

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 621.914

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(ініціали, прізвище)
«12» 12 2019р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

на тему: «Підвищення точності механічної обробки поверхонь
складного профілю на оброблюючих центрах»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПБ-81мп
Смольніков Денис Русланович

Керівник:

к.т.н., доцент Філіппова М.В.

Консультант з розроблення стартап-проекту:

д.е.н., доцент Бояринова К.О. .

Рецензент:

С.В.Викладач ПСМК, к.т.н.,

Богдан Г.А.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

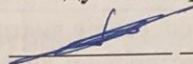
Кафедра виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (освітня програма) – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» («Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



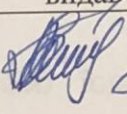
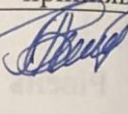
(ініціали, прізвище)

« 10 » 09 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Смольнікову Денису Руслановичу

1. Тема дисертації «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах», науковий керівник дисертації Філіппова Марина В'ячеславівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «04» листопада 2019 р. №3848-с
2. Термін подання студентом дисертації 12 грудня 2019р.
3. Об'єкт дослідження: механічна обробка поверхонь деталей
4. Вихідні дані: рекомендації з вибору руху інструменту для підвищення точності виготовлення поверхонь деталей складного профілю
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Огляд сучасного стану питання дослідження, методика проведення досліджень для визначення точності поверхонь деталей складного профілю, експериментальні дослідження точності обробки поверхонь складного профілю
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація в Microsoft PowerPoint за результатами дисертаційного дослідження
7. Орієнтовний перелік публікацій статті та матеріали науково-технічних конференцій за результатами дисертаційного дослідження

8. Консультанти розділів дисертації*

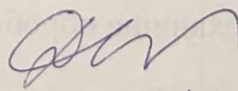
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап проекту «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах»	Бояринова К.О., д.е.н., доцент кафедри менеджменту		

9. Дата видачі завдання 11 вересня 2019 року

Календарний план

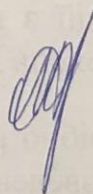
№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Сучасний стан питання дослідження та огляд літературних джерел	25 вересня 2019 р.	
2.	Методика теоретичних та експериментальних досліджень	16 жовтня 2018 р	
3.	Експериментальні дослідження точності механічної обробки поверхонь складного профілю	06 листопада 2018 р.	
4.	Розробка стартап проекту «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах»	27 листопада 2019 р.	
5.	Оформлення пояснювальної записки	06 грудня 2019 р.	
6.	Попередній захист магістерської дисертації	9-12 грудня 2019.	

Студент



Д. Р. Смольников

Науковий керівник дисертації



М. В. Філіппова

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на тему «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури та додатків.

Головною метою магістерської дисертації є розробка системи рекомендацій щодо вибору траєкторій руху інструменту при обробці поверхонь складного профілю з метою підвищення точності обробки.

Проаналізовано сучасний стан питання дослідження, розглянуто методи формування траєкторій руху інструменту, розглянуто їх переваги та недоліки, запропоновано методику розробки керуючих програм для оброблюючих центрів в системі SolidCAM, запропоновано методику розробки планів вимірювання в системі ZEISS Calypso, експериментально встановлено залежність точності механічної обробки складнопрофільних деталей від траєкторій руху ріжучого інструменту, створено систему рекомендацій щодо вибору траєкторій руху ріжучого інструменту при обробці складнопрофільних деталей з метою підвищення точності обробки, розроблено стартап-проект та проаналізовано можливості його запуску та виходу на ринок.

Результати роботи можуть бути використані на підприємствах задля підвищення точності механічної обробки відповідальних деталей складного профілю.

Ключові слова: ТОЧНІСТЬ, ПОВЕРХНІ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ, МЕХАНІЧНА ОБРОБКА.

ABSTRACT

The master's thesis on "Improving the accuracy of machining complex profile surfaces with machining centers" consists of an introduction, four sections, conclusion, list of literature and applications.

The main purpose of the master's thesis is to develop a system of recommendations for the choice of tool trajectories for machining surfaces of complex-profile in order to improve the accuracy of machining.

The current state of the research question is analyzed, the methods of forming the trajectories of the tool are considered, their advantages and disadvantages are considered, the method of development of control programs for machining centers in the SolidCAM system is proposed, the method of the development of measurement plans in the ZEISS Calypso system is proposed, cutting tool trajectories are experimentally elaborated, created a system of recommendations for the choice of cutting tool trajectories for machining complex profile parts to improve machining accuracy, a startup project was developed and opportunities for it's launching were analyzed.

The results of the work can be used in enterprises to improve the accuracy of machining responsible parts of a complex profile.

Keywords: ACCURACY, COMPLEX PROFILE SURFACES, MACHINING.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1. Сучасний стан питання дослідження та огляд літературних джерел.....	12
1.1 Основні поняття процесу механічної обробки поверхонь складного профілю	12
1.2 Особливості використання оброблюючих центрів при виготовленні деталей складного профілю	15
1.3 Аналіз стратегій обробки поверхонь складного профілю	17
1.4 Методи управління точністю при механічній обробці поверхонь складного профілю.....	19
Висновки до розділу	22
2. Методика теоретичних та експериментальних досліджень	23
2.1 Методика теоретичних досліджень обробки поверхонь складного профілю	23
2.2 Методика розробки траєкторій руху інструменту в системі SolidCam.....	26
2.2.1 Створення траєкторій руху інструменту в системі SolidCam	29
2.3 Методика розробки плану вимірювання в системі ZEISS Calypso..	35
2.3.1 Створення плану вимірювання в системі ZEISS Calypso	36
Висновки до розділу	39
3. Експериментальні дослідження точності механічної обробки поверхонь складного профілю.....	40
3.1 Оброблюючий центр з ЧПК DOOSAN DNM 4500.....	40
3.2 Координатно-вимірювальна машина ZEISS DuraMax	42
3.3 Вимірювальна головка ZEISS VAST XXT	45
3.4 Дослідження впливу траєкторій руху інструменту на точність механічної обробки поверхонь складного профілю.....	46

3.4.1 Дослідження впливу лінійної траєкторії на точність механічної обробки поверхонь складного профілю	48
3.4.2 Дослідження впливу спіральної траєкторії на точність механічної обробки поверхонь складного профілю.....	51
3.4.3 Дослідження впливу растрової траєкторії на точність механічної обробки поверхонь складного профілю.....	54
3.4.4 Дослідження впливу траєкторії по ватерлініям на точність механічної обробки поверхонь складного профілю.....	57
3.5 Аналіз результатів дослідження	60
Висновки до розділу	71
4. Розробка стартап проекту «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах»	72
4.1 Опис ідеї проекту	72
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	75
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	76
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	82
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап проекту	84
Висновки до розділу	88
Загальні висновки.....	90
Список літератури	91
Додатки.....	94

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЧПК – числове програмне керування;

ТП – технологічний процес;

КП – керуюча програма;

CAD – computer aided design;

CAM – computer aided manufacturing.

Вступ

Актуальність роботи. Сучасний розвиток техніки і технологій в області металообробки, при зростаючій тенденції до підвищення точності і якості продукції, що виготовляється, призводить до підвищення вимог до точності деталей.

У сучасному виробництві велика частина деталей складної форми виготовляється обробкою різанням. Забезпечення продуктивності виробництва, якості та точності отриманих деталей, досягається завдяки врахуванню всіх технічних обмежень та технологічних умов обробки.

Основним засобом автоматизації механічної обробки поверхонь складного профілю є оброблюючі центри з ЧПК, а засобом підготовки керуючих програм - системи автоматизованого проектування (САПР), зокрема Computer Aided Manufacture (CAM). Сучасні САМ-системи пропонують широкий вибір можливостей для проектування складнопрофільних поверхонь деталей та стратегій обробки на великому спектрі технологічного обладнання. Для промислових підприємств актуальною залишається задача зниження трудомісткості операцій виготовлення деталей зі збереженням заданих показників якості та точності.

Ефективність виготовлення деталей складного профілю залежить від технічних можливостей верстатного устаткування, засобів технічної підготовки виробництва і способів управління руху інструменту і оброблюваної заготовки, для отримання заданої поверхні на верстаті.

Однак вибір оптимального різального інструменту і технологічних параметрів, таких як: стратегія обробки, величина подачі, швидкість різання, крок зсуву за прохід, враховуються на підставі особистого досвіду технолога-програміста або оператора технологічного обладнання, тому що сучасні довідкові дані не дозволяють визначити оптимальні технологічні параметри для забезпечення вимог до поверхонь.

Прогресивним способом забезпечення точності оброблюваних поверхонь на верстатах з ЧПК (числовим програмним керуванням) є вибір оптимальної стратегії обробки. Цей підхід пов'язаний з найменшими витратами, так як реалізується повністю програмними засобами, не вимагаючи конструктивних змін або модернізації устаткування, а також є найбільш гнучким, оскільки простий в реалізації за допомогою САМ систем.

Таким чином можна зробити висновок, що дослідження впливу стратегії обробки на точність є актуальною задачею, так як дозволить раціоналізувати процеси обробки, підвищити якість і точність продукції, а також підвищити продуктивність виробництва в цілому.

Мета дослідження: розробка системи рекомендацій вибору траєкторій руху різального інструменту для підвищення точності виготовлення деталей на оброблюючих центрах.

Об'єкт дослідження: механічна обробка поверхонь складного профілю деталей.

Предмет дослідження: траєкторії руху інструменту при виготовленні деталей з поверхнями складного профілю.

Задачі дослідження:

- на основі аналізу процесу виготовлення деталей з поверхнями складного профілю визначити оптимальні траєкторії руху інструменту;
- розробити методику проведення дослідження для визначення точності поверхонь деталей складного профілю;
- провести експериментальні дослідження точності обробки поверхонь складного профілю;
- провести аналіз експериментальних досліджень;
- надати рекомендації щодо вибору траєкторій руху різального інструменту при механічній обробці поверхонь складного профілю.

Наукова новизна:

- отримано залежності параметрів точності різних типів поверхонь від траєкторій руху різального інструменту;
- створено систему рекомендацій щодо вибору траєкторій руху різального інструменту для різних типів поверхонь.

Практична цінність:

- визначено оптимальні траєкторії руху різального інструменту для різних типів поверхонь;
- надано методичні рекомендації з використання системи ZEISS Calypso при проектуванні плану вимірювань складнопрофільних поверхонь;
- надано методичні рекомендації з використання системи SolidCAM при розробці керуючих програми для верстатів з ЧПК.

1. Сучасний стан питання дослідження та огляд літературних джерел

1.1 Основні поняття процесу механічної обробки поверхонь складного профілю

Виготовлення складнопрофільних деталей є одним з найбільш трудомістких і дорогих етапів механообробного виробництва. Крім цього, зі збільшенням різноманітності форм деталей, підвищуються і вимоги, що пред'являються до точності їх виготовлення і профілю поверхні. Для досягнення високої якості та точності поверхонь застосовують механічну обробку.

Основним засобом автоматизації механічної обробки є оброблюючі центри з ЧПК. Підвищення ефективності використання такого обладнання може бути досягнуто за рахунок підвищення точності фрезерування, що дає можливість, з одного боку, зменшити кількість переходів при машинній обробці поверхонь, а з іншого - зменшити шар металу, що знімається при подальшій слюсарній обробці, в результаті чого може бути знижена сумарна трудомісткість виготовлення деталі.

Основним способом обробки деталей, що мають складний профіль, є об'ємне фрезерування на оброблюючих центрах з ЧПК кінцевими циліндричними і радіусними фрезами [1].

Вагомим фактором, що визначає ефективність використання верстатів з ЧПК є трудомісткість підготовки і налагодження керуючих програм. Керуючі програми містять відомості про траєкторії руху ріжучого інструменту, режими різання і всі необхідні дані для автоматичного виконання операції без втручання інженера проектувальника. Однак існує розрив між постійно зростаючими можливостями верстатів з ЧПК і труднощами в розробці керуючих програм, що забезпечує необхідну якість. Це відбувається через нестачу вивчення процесу об'ємного фрезерування, особливо динамічних процесів в зоні різання, і відсутності його формалізованого опису в широкому діапазоні коливання параметрів

процесу різання. Від того, наскільки повно спроектована програма враховує конкретні умови обробки, залежить експериментальна трудомісткість її налагодження. При цьому технологічні можливості верстатів з ЧПК, що дозволяють призначати раціональні режими різання на будь-якій ділянці оброблюваної поверхні, часто недовикористовуються [2].

Обробка деталей, що мають поверхні складного профілю значно ускладнюється при обробці поверхонь, які потребують, наприклад, обробки на п'ятикоординатному верстаті з ЧПК.

В процесі обробки різанням відбувається утворення поверхні шляхом деформування і відділення поверхневих шарів з утворенням стружки. На точність обробки впливають переважно ті деформації системи, які змінюють відстань між різальною кромкою інструмента і оброблюваної поверхнею, тобто деформації, спрямовані нормально до оброблюваної поверхні. Жорсткістю технологічної системи називають відношення складової сили різання, спрямованої по нормалі до оброблюваної поверхні, до зміщення ріжучої кромки інструменту щодо цієї ж поверхні заготовки і в тому ж напрямку [3, 4].

