постійний рух по спіралі з перекриттям)

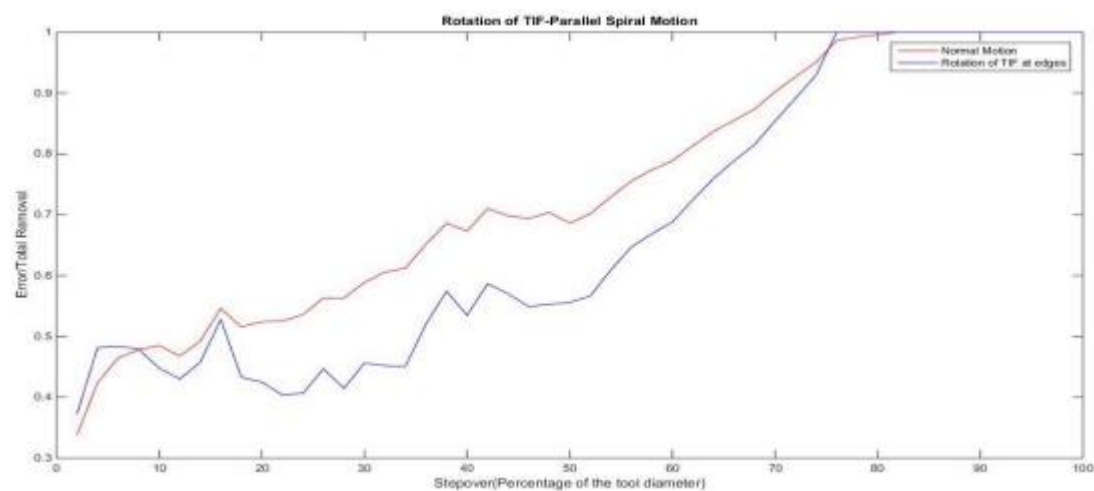


Рисунок 3 - Поворот TIF (паралельна спіральна TPI)

Додаток К

Вплив комбінації ТРІ з кількома іншими ТРІ

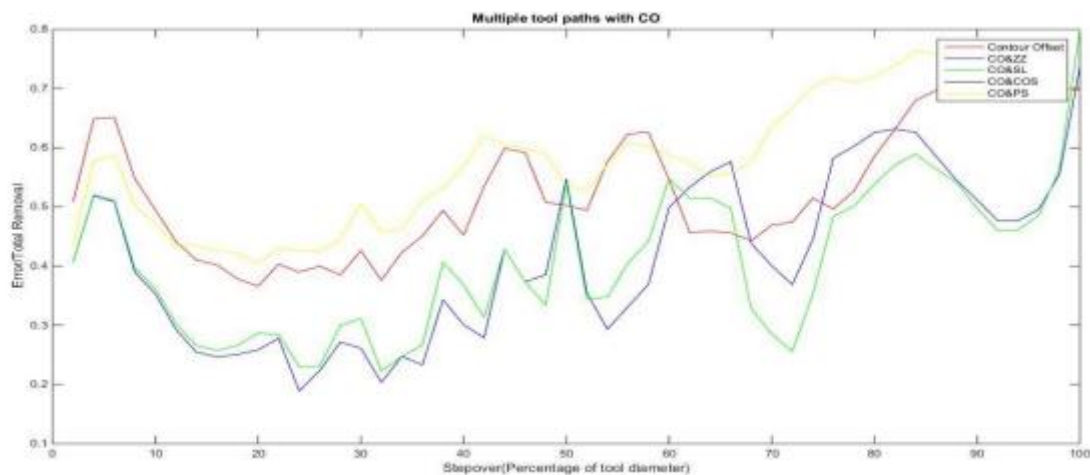


Рисунок 1 - Кілька ТРІ зі зміщенням контуру (ротаційний інструмент)