При обробці розрізняють зустрічне і попутне фрезерування.

Попутне фрезерування характеризується тим, що напрямок руху заготовки і вектора швидкості різання співпадають. При цьому товщина стружки на вході зуба в різання максимальна і зменшується до нульового значення на виході [5].

При попутному фрезеруванні умови входу пластини в різання більш сприятливі. Вдається уникнути високих температур в зоні різання і мінімізувати схильність матеріалу заготовки до зміцнення. Велика товщина стружки є в даному випадку перевагою. Сили різання притискають заготовку до столу верстата, а для збірного інструменту, пластини - в гнізда корпусу інструменту, сприяючи їх надійному кріпленню. Попутне фрезерування є кращим за умови, що жорсткість

обладнання, кріплення і сам оброблюваний матеріал дозволяють застосовувати даний метод [5].

При зустрічному фрезеруванні, швидкості різання і рух подачі заготовки спрямовані в протилежні сторони. При врізанні товщина стружки дорівнює нулю, на виході – максимальна [5]. У разі зустрічного фрезерування, коли ріжуча пластина починає роботу зі стружкою нульової товщини, виникають високі сили тертя, що відштовхують фрезу і заготовку один від одного [6]. У початковий момент врізання зуба процес різання більше нагадує вигладжування, з супутніми йому підвищеним тертям. Найчастіше це загрожує небажаним зміцненням поверхневого шару деталі. На виході з-за великої товщини стружки в результаті раптової розвантаження зуби фрези відчують динамічний удар, що приводить до викришування і значного зниження стійкості інструменту. При зустрічному фрезеруванні, стружка налипає на ріжучу кромку і перешкоджає її роботі в наступний момент врізання, це може привести до заклинювання стружки між пластиною і заготівлею і, відповідно, до пошкодження пластини [7, 8].

Багатокоординатна обробка деталей з поверхнями складного профілю характеризується безперервною зміною параметрів різання, а саме параметрів припуску, який видаляється, та перетинів зрізуваних шарів, критичних значень подачі та швидкості різання, що істотно впливає на нестабільність сили різання, й як наслідок, на точність оброблюваної поверхні. При обробці деталей з просторово-складними поверхнями, які оброблюються зі ступінчастим припуском відбувається безперервна зміна геометричних параметрів зони різання, що впливає на точність виготовлення поверхонь. Підвищити точність виготовлення можна за допомогою керування силою різання, зміною жорсткості технологічної системи, зміною одного чи декількох параметрів режимів різання, використанням різних траєкторій руху обробки та комбінованого використання перерахованих способів.

Так керування зміною геометрії зони різання можна здійснювати за допомогою верстату з ЧПК, який має можливість програмної зміни орієнтації інструменту відносно деталі. Регулювання глибини різання може бути досягнуто: зміною глибини різання на попередньому переході, з метою того щоб на чистовому переході при змінній глибині різання та заданій постійній подачі забезпечувалась необхідна точність поверхні, або введенням додаткового переходу.

1.2 Особливості використання оброблюючих центрів при виготовленні деталей складного профілю

Числове програмне керування (ЧПК) (з англ. Computer Numerical Control, CNC) — комп'ютеризована система керування, що зчитує команди спеціалізованої мови програмування (найпоширеніша - G-код) та, після інтерпретації в машинний код, керує приводами метало-, дерево- чи пластмасообробних верстатів з програмним керуванням. Значну частину технологічного устаткування з числовим програмним керуванням на даний час складають металорізальні верстати, шліфувальні верстати, електроерозійні верстати та пресове устаткування.

Верстати з ЧПК повинні забезпечувати високу точність і швидкість відпрацювання переміщень, заданих керуючою програмою, а також зберігати цю точність в межах, що задані, при тривалій експлуатації. Конструкція верстатів з числовим програмним керуванням повинна забезпечити можливість виконання різних видів обробки, автоматизоване завантаження та розвантаження деталей, автоматичне чи дистанційне керування зміни інструментів, а також можливість монтажу верстата у загальну систему автоматичного управління. Висока точність обробки на таких верстатах визначається точністю виготовлення і жорсткістю самого верстата [9]. У конструкціях верстатів з ЧПК використовуються короткі кінематичні ланцюги, це, в свою чергу, підвищує динамічну та статичну жорсткість верстатів. Для всіх виконавчих органів використовують

автономні приводи та намагаються мінімізувати число механічних передач. Приводи мають мати високу швидкодію. Точність верстатів з числовим програмним керуванням підвищується в результаті зменшення зазорів в передавальних механізмах приводів, а також зменшення втрат при терті в напрямних і механізмах, підвищення стійкості до вібрацій та зниження теплових деформацій [10].

В міру свого розвитку системи з числовим програмним керуванням наклали на технологічне устаткування специфічні відмінності, що пов'язані з особливостями роботи виконавчих систем, а також автоматизації технологічних процесів у металооброблюючому виробництві, що призвело до специфічної організації верстатів з числовим програмним керуванням як об'єктів управління [11].

Для прецизійної обробки на верстатах із ЧПК необхідним є висока якість та точність виготовлення всіх вузлів, деталей та верстата в цілому. Точність верстата визначає точність виготовлення його вузлів та деталей (особливо деталей напрямних та корпусних, що несуть заготовку та інструмент), твердість його елементів, якість складання верстата, точність виготовлення приводів механізмів, умови тертя в напрямних при переміщенні робочих органів, зазори в з'єднаних деталях тощо. Жорсткість відповідальних вузлів верстата, шпинделя та інших деталей повинна перевищувати жорсткість аналогічних вузлів, що призначені для традиційних верстатів [11].

При обробці деталей, що мають складний профіль, з використанням фрезерних верстатів з ЧПК, технологічний процес, як правило, складається з трьох етапів:

- чорнове фрезерування;
- чистове фрезерування;
- доводочні операції.

На етапі чорнового фрезерування, в більшості випадків, відбувається зняття припуску для досягнення максимального наближення форми

оброблюваної заготовки до форми готової деталі. При цьому проводиться пошарове зняття припуску інструментом. Як правило, припуск знімається шарами з постійною шириною фрезерування.

В результаті під чистове фрезерування залишається ступінчастий припуск, висота сходинок якого задається суб'єктивно технологом й на виробництві коливається від 0,5 до 3 мм. Етап чистового фрезерування полягає в знятті ступеневого припуску, залишеного після операції чорнового фрезерування і наближення до остаточного контуру для отримання точності розмірів і форми готової деталі. При великій кількості «сходинок» на чисто оброблених поверхнях утворюється таке відхилення форми як хвилястість. Для уникнення такого виду відхилення форми та чистоти поверхні необхідно враховувати їх при виборі параметрів обробки на стадії чорнового фрезерування.

Доводочні операції використовуються для остаточної обробки деталі і досягнення заданих кресленням вимог по точності і шорсткості. Припуск під ці операції складає 0,1 - 0,5 мм.

1.3 Аналіз стратегій обробки поверхонь складного профілю

На сьогоднішній день є безліч систем автоматизованого проектування з можливістю постпроцесування технологічної інформації в керуючу програму. До того ж існує досить велика різноманітність стратегій обробки поданих в САМ системах, але критерії вибору, засновані на досвіді технолога-програміста, не дозволяють дати однозначну оцінку щодо вибору оптимального варіанта обробки.

Обробку поверхонь складного профілю на технологічному обладнанні з ЧПК виконують при різному поєднанні і послідовності виконання переходів з використанням керуючої програми.

Розглянемо основні методи формування траєкторії руху інструменту при фрезеруванні (Рис. 1.1):

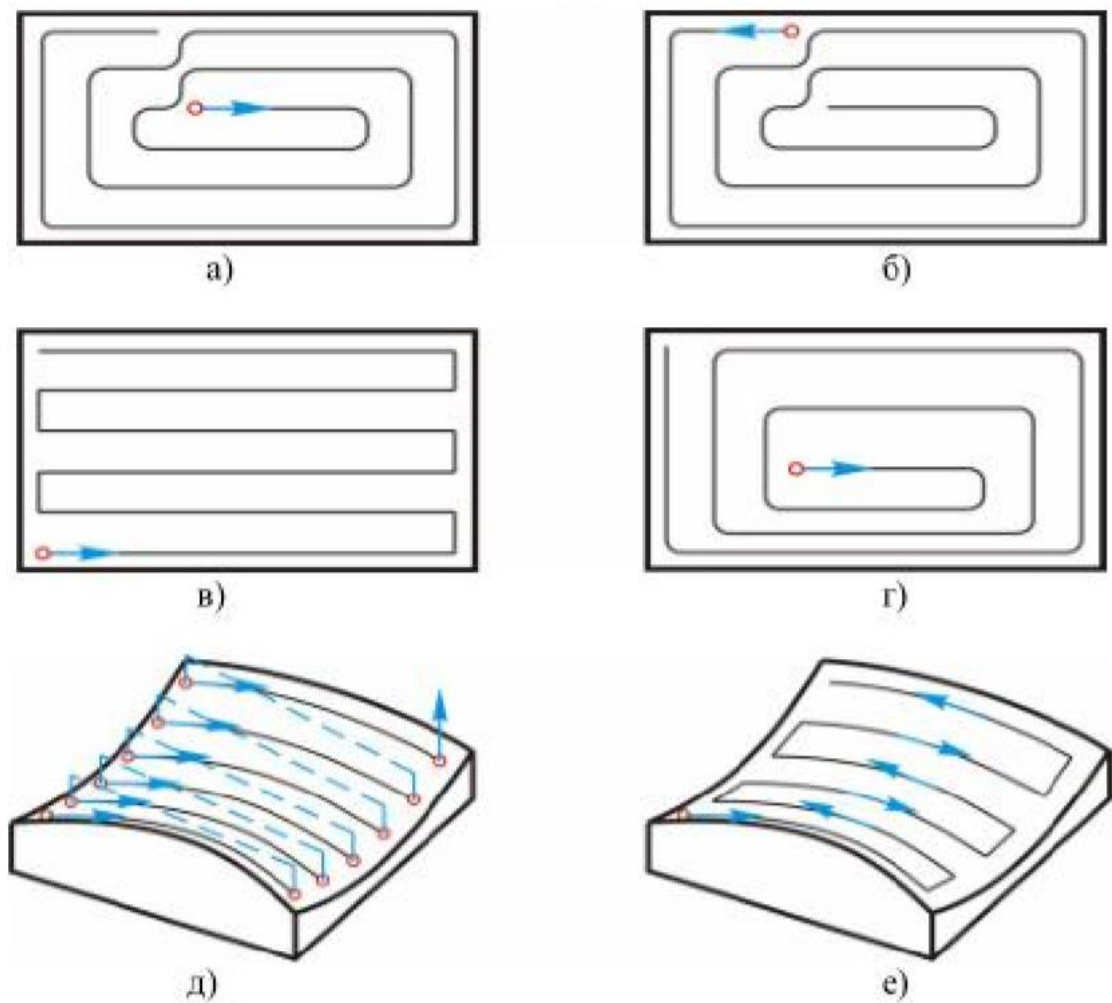


Рис. 1.1. Методи формування траєкторії руху інструменту
(а – еквідистанта; б - зворотна еквідистанта; в - зигзаг; г - спіраль; д -
петля UV; е - зигзаг UV).

Стратегія руху еквідистанта передбачає видалення металу від центру конструктивного елементу по еквідистанті до його контуру. Зворотна еквідистанта передбачає видалення металу від зовнішнього контуру до його центру.

Обробка по зигзагоподібній траєкторії відбувається паралельними проходами з певним кроком та кутом нахилу відносно осі. Дана стратегія застосовується переважно для прямокутних моделей і працює, використовуючи масив кривих всередині контуру і проектуючи точки з цих кривих на модель. Зигзагоподібні траєкторії часто використовуються

на відкритих деталях. Дана стратегія не призначена для вертикальних областей обробки.

Спіральна обробка використовується для чистової обробки областей, яким необхідний постійний крок, і працює на горизонтальних гранях. Спіральна стратегія характеризується плавною траєкторією обробки. Спіральна траєкторія має два основні різновиди, перший з яких характеризується рухом інструменту від центру до периферії, а другий від кордонів області до її центру.

Петля UV. Обробка уздовж параметричних (UV) ліній поверхні зі збереженням тільки попутного або зустрічного фрезерування. Напрямок задається кутом до осі X.

Зигзаг UV. Обробка ведеться уздовж параметричних (UV) ліній поверхні паралельними проходами з заданим кроком і кутом нахилу до осі X.

Таким чином, в даний час існують кілька основних стратегій фрезерної обробки, що володіють своїми перевагами та недоліками. Однак в реальних виробничих умовах технолог програміст часто призначає ряд технологічних параметрів - крок зсуву за прохід, подачу інструменту і швидкість різання необґрунтовано, на основі особистого досвіду, що може призвести до втрати точності або зниження продуктивності виробництва.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що найбільш важливим завданням є вибір стратегій обробки та режимів різання для забезпечення заданих параметрів точності та якості.

1.4 Методи управління точністю при механічній обробці поверхонь складного профілю

Найважливішим показником якості машинобудівної продукції, від якого залежить більшість експлуатаційних характеристик машин, є точність виробів [12].

Точністю виробу в приладобудуванні називають ступінь його відповідності до заздалегідь встановленого зразку. Під точністю деталі розуміють ступінь відповідності реальної деталі, отриманої механічної обробкою заготовки, по відношенню до деталі, заданої кресленням і технічними умовами виготовлення, тобто відповідність форми, розмірів, взаємного розташування оброблених поверхонь, шорсткості поверхні обробленої деталі вимогам креслення [12].

Точність - поняття комплексне, що включає оцінку відповідності реальної деталі по відношенню до заданої.

Один із методів управління точністю полягає в компенсації коливань пружних відтискань інструменту і деталі шляхом внесення поправок в розмір статичної настройки. Цей спосіб мало прийнятний для такого складного процесу як об'ємне фрезерування, так як при механічній обробці різанням поверхні складного профілю через змінності величини напрямки і пружних відтискань необхідно було б вносити на окремих ділянках поверхні різні поправки. Це значно ускладнює і без того трудомісткий процес підготовки керуючої програми, так як виникає необхідність коригування статичної настройки розрахунку спотворень траєкторії для кожної окремої ділянки [13].

Інший метод полягає в безпосередній стабілізації динамічних похибок. З метою управління точністю обробки для прямої стабілізації пружних переміщень використовують [13]:

- зміну жорсткості технологічної системи;
- зміну геометрії зони різання;
- зміну одного або декількох параметрів режиму різання;
- комбіноване використання перерахованих способів.

Управління зміною геометрії зони різання можна здійснити на обробних центрах з ЧПУ, що володіють можливістю програмного зміни орієнтації інструмента відносно оброблюваної поверхні, оскільки при

об'ємному фрезеруванні взаємне положення фрези і оброблюваної поверхні впливає на геометрію зони різання [13].

Регулювання подачі є досить гнучким і ефективним способом підвищення точності обробки. Однак виникає необхідність або розбивати профіль деталі на ділянки в залежності від кривизни оброблюваної поверхні і необхідної точності обробки (що призводить до ускладнення керуючої програми), або намагатися отримати більш плавну зміну глибини різання з тим, щоб при можливо меншій кількості розбиття вдавалося отримати необхідну точність [14].

Зміна глибини різання на поточному переході може бути досягнута наступними способами:

- регулюванням глибини різання на попередньому переході для того, щоб на чистовому переході при змінній глибині різання і заданій постійної подачі забезпечувалася необхідна точність і шорсткість;

- введенням додаткового попереднього переходу.

Додатково застосовують такі методи досягнення заданої точності:

- обробка по розмітці або з використанням пробних проходів шляхом послідовного наближення до заданої форми і розмірів; після кожного проходу інструменту контролюються отримані розміри і розраховується величина припуску, що необхідно зняти; точність в цьому випадку залежить від кваліфікації робітника;

- обробка методом автоматичного отримання розмірів - інструмент попередньо налаштовується на потрібний розмір, після чого проводиться обробка заготовки в незмінному положенні; в цьому випадку, точність залежить від кваліфікації наладчика і способу настройки;

- автоматична обробка на копіювальних верстатах і верстатах з числовим програмним керуванням, де точність залежить від точності дії системи управління.

Висновки до розділу

1. Аналіз сучасного стану питання дослідження показав, що виготовлення складнопрофільних деталей є одним з найбільш трудомістких і дорогих етапів механообробного виробництва. Для досягнення високої якості та точності поверхонь застосовують механічну обробку. Основним засобом автоматизації механічної обробки є оброблюючі центри з ЧПК.

2. Вагомим фактором, що визначає ефективність використання верстатів з ЧПК є трудомісткість підготовки і налагодження керуючих програм. Керуючі програми містять відомості про траєкторії руху ріжучого інструменту, режими різання і всі необхідні дані для автоматичного виконання операції без втручання інженера проектувальника.

3. Обробку поверхонь складного профілю на технологічному обладнанні з ЧПК виконують при різному поєднанні і послідовності виконання переходів з використанням керуючої програми.

4. Розглянуто методи управління точністю при механічній обробці на верстатах з числовим програмним керуванням

2. Методика теоретичних та експериментальних досліджень

2.1 Методика теоретичних досліджень обробки поверхонь складного профілю

Важливою особливістю систем ЧПК є програмування функцій траєкторії руху інструментів, призначених для обробки деталей, поверхні яких мають складний профіль [15].

Кожна система з числовим програмним керуванням унікальна і має власний синтаксис керуючої програми. Тому процес підготовки програм для багатокоординатної обробки є досить складним. Найбільш зручним і широко поширеним методом розробки КП, є автоматизований метод із застосуванням CAD / CAM систем. Застосування даного методу дозволяє задавати технологічні параметри обробки, створювати траєкторії руху інструменту, генерувати КП в кодах конкретного верстата [15, 16].

Необхідність програмування більш складних траєкторій переміщення виникає тоді, коли обґрунтований вибір діаметра застосовуваної фрези не перекриває ширину оброблюваної поверхні [17].

CAM-системи дозволяють розрахувати траєкторії руху інструменту при обробці окремих ділянок поверхні різними схемами [18]. На рисунку 2.1 вказані найбільш поширені стратегії обробки при фрезеруванні торцевими і кінцевими фрезами.

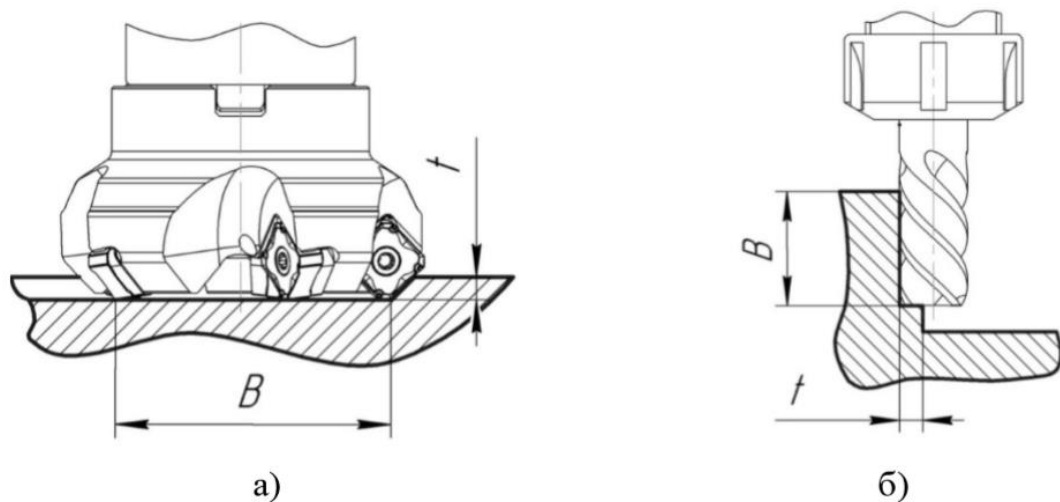


Рис. 2.1. Фрезерування: а) торцевою фрезою б) кінцевою фрезою, де
 B - ширина фрезерування, мм; t - глибина, мм

Схема зняття припуску зигзаг характеризується послідовним переміщенням уздовж паралельних рядів з подачею протилежного напрямку. Недоліком цієї схеми є той факт, що на кожному суміжному ряду відбувається зміна характеру роботи фрези з попутного фрезерування на зустрічну або навпаки.

Відстань бокового кроку вибирається так, щоб забезпечити перекриття одержуваних поверхонь з урахуванням радіуса заокруглення різальних крайок на торці фрези.

Зняття припуску по спіралі або еквідистанті застосовують при обробці заглиблень. При цих схемах здійснюється обробка контуру поверхні з періодичним поглибленням. Обхід контуру проводиться з однаковим напрямком робочої подачі.

При обробці за схемою зняття припуску петля, після проходу вздовж кожного ряду фреза піднімається на безпечну відстань і на прискореній подачі переміщається в початкову точку нового ряду. Відповідно до даної схеми, на всіх рядах має місце однаковий напрямок робочої подачі. Даний факт є перевагою зазначеної схеми. Недоліком схеми, можна виділити підвищене число допоміжних ходів, що призводить до зниження продуктивності.

Попереднє фрезерування за умови, що необхідно зняти великий припуск, виконують за допомогою торцевих фрез, послідовними проходами по схемі зигзага. Ширину поверхні і діаметр інструмента вибирають так, щоб виникаючі пружні переміщення інструменту не чинили істотний вплив на точність поверхні. У таких випадках, якщо припуск нерівномірний, а його величина порівняно велика, діаметр інструмента рекомендується зменшувати. У свою чергу, на остаточних операціях слід застосовувати інструмент більшого діаметру, що дозволяє перекрити ширину оброблюваної поверхні. При остаточній обробці, для забезпечення параметрів геометричної точності і шорсткості поверхні, залишають малі припуски [19].

Обробка зовнішніх і внутрішніх контурів здійснюється із застосуванням кінцевих фрез, однак ці фрези застосовують також для обробки плоских поверхонь для обробки пазів і заглиблень. При фрезеруванні зовнішньою циліндричною поверхнею стінок і ребер діаметр кінцевої фрези призначають з умови [19]:

$$D = (5 \dots 10) * b + 2 * r ; \quad (2.1)$$

де b – товщина стінки або ребра;

При обробці контурної поверхні діаметр фрези визначається геометрією контуру, а саме, радіус фрези не повинен перевищувати найменшого радіуса сполучення (r_{min}) в створюваному контурі ($0,5D \leq r_{min}$). Для зменшення деформацій заготовки обробку заглиблень рекомендується виконувати з середини контуру, а обробку уступу і виїмок слід починати з видалення шарів металу зі сторони зовнішнього контуру.

Для забезпечення достатньої жорсткості кінцевої фрези, рекомендований діаметр вибирається з умови $2,5 D \geq B$. При цьому довжина ріжучої частини фрези L приймається рівною [19]:

$$L = B + (5 \dots 7) \quad (2.2)$$

При фрезеруванні поверхонь складного профілю кінцевим сферичним інструментом відбувається безперервна зміна таких геометричних параметрів зони різання як товщина шару, що зрізається, положення і довжина активної частини різальної крайки. Крім товщини зрізаного шару, при об'ємному фрезеруванні відбувається зміна величини зони контакту фрези в залежності від кута оброблюваної поверхні, що в свою чергу впливає на довжину активної частини різальної крайки в кожен момент повороту зуба [20, 21]. У загальному випадку умова торкання сферичної частини інструменту і поверхні заготовки в робочій області можна описати рівнянням [19]:

$$A\{X_i, Y_i, Z_i\} = B\{X_i, Y_i, Z_i\}, \quad (2.3)$$

де X, Y, Z – координати точки дотику; i – система «інструмент»; u – система «заготовка».

2.2 Методика розробки траєкторій руху інструменту в системі SolidCam

SolidCAM компанії SolidCAM Ltd (США)- це потужне САМ-рішення, що базується на основі системи SolidWorks, створене для програмування керуючих програм, яке було спеціально розроблено для використання в машинних умовах.

Система SolidCAM є єдиною САМ системою, що включає в себе запатентовану технологію iMachining, при цьому підтримує весь необхідний токарний, токарно-фрезерний та фрезерний функціонал, а також функціонал для програмування багатофункціональних токарно-фрезерних верстатів, в тому числі автоматів поздовжнього точіння швейцарського типу.

У 2003 році SolidCAM отримала сертифікат Gold-Product від SolidWorks. В одному єдиному інтегрованому застосуванні рішення SolidWorks і SolidCAM підтримують технології виготовлення 2.5D

фрезерування, 3D фрезерування, 3 + 2 багатосторонньої обробки, одночасну механічну обробку 5 осей, токарну обробку, токарно-фрезерну та WireEdm.

Постпроцесори G-коду SolidCAM можна легко налаштувати для задоволення потреб окремих програм та контролерів машин, так що користувачі можуть генерувати керуючі програми для оброблюючих центрів для всіх контролерів верстатів.

Одна з відмінних рис SolidCAM - орієнтація на підтримку інтелектуальних процесів обробки. Програма надає користувачеві можливість створювати і збирати шаблони обробки для їх багаторазового використання при обробці аналогічних деталей.

Завдяки зручності використання і великій різноманітності підтримуваних операцій обробки SolidCAM найкращим чином підходить для вирішення завдань механообробки як в невеликих або середніх цехах одиничного виробництва, так і на великих промислових підприємствах, які виробляють деталі і вузли в масовому і великосерійному обсязі.

Проте, на відміну від програм, призначених для певного кола користувачів, SolidCAM не націлений на якийсь певний сектор ринку і застосовується в самих різних галузях промисловості: електротехнічній, електронній, автомобільній, машинобудівній, аерокосмічній та ін. Така різноманітність забезпечена як можливостями самої програми SolidCAM, так і її інтеграцією з SolidWorks, який є основним засобом просторового моделювання, що застосовуються практично у всіх галузях.