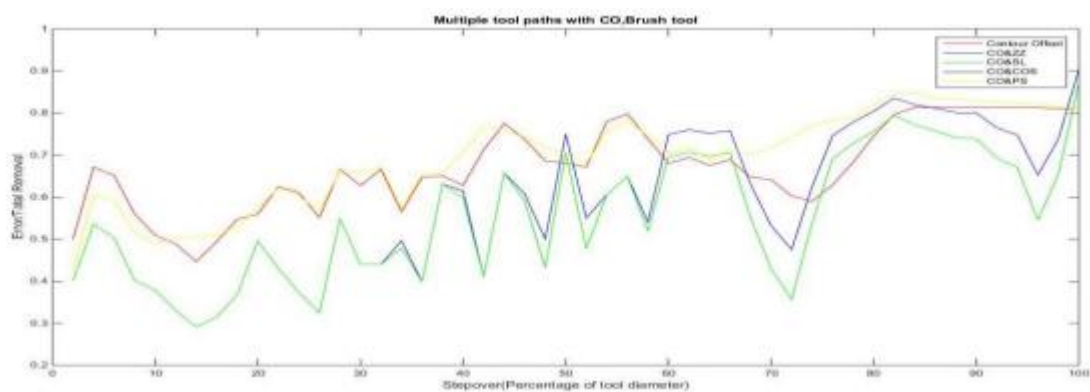


Рисунок 2 - Кілька ТРІ зі зміщенням контуру (інструмент щітка)

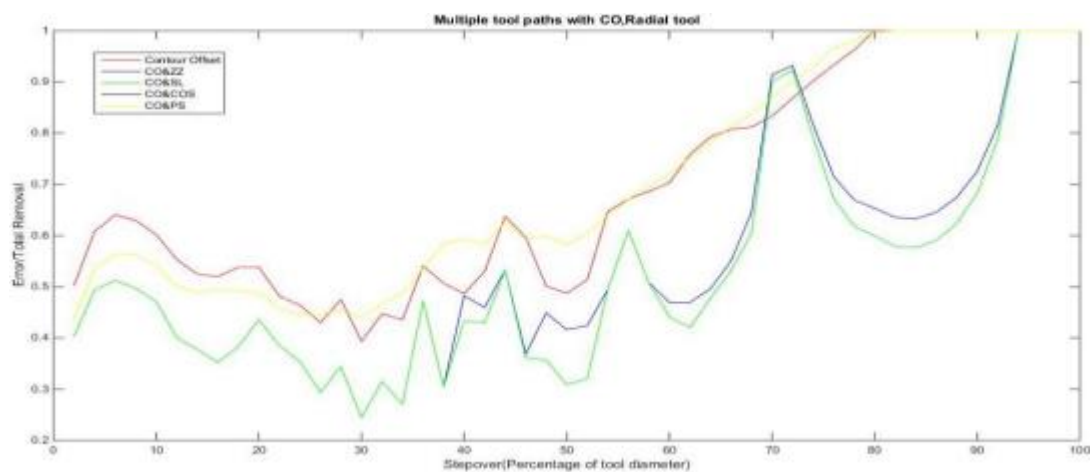


Рисунок 3 - Кілька ТРІ зі зміщенням контуру (радіальний інструмент)