Програма SolidCAM поставляється як в повному обсязі, так і окремими модулями, а значить до переоснащення виробництва можна підійти поетапно і гнучко.

SolidCAM підтримує різні стратегії обробки таких елементів, як контур, вибірка і паз. Модуль автоматичного розпізнавання отворів дозволяє автоматизувати процес обробки деталей з великою кількістю отворів. Підтримуються різні типи обробки отворів: свердління,

зенкування, нарізування різьби та інші. Програма має широкий діапазон можливостей для 2,5-координатної обробки поверхонь.

3-координатне фрезерування в SolidCAM застосовується для виготовлення як призматичних деталей, так і деталей складної форми. В процесі роботи над призматичними деталями система автоматично аналізує геометрію моделі і визначає контури і кишені для подальшої обробки по ватерлінії.

SolidCAM надає різні типи стратегій чорнкової і чистової обробки, в тому числі високошвидкісне фрезерування і доопрацювання ділянок, які не були оброблені на попередніх переходах. Незалежно від ступеня складності моделі система забезпечує незмінно високу якість при обробці прессформ, штампів і електродів.

SolidCAM підтримує різні типи інструментів, що дозволяє ефективно проводити поздовжнє точіння, підрізування торців, обробку канавок і ін. Підтримка обертового інструменту дозволяє виконувати фрезерні й свердлильні переходи на обробних центрах.

SolidCAM пропонує багатий вибір засобів для створення керуючих програм багатоосьової обробки на 4- і 5-координатних обробних центрах. Програма встановлює модель в задану площину обробки, автоматично розрахувавши необхідні параметри зсуву і повороту для нуля деталі. SolidCAM забезпечує простоту подальшого налагодження і знижує необхідність в спеціальних пристосуваннях. Контроль траєкторії руху інструменту здійснюється за допомогою вдосконалених засобів візуалізації.

SolidCAM надає високоефективні методи безперервної обробки, що включають обробку боковою поверхнею інструменту, для виробництва деталей зі складною геометрією (інструмент і оснащення, аерокосмічні деталі, головки циліндрів, лопаті турбін і пропелерів). Програма забезпечує реалістичну імітацію процесу обробки, яка дозволяє

контролювати траєкторію руху інструменту і переміщення вузлів верстата з метою запобігання можливим зіткненням.

2.2.1 Створення траєкторій руху інструменту в системі SolidCAM

Для створення проекту необхідно відкрити програму SolidWorks та запустити модуль SolidCam. Після чого необхідно створити нову операцію, в нашому випадку це буде фрезерна операція. Система запропонує обрати постпроцесор, модель деталі та заготовки, вказати нуль деталі, який буде використовуватися при формуванні керуючої програми (рис 2.3).

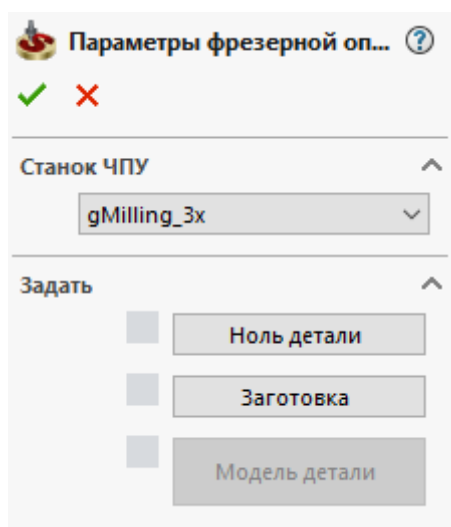


Рис 2.3 Вибір постпроцесору, нуля деталі, моделі заготовки та моделі деталі

Вибір постпроцесору залежить від типу верстата, його системи керування та характеристик. Нуль деталі задається залежно від попередньо обраної схеми базування деталі. Модель деталі створюється попередньо на основі креслення деталі. Модель заготовки створюється попередньо та залежить від багатьох факторів: технологічного процесу, матеріалу, припусків на обробку та ін.

Після проведення всіх необхідних дій, в головному вікні буде відображено модель деталі та заготовки (рис 2.4).

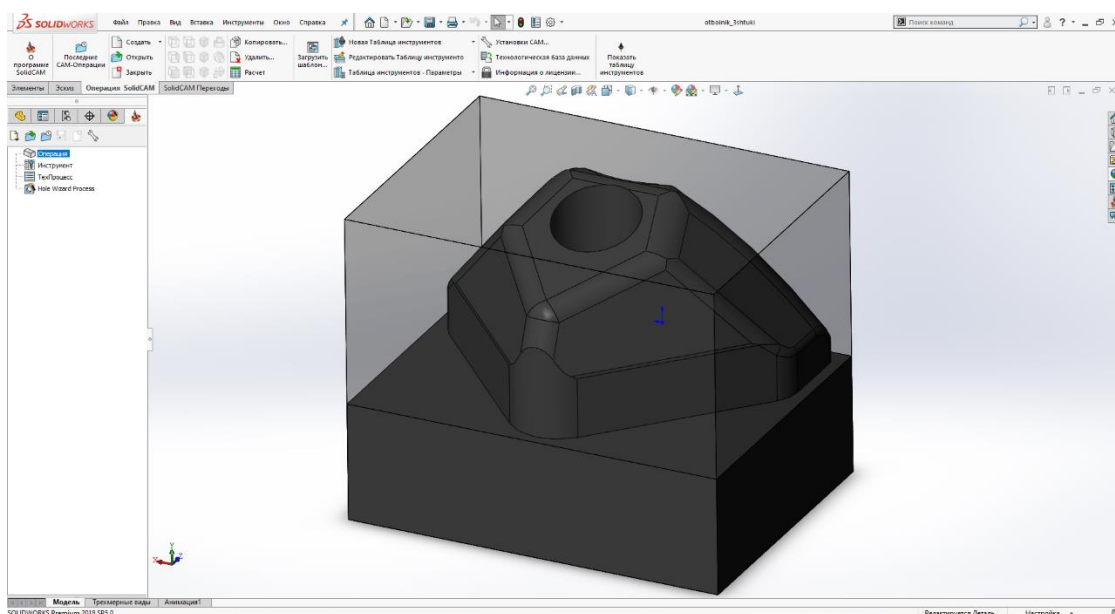


Рис 2.4 Головне вікно SolidCam

Наступним кроком є створення переходів відповідно до розробленого заздалегідь технологічного процесу обробки деталі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 Технологічний процес обробки деталі

Перехід	Інструмент
1. Центрування	Свердло центровальне (D= 3.2)
2. Свердління	Свердло (D= 7.2)
3. Фрезерування чорнове	Фреза кінцева (D= 6)
4. Фрезерування чистове	Фреза радіусна (D= 4, R= 2)

Спочатку додамо три перші переходи, оскільки вони будуть однаковими для всіх варіантів обробки (рис 2.5).

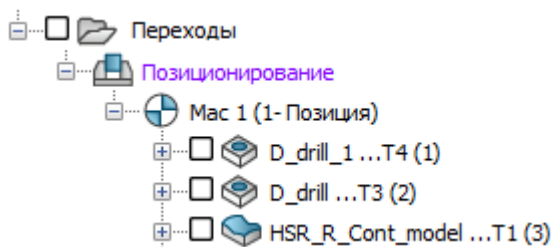


Рис 2.5 Додавання переходів

Для правильної інтерпретації керуючої програми постпроцесором, необхідно вказати всі інструменти, що будуть використовуватися при

обробці. Також важливим є внесення попередньо розрахованих режимів різання для кожного інструменту (рис 2.6).

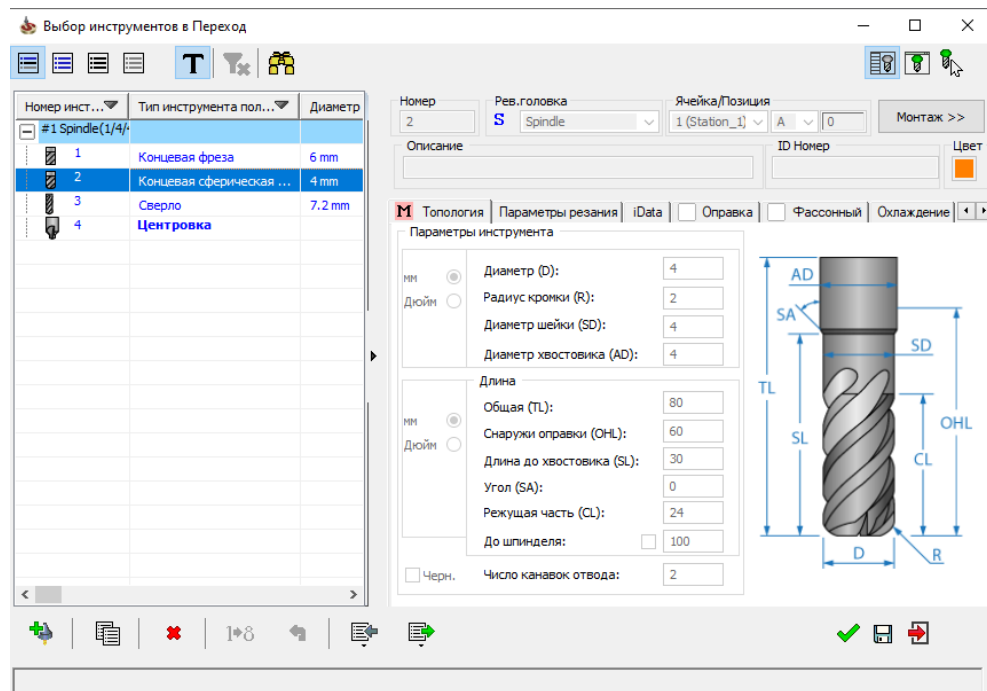


Рис 2.6 Додавання інструменту

Після внесення всіх необхідних даних та введення параметрів обробки, ми отримаємо траєкторії чорнової обробки (рис 2.7). За необхідності, технолог-програміст вручну вносить корективи в траєкторії.

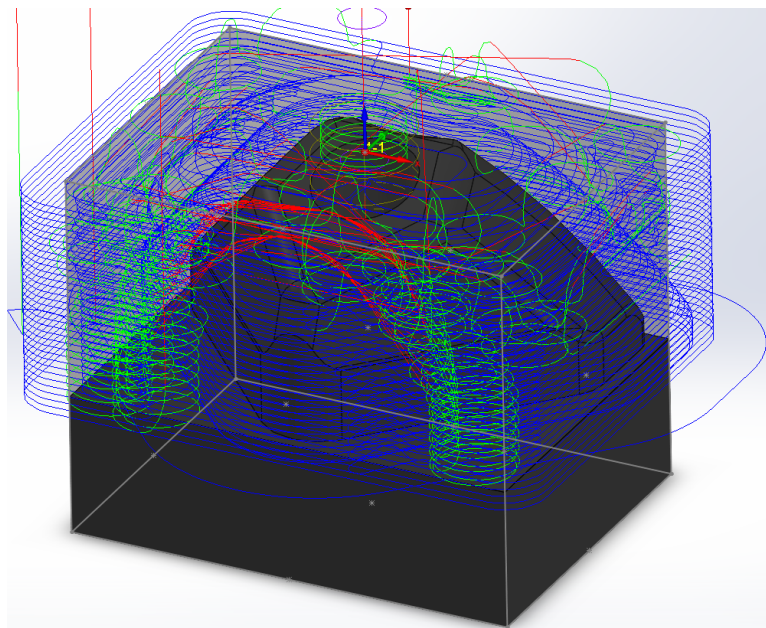


Рис 2.7 Теоретичне зображення траєкторій чорнової обробки

Найголовнішим кроком є додавання чистового переходу та правильне його налаштування, оскільки саме на основі цього переходу і буде відбуватися аналіз результатів різних методів обробки.

За основний метод формування чистових траєкторій було обрано технологію SolidCam HSS.

Модуль SolidCam HSS призначений для якісної і продуктивної обробки поверхонь деталі, включаючи поверхні складного профілю.

Модуль SolidCAM HSS підтримує велику кількість стратегій обробки поверхонь. Ці стратегії забезпечують формування ефективних, плавних, безпечних і оптимальних траєкторій руху інструменту.

Передбачено спеціальні можливості зв'язування окремих сегментів в складі траєкторії, що дозволяє здійснювати плавне підведення і відведення інструменту. Користувач може управляти формуванням переміщень між окремими сегментами траєкторії, що дозволяє обходити отвори і пази без зміни геометрії моделі. Відведення інструменту може виконуватися на будь-яку з основних площин.

Так як деталь має в своєму складі поверхні складного профілю, для її обробки необхідним є правильний вибір методів обробки серед всіх варіантів, що представлені в модулі SolidCam HSS.

Для деталі було обрано наступні методи обробки, що представлені в модулі SolidCam HSS:

- лінійна траєкторія
- растрова траєкторія
- спіральна траєкторія
- траєкторія по ватерлініям

Наступним кроком є створення переходу чистового фрезерування та формування траєкторій кожним з обраних методів, введення всіх необхідних параметрів, таких як крок по осі Z, режими обробки, відстані підведення та відведення інструменту.

В результаті отримаємо сформовану траєкторію чистового фрезерування обраним методом (рис 2.8).

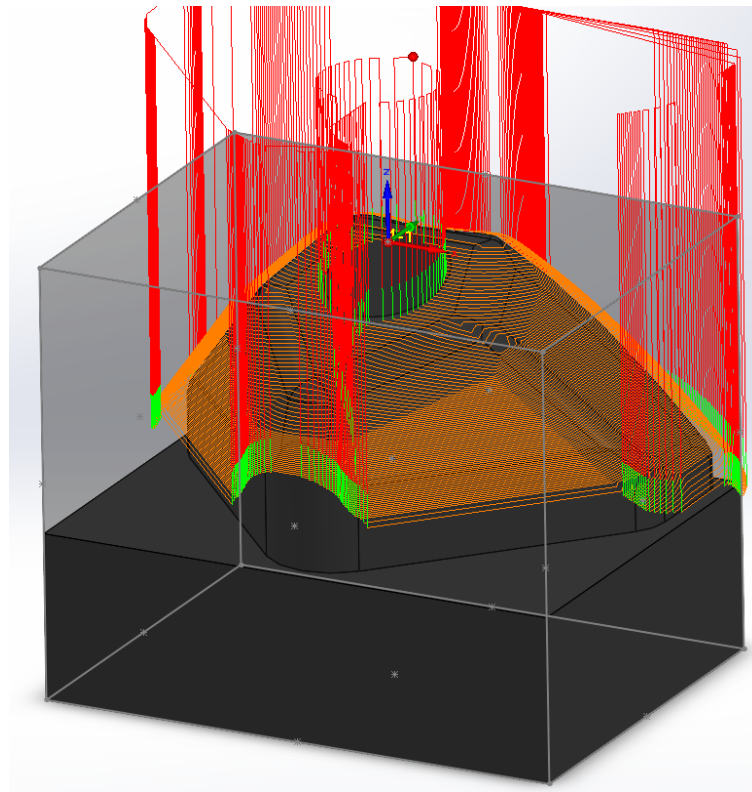


Рис 2.8 Приклад візуалізації чистової обробки за стратегією по ватерлініям

Виконаємо розрахунок режимів різання. Для чорнового переходу оберемо трьохзубу кінцеву фрезу з діаметром $D = 6\text{ мм}$, швидкість різання назначимо $V = 110\text{ м/хв}$, таким чином отримаємо частоту обертання шпинделя $S = 6000\text{ об/хв}$. Назначимо подачу $F = 0.2\text{ мм/об}$, переведемо в хвилинну подачу і отримаємо $F = 1200\text{ мм/хв}$. Крок по осі z $IZ = 0.7\text{ мм}$, припуск на стінку $Z = 0.1\text{ мм}$.

Постачальник фрез пропонує для чистової обробки алюмінієвих сплавів назначити швидкість різання $V = 130\text{ м/хв}$.

Таким чином, розрахуємо режими різання для чистової обробки. Чистову обробку будемо виконувати радіусною фрезою діаметру $D = 4\text{ мм}$ з радіусом $R = 2\text{ мм}$. При швидкості різання $V = 130\text{ м/хв}$, отримаємо кількість обертів шпинделя $S = 10350\text{ об/хв}$. Назначимо подачу на оберт F

= 0.1 мм/об, переведемо в хвилинну подачу і отримаємо $F = 1035$ мм/хв. Для кожної стратегії назначимо крок інструменту $Z = 0.1$ мм.

Теоретичні значення параметрів шорсткості та часу обробки для кожного з методів формування траєкторій обробки приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Теоретичні значення шорсткості та часу обробки

<i>Стратегія</i>	<i>Час обробки</i>	<i>Шорсткість</i>
Лінійна	9 хв 2 сек	$Ra = 0.63$ мкм
Спіральна	7 хв 51 сек	$Ra = 0.63$ мкм
Растрова	8 хв 38 сек	$Ra = 0.63$ мкм
Ватерлінії	8 хв 42 сек	$Ra = 0.63$ мкм

Наступним кроком є виведення отриманих траєкторій руху у вигляді керуючої програми для оброблюючого центра. Формування керуючої програми відбувається за рахунок постпроцесору, що був обраний на першому етапі.

Керуюча програма являє собою набір команд, що представлені у вигляді спеціальної мови програмування – G-код. Керуюча програма містить дані про всі переміщення, які має виконати інструмент, відомості про сам інструмент, режими різання, а також допоміжну інформацію, яку може використати оператор оброблюючого центра при проведенні наладки верстата та підготовки до обробки.

Фрагмент керуючої програми представлений на рис 2.9.

```

%
O1000 (Diplom)
N100 (COMPENSATION-WEAR)
N106 (TOOL 4 - DIA 3.2)
N108 (TOOL 3 - DIA 7.2)
N110 (TOOL 1 - DIA 6.)
N1 G90 G17 G40 G80 G00
N112 M06 T4 ()
N114 (D-drill-1)
N116 G00 G54 G90 X0. Y-0.129 S3500 M03
N118 G43 H4 Z120.
N120 Z50.
N122 G98 G81 X0. Y-0.129 Z-0.5 R10. F300.
N124 G80
N126 M05
N128 M01
N2 G90 G17 G40 G80 G00

```

Рис 2.9 Фрагмент керуючої програми

Керуюча програма формується у вигляді текстового файлу, який може бути змінений в разі необхідності самим технологом-програмістом в будь-якому текстовому редакторі. В нашому випадку, вносити будь-які зміни в виконуваний файл не потрібно, оскільки всі необхідні параметри були попередньо введені при проектуванні в системі SolidCam.

Подальшим кроком є збереження керуючої програми та її передача на оброблюючий центр для відпрацювання.

2.3 Методика розробки плану вимірювання в системі ZEISS Calypso

ZEISS Calypso - універсальне програмне забезпечення для вимірювання геометричних форм розроблене фірмою CARL ZEISS IMT GMBH (Німеччина).

Система Calypso була розроблена, щоб полегшити роботу з вимірюванням при роботі на координатно-вимірювальній машині. Для цього CALYPSO використовує весь перелік найновітніх технологій компанії Carl Zeiss - лідера в галузі метрології.

Calypso автоматично розпізнає геометричні форми і генерує шляхи та стратегії вимірювання.

Calypso дозволяє вирішувати наступні задачі з використанням лише одного програмного забезпечення: вимірювання окремих точок або їх сканування, ручний режим або режим ЧПК, безпосереднє вимірювання або режим офлайн, тактичні або оптичні вимірювання, правильні геометричні фігури або просторово складні поверхні.

2.3.1 Створення плану вимірювання в системі ZEISS Calypso

Першим кроком при проектуванні є створення нового плану вимірювань в системі ZEISS Calypso (рис 2.10).

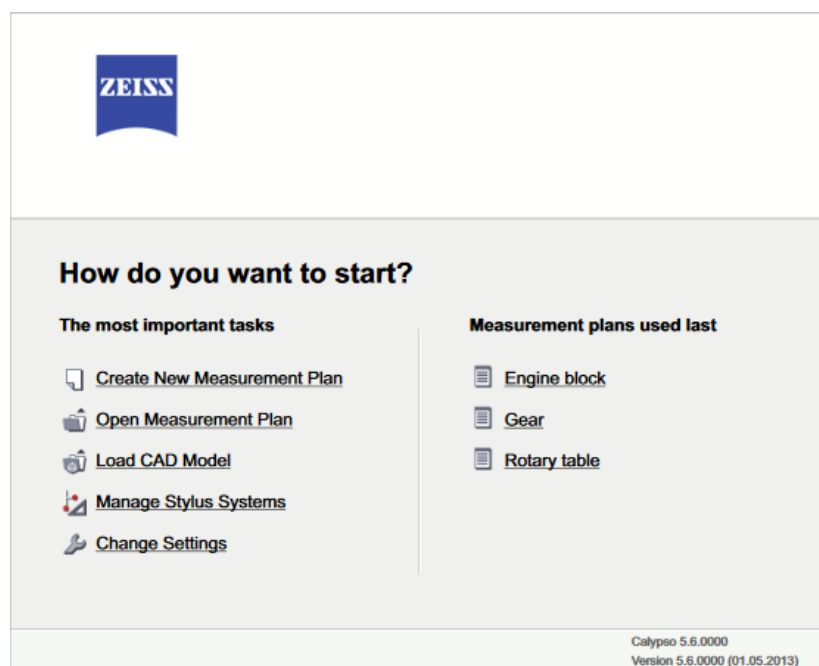


Рис 2.10 Головне вікно системи ZEISS Calypso

Наступним кроком є імпорт в систему попередньо створеної 3D-моделі деталі, що буде підлягати обміру. Після чого необхідно повернути систему координат моделі згідно з реальним її базуванням на столі координатно-вимірювальної машини.

Далі відбувається вибір всіх необхідних поверхонь. Сюди входять поверхні, що підлягають обміру, а також базові поверхні, відносно яких система ZEISS Calypso буде отримувати дані про просторове положення реальної деталі та буде проводити теоретичне вирівнювання реальної деталі (рис 2.11). Це необхідно для того, щоб уникнути похибки базування

– система ZEISS Calypso на основі поступаючих від координатно-виміральної машини даних мінімізує цю похибку та значно спрощує процес установки деталі на стіл координатно-виміральної машини. Також за рахунок вирівнювання значно підвищується точність отриманих результатів.

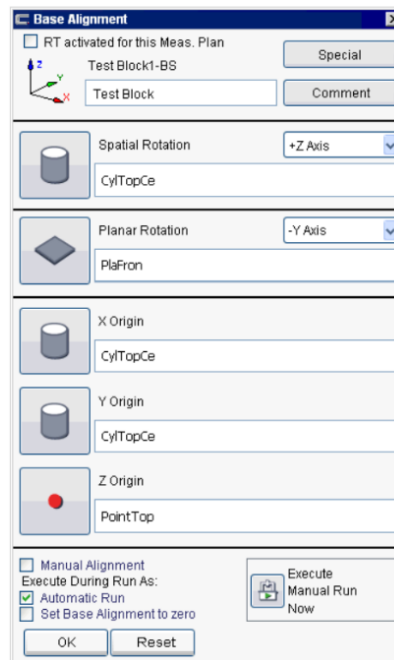


Рис 2.11 Задання базових поверхонь при вимірюванні

Далі необхідним є задання площин безпеки. Це є необхідним в разі проведення вимірювання деталей, що закріплюються в пристосуванні, або лещатах. Оскільки вимірвальний щуп може зіштовхнутися з пристосуванням, що приведе до виходу його з ладу. Також задання площин безпеки проводиться для мінімізації відстаней відходу вимірвального щупа від деталі, що зменшить час процесу вимірювання.

Після проведення всіх підготувальних операцій можна переходити до проектування траєкторій руху вимірвального щупа. Кожна поверхня проектується індивідуально. При проектуванні враховуються такі параметри як шорсткість поверхні, нахил поверхні відносно базової осі, довжина вимірвального щупа, швидкість вимірювання, крок з яким вимірвальний щуп знімає результат.

Для отримання максимально точних результатів необхідним є проведення вимірювання поверхні такими траєкторіями, що будуть охоплювати максимальну площу поверхні, також необхідно проводити вимірювання на низьких швидкостях з малим кроком зняття результатів, таким чином отримуючи максимально точний результат.

Далі необхідно вказати, які саме результати нам необхідно отримати. Система ZEISS Calypso має в своєму складі велику різноманітність характеристик, що можуть бути виведені в якості результату, серед них: значення лінійних розмірів, внутрішні та зовнішні діаметри, нахили поверхонь, перпендикулярність, паралельність, округлість, площинність, циліндричність, співвісність, концентричність, виведення значень координат по кожній з осей, створення симетрій та перетинів між площинами та ін.

Наступним кроком є встановлення та закріплення деталі на стіл координатно-вимірювальної машини та запуск плану вимірювань.

При першому запуску нового плану вимірювань система ZEISS Calypso попросить провести ручне задання нулів деталі та вказання всіх базових поверхонь. При проведенні повторних вимірювань система буде запускатися в режимі ЧПК – повністю автоматизоване проведення вимірювань.

Результатом вимірювання є протокол, на якому відображено всі характеристики, їх реальні та номінальні значення, допуски, відхилення від допусків, а також загальна інформація про вимірювання (рис 2.12).