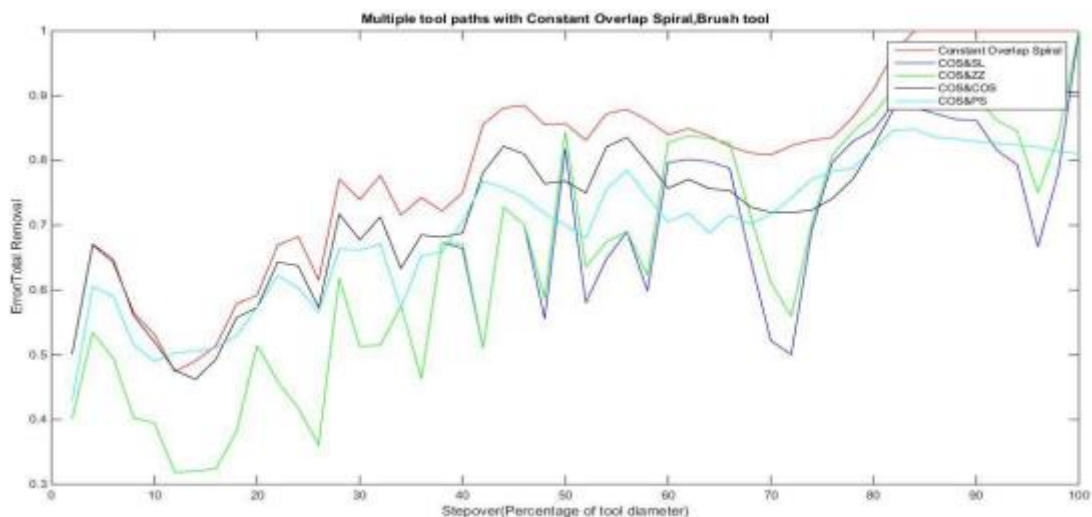


Рисунок 4 - Множинні ТРІ + постійний рух по спіралі з перекриттям (інструмент щітка)

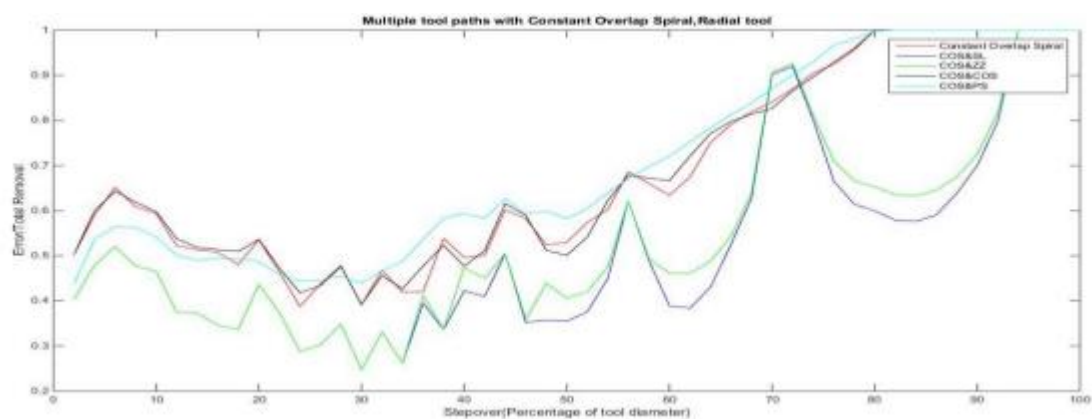


Рисунок 5 - Множинні ТРІ + постійний рух по спіралі з перекриттям (радіальний інструмент)

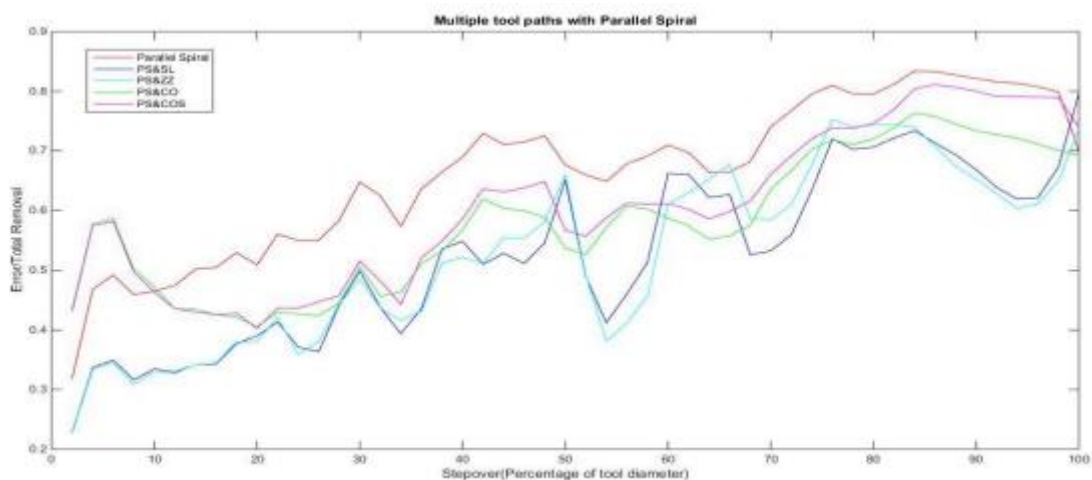


Рисунок 6 - Множинні ТРІ + паралельний спіральний рух (ротаційний інструмент)

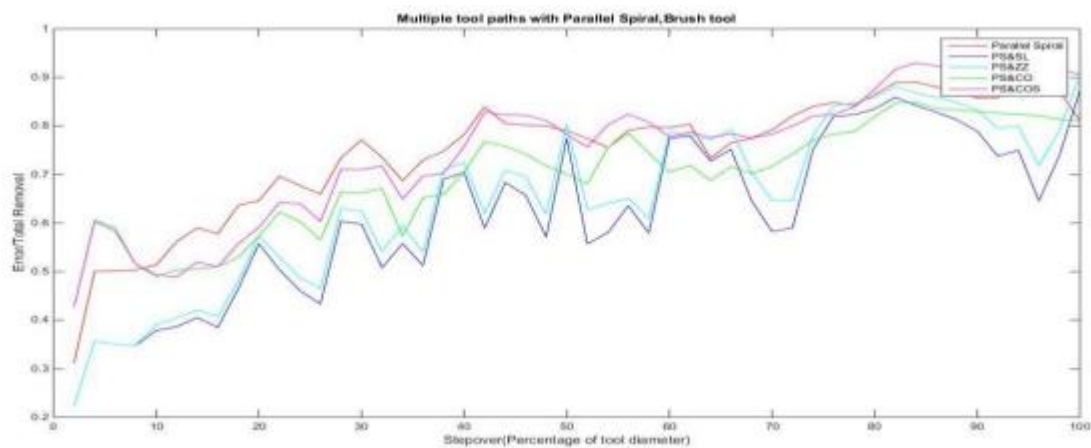


Рисунок 7 - Множинні ТРІ + паралельний спіральний рух (інструмент щітка)

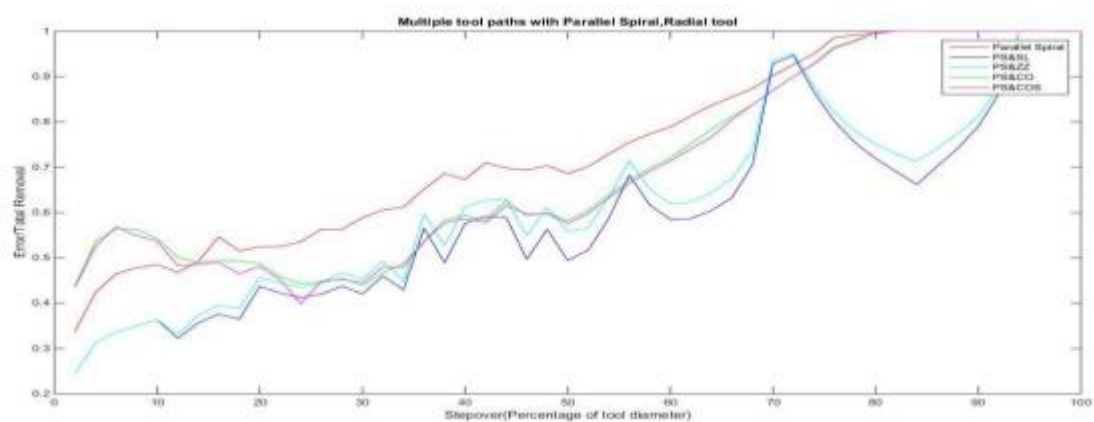


Рисунок 8 - Множинні ТРІ + паралельний спіральний рух (радіальний інструмент)