ZEISS Calypso					
Measurement Plan		Date			
Drawing No. * drawingno *		Time 5:30:21 pm		Order	
Operator Master		CMM C32Bit		Incremental Part Number	
	Actual	Nominal	Upper Tol.	Lower Tol.	Deviation
	Angle between Features1 79°58' 2"	80° 0' 0"	0°10' 0"	-0°10' 0"	-0° 1'58"
	Angle between Features2 89°13'41"	89°10'44"	0°10' 0"	-0°10' 0"	0° 2'57"
	Angle between Features3 135°23'25"	135°23'25"	0°10' 0"	-0°10' 0"	0° 0' 0"
	Angle between Features4 135°25'16"	135°23'25"	0°10' 0"	-0°10' 0"	0° 1'51"
	Angle between Features5 19° 9'47"	19° 0' 0"	0°10' 0"	-0°10' 0"	0° 9'47"
	Angle between Features6 21°23'13"	21°38' 2"	0°10' 0"	-0°10' 0"	-0° 4'49" -0°14'49"
	Angle between Features7 49°18'24"	49°21'58"	0°10' 0"	-0°10' 0"	-0° 3'33"
	Flatness1 0.0036	0.0000	0.0100		0.0036
	Flatness2 0.0033	0.0000	0.0100		0.0033
	Flatness3 0.0071	0.0000	0.0100		0.0071

Рис 2.12 Приклад протоколу системи ZEISS Calypso

Висновки до розділу

1. Розглянуто методику теоретичних досліджень обробки поверхонь складного профілю. Наведено особливості різних видів траєкторій руху інструменту, наведено їх переваги та недоліки.
2. Надано методичні вказівки розробки керуючих програм в системі SolidCAM.
3. Надано методику проектування плану вимірювань в системі ZEISS Calypso.

3. Експериментальні дослідження точності механічної обробки поверхонь складного профілю

Обробка фрезеруванням є одним з найпоширеніших методів формоутворення поверхонь деталей, як на попередніх, так і на остаточних операціях їх виготовлення.

Тому технологічне забезпечення параметрів точності оброблюваних поверхонь при фрезеруванні є досить важливим завданням.

Мета експериментальних досліджень - вивчення впливу технологічних параметрів, на точність поверхні, одержуваної після фрезерної обробки. До технологічних параметрів, що впливають на точність поверхні, відносяться: геометрична форма інструменту, величина кроку зміщення інструменту між проходами при обробці різанням, стратегії обробки, подача інструменту, швидкість різання, а також геометричні параметри оброблюваної поверхні. Підходи, пов'язані із забезпеченням точності розглянуті в першому розділі.

3.1 Оброблюючий центр з ЧПК DOOSAN DNM 4500

З першого розділу отримуємо висновок, що основним завданням для підвищення ефективності та точності процесу обробки поверхонь складного профілю фрезерним інструментом є вивчення взаємозв'язків між технологічними параметрами і точністю обробленої поверхні за рахунок визначення оптимальної стратегії обробки на верстатах з числовим програмним керуванням.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався вертикально-фрезерний оброблюючий центр з ЧПК DOOSAN DNM 4500 з системою управління Fanuc. Загальний вигляд технологічного обладнання представлений на рисунку 3.1.



Рис. 3.1. Оброблюючий центр з ЧПК DOOSAN DNM 4500

Оброблюючий центр DOOSAN DNM 4500 є покращеною версією всесвітньо відомої серії обладнання DNM і призначений для механічної обробки деталей з високою точністю і продуктивністю.

Наявність системи компенсації температурної деформації, роликів з мастилом і швидкого пристрою автоматичної зміни інструменту забезпечують високу продуктивність і надійність процесу обробки.

Технічні характеристики оброблюючого центра представлені в таблиці 3.1.

Табл.3.1 Технічні характеристики DOOSAN DNM 4500

Макс. мереміщення по осі X, мм	800
Макс. мереміщення по осі Y, мм	450
Макс. мереміщення по осі Z, мм	510
Довжина столу, мм	1000
Ширина столу, мм	450
Макс. навантаження на стіл, кг	800
Розмір конусу шпинделя	40
Макс. частота обертів, об/хв	12000
Макс. потужність шпинделя, кВт	18.5
Макс. крутний момент, Нм	117
Макс. осьове зусилля, кН	11,7
Макс. шв. холостої подачі, м/хв	30-36
Макс. шв. робочої подачі, м/хв	12
Кількість позицій інструменту, шт	30
Макс. діаметр інструменту, мм	125
Макс. маса інструменту, кг	5.4
Час зміни інструменту, с	2.2
Точність позиціонування, мм	0.005
Повторюваність, мм	0.0025
Маса, кг	5000

3.2 Координатно-вимірювальна машина ZEISS DuraMax

ZEISS DuraMax - це координатно-вимірювальна машина від компанії Carl Zeiss, яка забезпечує впровадження технологій вимірювання на малих і середніх підприємствах.

DuraMax замінює чинне цехове вимірювальне обладнання. З її точністю, надійністю і тривалими інтервалами між сервісним обслуговуванням DuraMax швидко окупає себе в виробництві.

DuraMax добре підходить для контролю виробничого процесу безпосередньо в цеху, для швидкого контролю між операціями для малогабаритних деталей, а також для контролю об'ємних партій в процесі виробництва. DuraMax замінює таке традиційне вимірювальне обладнання, як вертикальний довгомір (висотомір), калібр кільцевого типу (кільцева міра), калібр типу скоба для зовнішніх діаметрів, калібр-пробка для внутрішніх діаметрів, контурно-вимірювальну машину (профілометр), цехове вимірювальне оснащення і ручні вимірювальні машини.

Зазвичай при модифікації устаткування, що випускається, яке необхідно контролювати по геометричним параметрам, стандартна процедура контролю вимагає нової і дорогої метрологічної каліброваної оснастки. DuraMax якраз і є тим всебічним засобом вимірювання з ЧПК, спільно з CAD-орієнтованим вимірювальним програмним забезпеченням CALYPSO, яке швидко, легко і з хорошою відтворюваністю виміряє всі зміни і модифікації.

DuraMax - це показник зносостійкості, довговічності, витривалості і запасу міцності - витримує і протистоїть жорстким умовам зовнішнього середовища і демонструє власну високу робочу стабільність в широкому температурному діапазоні. У межах від +18°C до +30°C.

Загальний вигляд координатно-вимірювальної машини ZEISS DuraMax представлено на рисунку 3.2.



Рис.3.2 Координатно-вимірювальна машина ZEISS DuraMax

Технічні характеристики координатно-вимірювальної машини ZEISS DuraMax представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Технічні характеристики ZEISS DuraMax

Режими вимірювання	ручний / автоматичний
Швидкість переміщення щупа	до 300 мм/с
Похибка вимірювання по довжині	2.4+L/300 мкм (18°C-22°C) 2.7+L/250 мкм (18°C-26°C) 2.9+L/200 мкм (18°C-30°C)
Повторюваність вимірів	до 1.7 мкм
Похибка вимірювання форми	до 2.4 мкм
Похибка вимірювання просторового положення	до 1.2 мкм
Робоча зона	500 x 500 x 500 мм
Максимальна навантаження на стіл	100 кг
Стандарт системи управління якістю	ISO 9001:2015
Стандарт системи управління навколишнім середовищем	ISO 14001:2015
Акредитація	ISO/IEC 17025:2005

3.3 Вимірювальна головка ZEISS VAST XXT

Точність вимірювальної координатно-вимірювальної машини визначається в основному тим, чим було проведено вимірювання – тобто вимірювальною головкою. Тільки в поєднанні з ефективною системою щупів можна виміряти деталі точно, швидко та ефективно.

Загальний вигляд вимірювальної головки ZEISS VAST XXT в зборі з вимірювальним щупом представлено на рисунку 3.3.



Рис.3.3 Вимірювальна головка ZEISS VAST XXT в зборі з вимірювальним щупом

Вибір вимірювального щупа є важливою частиною якісних вимірювань. Менший діаметр вимірювального щупа надасть більш точний результат вимірювань. Довжина ніжки вимірювального щупа зменшить вірогідність похибок, що можуть виникнути при вимірюванні, які можуть бути викликані наступними факторами: погана шорсткість поверхні, велика розбіжність між номінальними та реальними розмірами деталі тощо.

Вимірювальний щуп представляє собою сферу, що може бути виготовлена з різних матеріалів, залежно від матеріалу, що підлягає

виміру, та ніжки, що виготовлена з карбону . Для проведення вимірювань обрано вимірювальний щуп з рубіновою сферою та довжиною ніжки 20 мм.

Загальний вигляд вимірювального щупа предствалено на рисунку 3.4.



Рис 3.4. Вимірювальний щуп ZEISS

3.4 Дослідження впливу траєкторій руху інструменту на точність механічної обробки поверхонь складного профілю

В даному розділі проведемо підготовку до проведення експериментів з метою дослідження впливу траєкторій руху інструменту на точність механічної обробки поверхонь складного профілю.

Для проведення експериментів необхідно розрахувати режими обробки, а саме: назначити швидкість різання, обрати величину подачі, розрахувати кількість обертів шпинделя.

Необхідно також вибрати критерії, за якими буде відбуватися проведення аналізу результатів обробки складнопрофільних поверхонь різними траєкторіями.

Поверхні, що підлягають аналізу, представлені на рисунку 3.5.

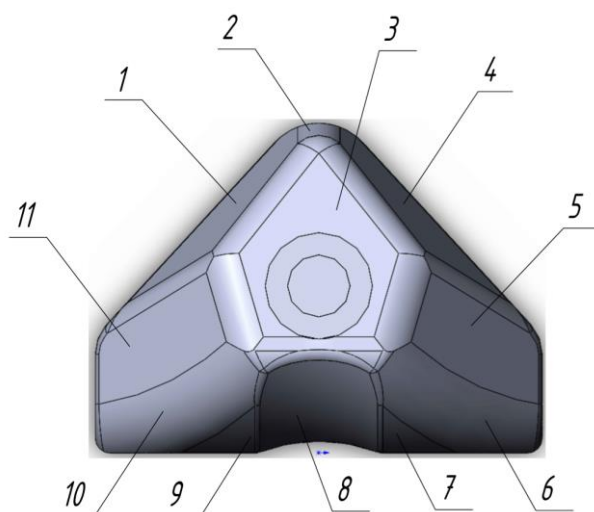


Рис.3.5 Поверхні, що підлягають аналізу

Аналіз точності будемо проводити за характеристиками, що неведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Характеристики для аналізу

№	Характеристика	Номінальне значення
1	Кут між поверхнею 11 та поверхнею 5	80°0'0''
2	Кут між поверхнею 1 та поверхнею 4	89°10'44''
3	Кут між поверхнею 1 та поверхнею 11	135°23'25''
4	Кут між поверхнею 4 та поверхнею 5	135°23'25''
5	Кут між поверхнею 3 та нормаллю осі Z	19°0'0''
6	Кут між поверхнею 2 та поверхнею 3	21°38'2''
7	Площинність поверхні 5	0 мм
8	Площинність поверхні 11	0 мм
9	Площинність поверхні 4	0 мм
10	Площинність поверхні 1	0 мм
11	Площинність поверхні 3	0 мм
12	Радіус поверхні 9	25 мм
13	Радіус поверхні 7	25 мм
14	Радіус поверхні 2	2 мм
15	Відхилення форми поверхні 8	0 мм
16	Відхилення форми поверхні 10	0 мм
17	Значення шорсткості поверхні 8	Ra 2.5
18	Значення шорсткості поверхні 3	Ra 2.5
19	Час обробки	n хв m сек

Аналіз результатів будемо проводити за реальними значеннями характеристик, попередньо розбивши їх на групи, що представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 Групи характеристик для аналізу

Група	Характеристика
I	Сума модулів відхилень кутів
II	Сума значень відхилень площинності
III	Сума значень відхилень радіусів
IV	Сума значень відхилень форми
V	Середнє значення шорсткості
VI	Час обробки

3.4.1 Дослідження впливу лінійної траєкторії на точність механічної обробки поверхонь складного профілю

З метою отримання залежностей точності механічної обробки від лінійної траєкторії руху інструменту було проведено експеримент.

Експеримент виконувався на зразках, що виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т. Чорновий перехід виконувався трьохзубою кінцевою фрезою з швидкоріжучого сплаву діаметром $D = 6$ мм, подача $F = 1200$ мм/хв (0.2 мм/об), частота обертання шпинделя $S = 6000$ об/хв (швидкість різання $V = 110$ м/хв), крок по осі z $IZ = 0.7$ мм, припуск на стінки $Z = 0.1$ мм.

Чистовий перехід виконувався радіусною двухзубою твердосплавною фрезою діаметром $D = 4$ мм з радіусом $R = 2$ мм, подача $F = 1035$ мм/хв (0.1 мм/об), частота обертання шпинделя $S = 10350$ об/хв (швидкість різання $V = 130$ м/хв), крок по осі z $IZ = 0.1$ мм.

Загальний вигляд лінійної траєкторії обробки зображено на рисунку 3.6.

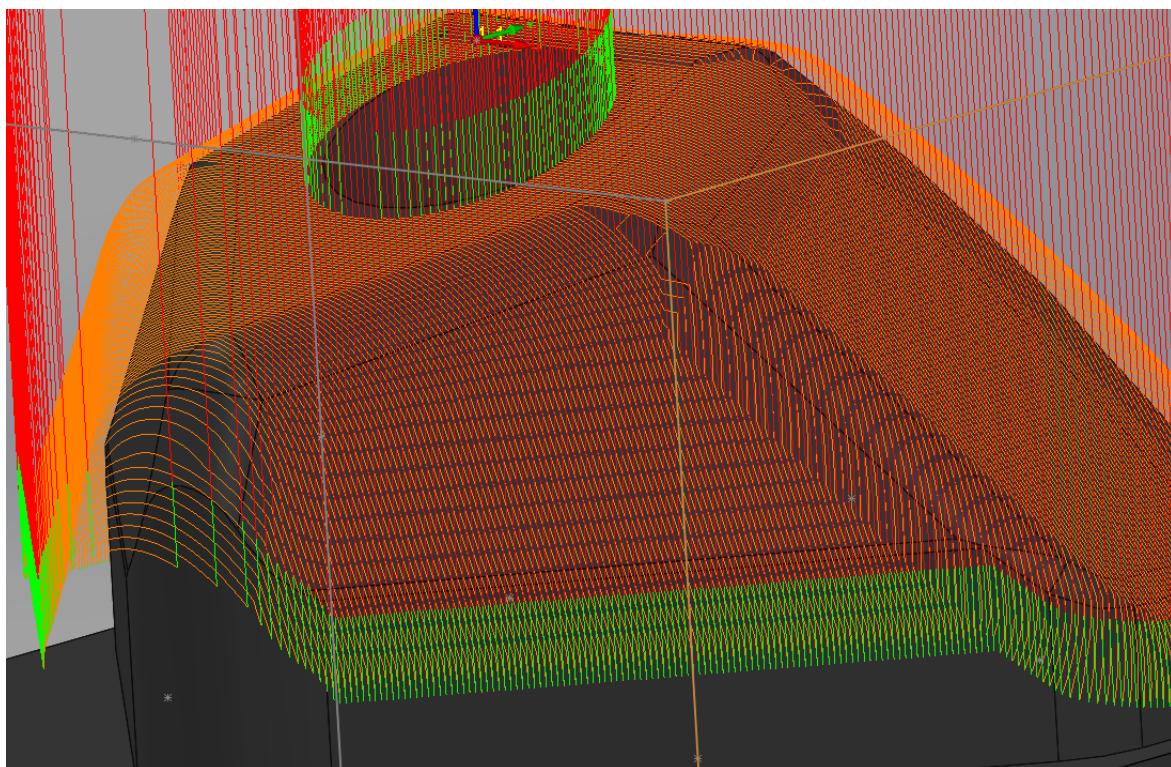


Рис.3.6 Загальний вигляд лінійної траєкторії обробки

В результаті проведення експерименту були отримані наступні значення заданих вище параметрів точності, що задані в таблиці 3.5 (величина реального значення характеристики приведена як середнє значення за результатами вимірювання 20 зразків по 3 вимірювання на кожний зразок).

Зображення шорсткості поверхні після обробки зразка методом лінійних траєкторій зображено на рисунку 3.7.

Таблиця 3.5 Результати вимірювання зразка після обробки лінійною траєкторією

№ характ.	Номинальне значення	Траєкторія - Лінійна	
		Реальне значення	Відхилення від ном.
1	80°0'0''	79°59'2''	-0°0'58''
2	89°10'44''	89°12'41''	0°1'57''
3	135°23'25''	135°24'32''	0°1'7''
4	135°23'25''	135°24'16''	0°0'51''
5	19°0'0''	19°0'47''	0°0'47''
6	21°38'2''	21°33'13''	-0°4'49''
7	0 мм	0,0041 мм	0,0041 мм
8	0 мм	0,0020 мм	0,0020 мм
9	0 мм	0,0030 мм	0,0030 мм
10	0 мм	0,0056 мм	0,0056 мм
11	0 мм	0,0011 мм	0,0011 мм
12	25 мм	25,0110 мм	0,0110 мм
13	25 мм	25,0108 мм	0,0108 мм
14	2 мм	2,0066 мм	0.0066 мм
15	0 мм	0,0057 мм	0,0057 мм
16	0 мм	0,0078 мм	0,0078 мм
17	Ra 2.5	Ra 0.929	-
18	Ra 2.5	Ra 0.891	-
19	п хв т сек	12 хв 17 сек	-

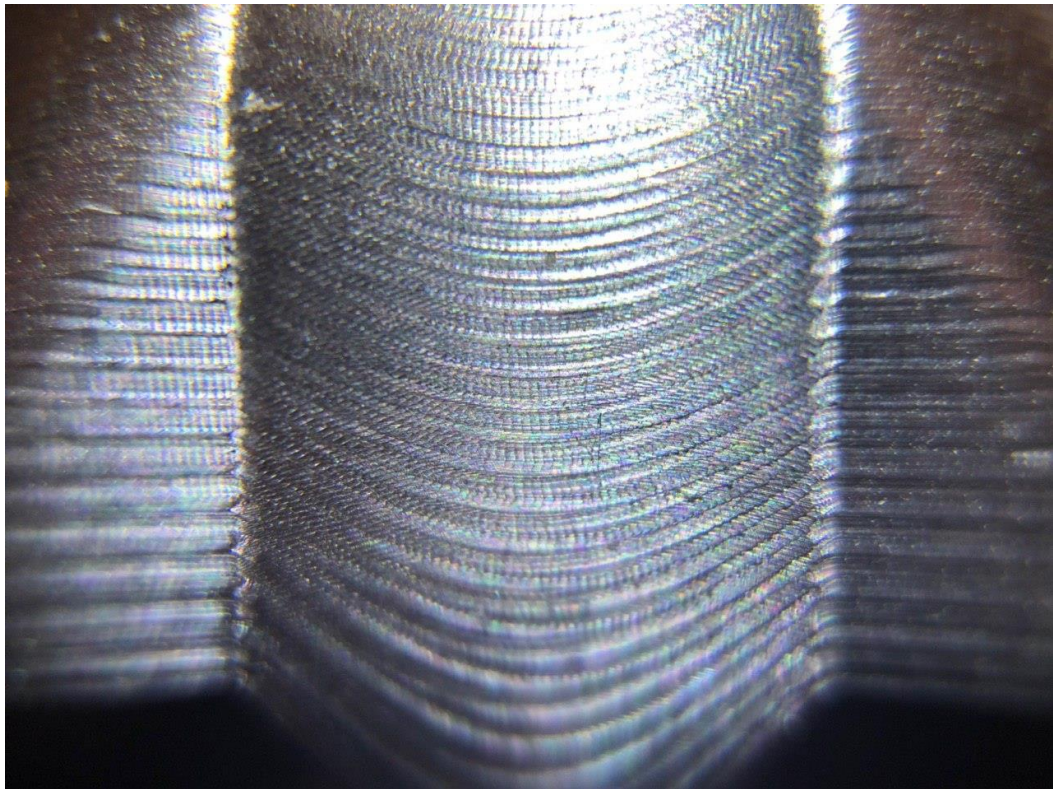


Рис.3.7 Шорсткість поверхні після обробки методом лінійних траєкторій

Проведемо аналіз результатів по групах (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 Аналіз результатів вимірювання зразка по групах після обробки за лінійними траєкторіями

Група	Значення	Результат
I	$R1 = 0'58'' + 1'57'' + 1'7'' + 0'51'' + 0'47'' + 4'49''$	$R1 = 10'29''$
II	$R2 = 0.0041 + 0.0020 + 0.0030 + 0.0056 + 0.0011$	$R2 = 0.0158 \text{ мм}$
III	$R3 = 0.0110 + 0.0108 + 0.0066$	$R3 = 0.0284 \text{ мм}$
IV	$R4 = 0.0057 + 0.0078$	$R4 = 0.0135 \text{ мм}$
V	$R5 = (0.929 + 0.891) / 2$	$R5 = 0.91$
VI	$R6 = 12 \text{ хв } 17 \text{ сек}$	$R6 = 12 \text{ хв } 17 \text{ сек}$

3.4.2 Дослідження впливу спіральної траєкторії на точність механічної обробки поверхонь складного профілю

З метою отримання залежностей точності механічної обробки від спіральної траєкторії руху інструменту було проведено експеримент.

Експеримент виконувався на зразках, що виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т. Чорновий перехід виконувався трьохзубою кінцевою фрезою з швидкоріжучого сплаву діаметром $D = 6$ мм, подача $F = 1275$ мм/хв, частота обертання шпинделя $S = 6000$ об/хв (швидкість різання $V = 110$ м/хв), крок по осі z $I_Z = 0.7$ мм, припуск на стінки $Z = 0.1$ мм.

Чистовий перехід виконувався радіусною двухзубою твердосплавною фрезою діаметром $D = 4$ мм з радіусом $R = 2$ мм, подача $F = 1035$ мм/хв (0.1 мм/об), частота обертання шпинделя $S = 10350$ об/хв (швидкість різання $V = 130$ м/хв), крок по осі z $I_Z = 0.1$ мм.

Загальний вигляд спіральної траєкторії обробки зображено на рисунку 3.8.

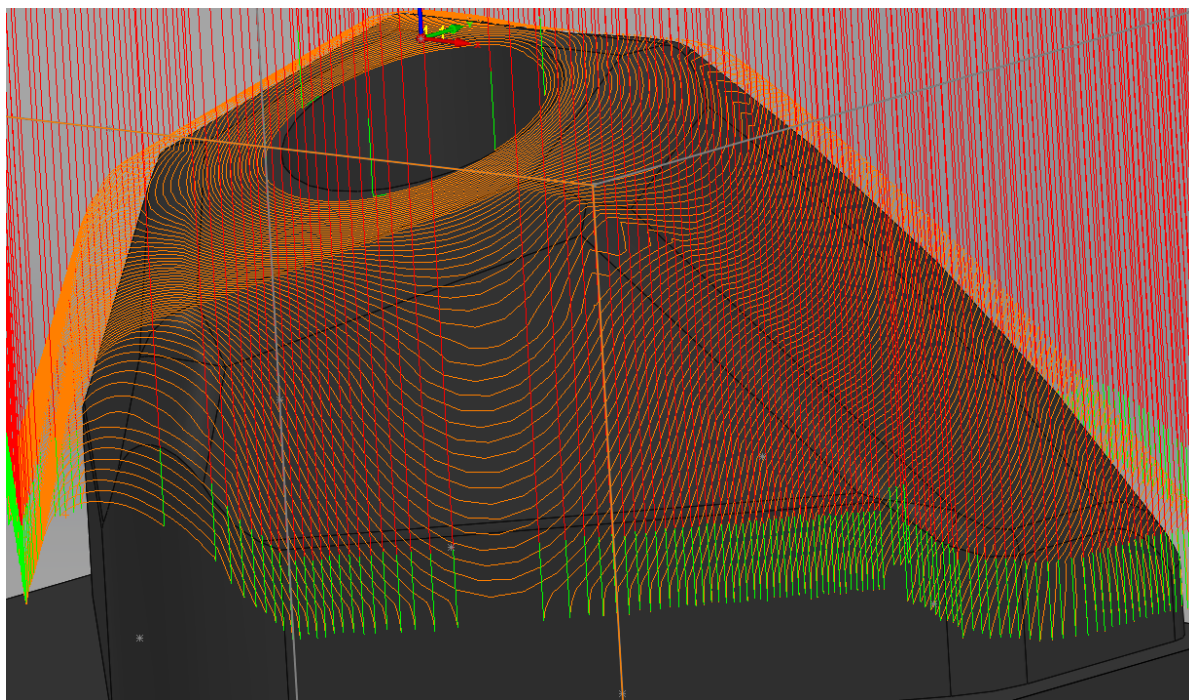


Рис.3.8 Загальний вигляд спіральної траєкторії обробки

В результаті проведення експерименту були отримані наступні значення заданих вище параметрів точності, що задані в таблиці 3.7 (величина реального значення характеристики приведена як середнє значення за результатами вимірювання 20 зразків по 3 вимірювання на кожний зразок).

Таблиця 3.7 Результати вимірювання зразка після обробки спіральною траєкторією

№ характ.	Номінальне значення	Траєкторія - Спіральна	
		Реальне значення	Відхилення від ном.
1	80°0'0''	79°58'31''	-0°1'29''
2	89°10'44''	89°12'17''	0°1'33''
3	135°23'25''	135°19'56''	-0°3'29''
4	135°23'25''	135°24'38''	0°1'12''
5	19°0'0''	19°7'3''	0°7'3''
6	21°38'2''	21°19'39''	-0°8'23''
7	0 мм	0,0038 мм	0,0038 мм
8	0 мм	0,0050 мм	0,0032 мм
9	0 мм	0,0095 мм	0,0095 мм
10	0 мм	0,0074 мм	0,0074 мм
11	0 мм	0,0039 мм	0,0039 мм
12	25 мм	25,0156 мм	0,0156
13	25 мм	25,0149 мм	0,0149
14	2 мм	2,0066 мм	0.0066 мм
15	0 мм	0,0054 мм	0,0054 мм
16	0 мм	0,0102 мм	0,0102 мм
17	Ra 2.5	Ra 0.846	-
18	Ra 2.5	Ra 0.825	-
19	п хв т сек	11 хв 12 сек	-

Зображення шорсткості поверхні після обробки зразка методом спіральних траєкторій зображено на рисунку 3.9.