Додаток Л

Вплив зниження тиску на поверхню обробки

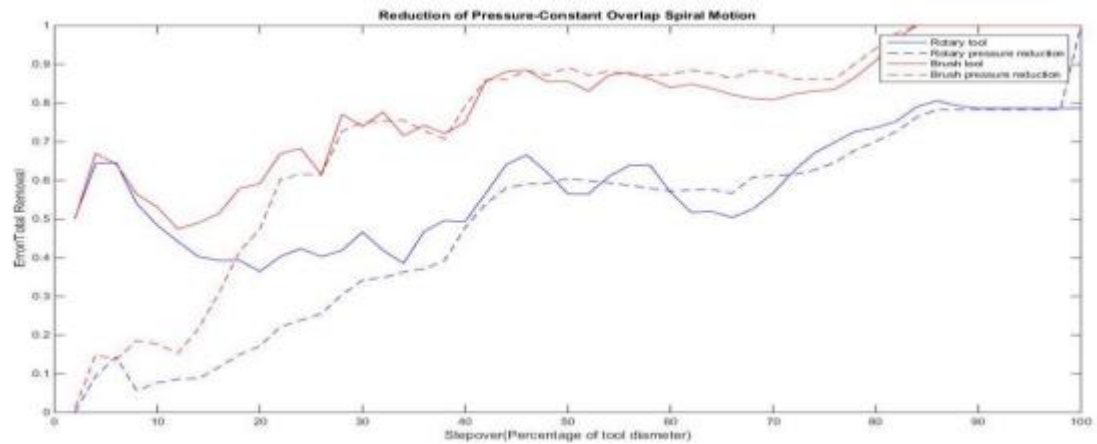


Рисунок 1 - Зниження тиску (постійний рух по спіралі з перекриттям)

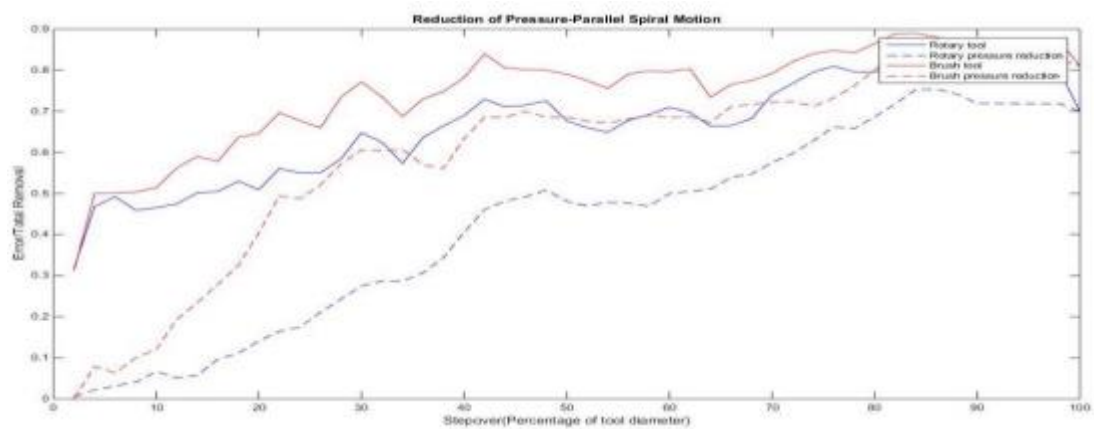


Рисунок 2 - Зниження тиску (паралельна спіральна ТРІ)

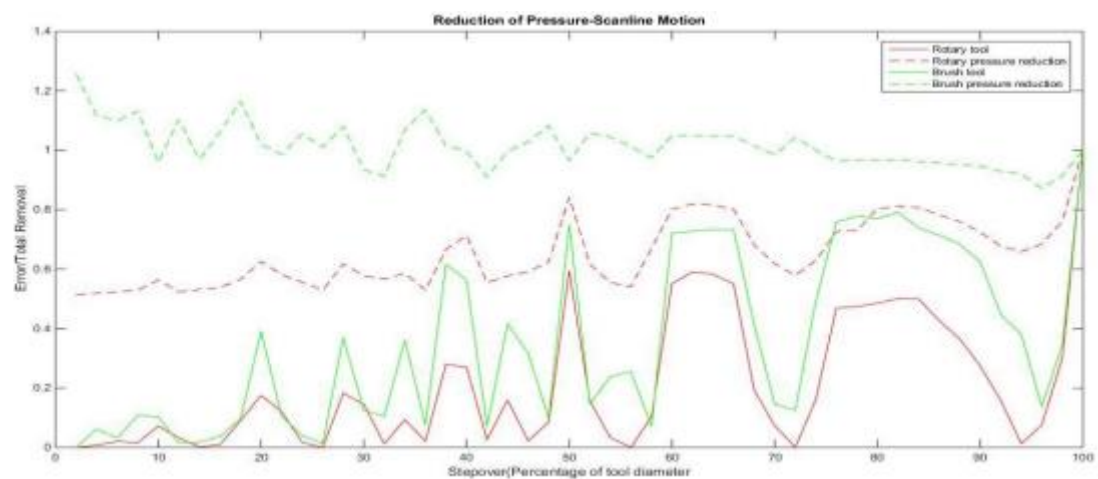


Рисунок 3 - Зниження тиску (рух по лінії сканування)

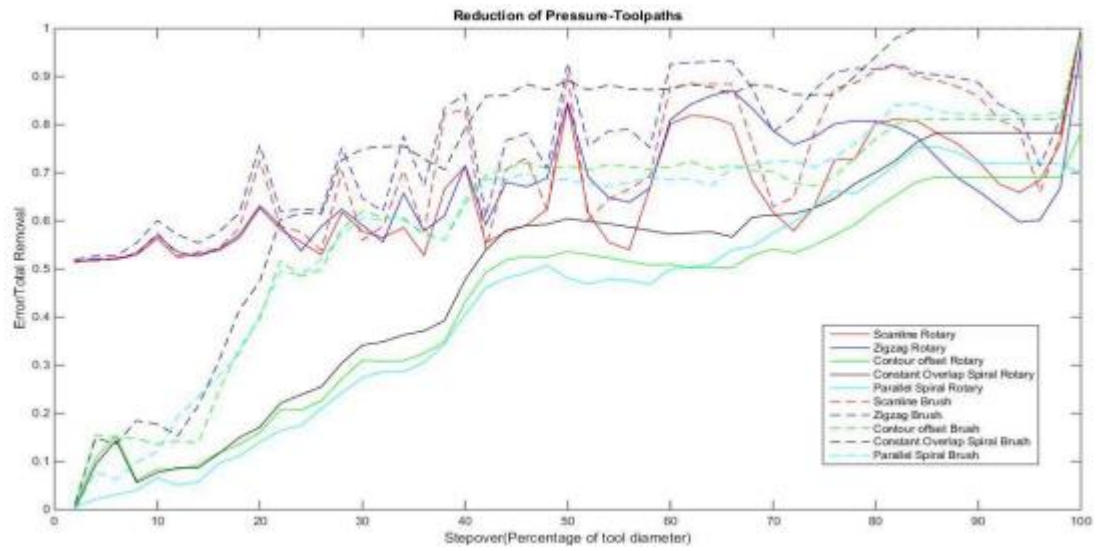


Рисунок 4 - Модифіковане E/R, зниження тиску (різні TPI)