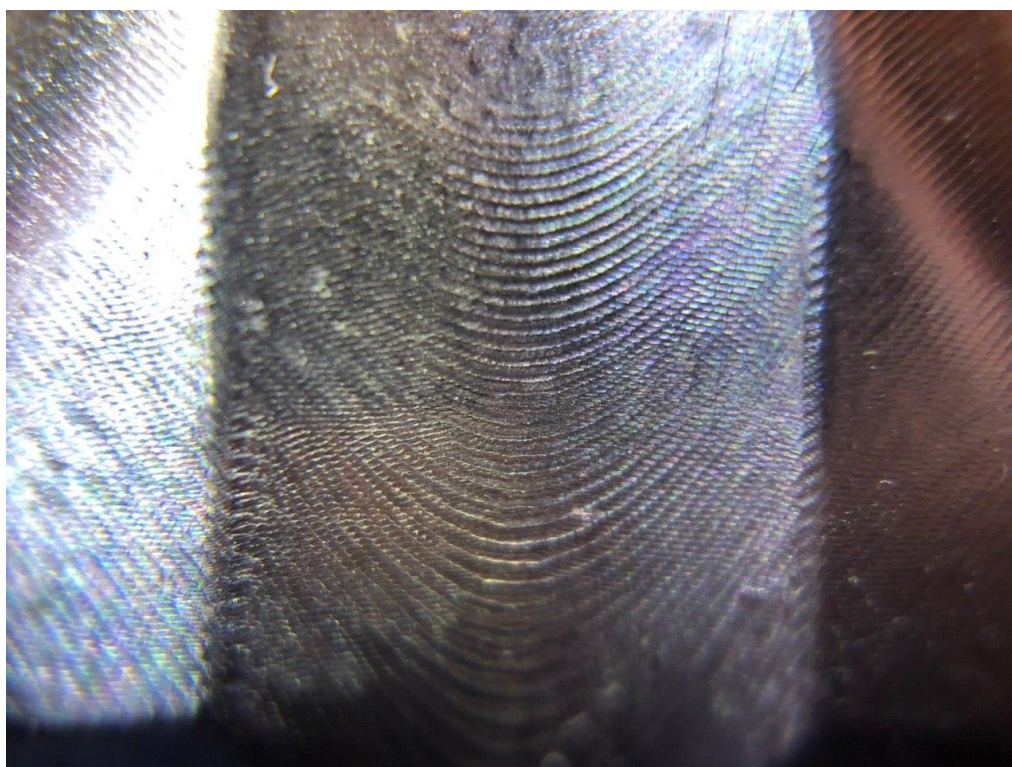


Рис 3.9 Шорсткість поверхні після обробки методом спіральних траєкторій

Проведемо аналіз результатів по групах (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 Аналіз результатів вимірювання зразка по групах після обробки за спіральними траєкторіями

Група	Значення	Результат
I	$R1 = 1'29'' + 1'33'' + 3'29'' + 1'12'' + 7'3'' + 8'23''$	$R1 = 23'9''$
II	$R2 = 0.0038 + 0.0050 + 0.0095 + 0.0074 + 0.0039$	$R2 = 0.0296 \text{ мм}$
III	$R3 = 0.0156 + 0.0149 + 0.0066$	$R3 = 0,0371 \text{ мм}$
IV	$R4 = 0.0054 + 0.0102$	$R4 = 0.0156 \text{ мм}$
V	$R5 = (0.846 + 0.825) / 2$	$R5 = 0.835$
VI	$R6 = 11 \text{ хв } 12 \text{ сек}$	$R6 = 11 \text{ хв } 12 \text{ сек}$

3.4.3 Дослідження впливу растрової траєкторії на точність механічної обробки поверхонь складного профілю

З метою отримання залежностей точності механічної обробки від растрової траєкторії руху інструменту було проведено експеримент.

Експеримент виконувався на зразках, що виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т. Чорновий перехід виконувався трьохзубою кінцевою фрезою з швидкоріжучого сплаву діаметром $D = 6$ мм, подача $F = 1275$ мм/хв, частота обертання шпинделя $S = 6000$ об/хв (швидкість різання $V = 110$ м/хв), крок по осі z $I_Z = 0.7$ мм, припуск на стінки $Z = 0.1$ мм.

Чистовий перехід виконувався радіусною двухзубою твердосплавною фрезою діаметром $D = 4$ мм з радіусом $R = 2$ мм, подача $F = 1035$ мм/хв (0.1 мм/об), частота обертання шпинделя $S = 10350$ об/хв (швидкість різання $V = 130$ м/хв), крок по осі z $I_Z = 0.1$ мм.

Загальний вигляд растрової траєкторії обробки зображено на рисунку 3.10.

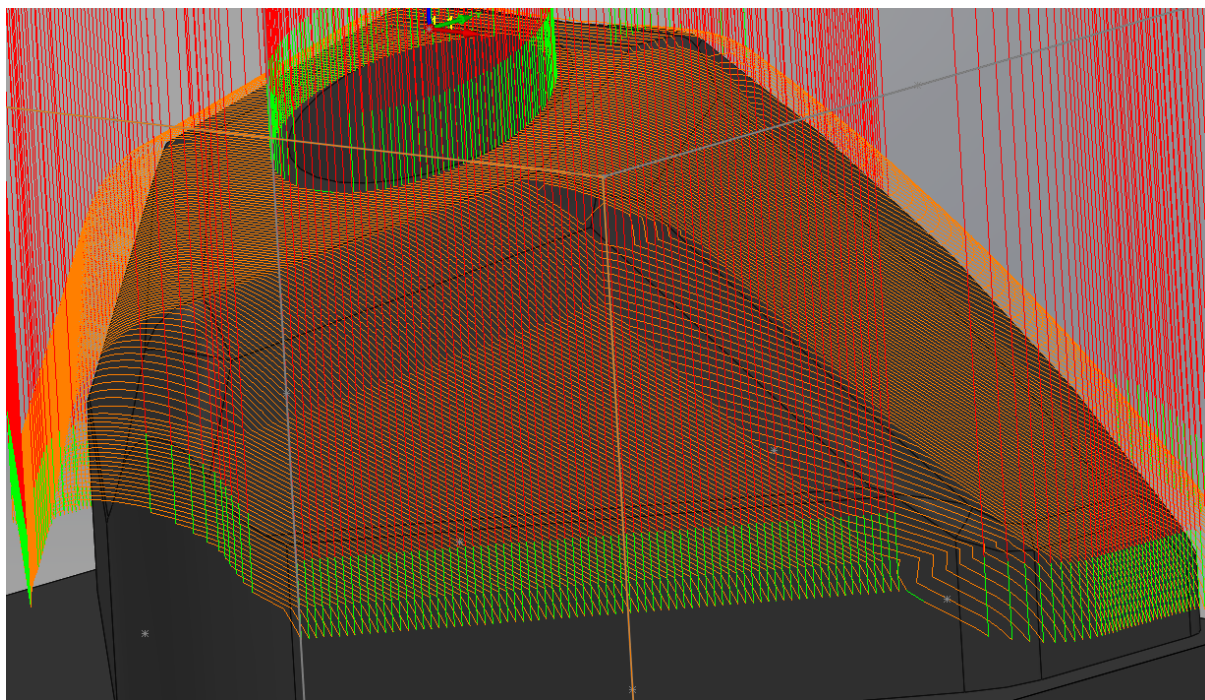


Рис.3.10 Загальний вигляд растрової траєкторії обробки

В результаті проведення експерименту були отримані наступні значення заданих вище параметрів точності, що задані в таблиці 3.9 (величина реального значення характеристики приведена як середнє значення за результатами вимірювання 20 зразків по 3 вимірювання на кожний зразок).

Таблиця 3.9 Результати вимірювання зразка після обробки растровою траєкторією

№ характ.	Номінальне значення	Траєкторія - Растрова	
		Реальне значення	Відхилення від ном.
1	80°0'0''	79°58'47''	-0°1'13''
2	89°10'44''	89°11'36''	0°0'52''
3	135°23'25''	135°24'58''	0°1'33''
4	135°23'25''	135°24'46''	0°1'21''
5	19°0'0''	19°3'15''	0°3'15''
6	21°38'2''	21°32'6''	-0°5'56''
7	0 мм	0,0044 мм	0,0044 мм
8	0 мм	0,0055 мм	0,0055 мм
9	0 мм	0,0030 мм	0,0030 мм
10	0 мм	0,0081 мм	0,0081 мм
11	0 мм	0,0035 мм	0,0035 мм
12	25 мм	25,0234 мм	0,0234
13	25 мм	24,0230 мм	0,0230
14	2 мм	2,0106 мм	0.0106 мм
15	0 мм	0,0054 мм	0,0054 мм
16	0 мм	0,0099 мм	0,0099 мм
17	Ra 2.5	Ra 0.916	-
18	Ra 2.5	Ra 0.617	-
19	п хв т сек	13 хв 25 сек	-

Зображення шорсткості поверхні після обробки зразка методом растрових траєкторій зображено на рисунку 3.11.

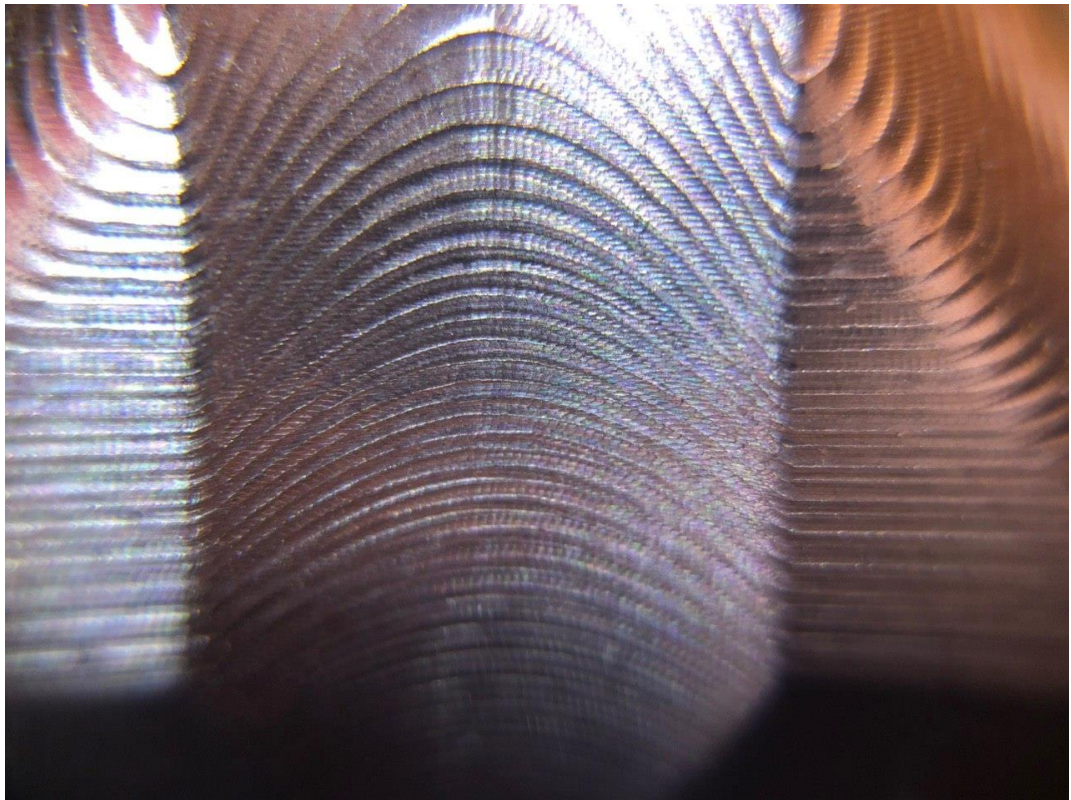


Рис 3.11 Шорсткість поверхні після обробки методом растрових траєкторій

Проведемо аналіз результатів по групам (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 Аналіз результатів вимірювання зразка по групах після обробки за растровими траєкторіями

Група	Значення	Результат
I	$R1 = 1'13'' + 0'52'' + 1'33'' + 1'21'' + 3'15'' + 5'56''$	$R1 = 14'10''$
II	$R2 = 0.0044 + 0.0055 + 0.0030 + 0.0081 + 0.0035$	$R2 = 0.0245 \text{ мм}$
III	$R3 = 0.0234 + 0.0230 + 0.0106$	$R3 = 0.057 \text{ мм}$
IV	$R4 = 0.0054 + 0.0099$	$R4 = 0.0153 \text{ мм}$
V	$R5 = (0.916 + 0.617) / 2$	$R5 = 0.766$
VI	$R6 = 13 \text{ хв } 25 \text{ сек}$	$R6 = 13 \text{ хв } 25 \text{ сек}$

3.4.4 Дослідження впливу траєкторії по ватерлініям на точність механічної обробки поверхонь складного профілю

З метою отримання залежностей точності механічної обробки від траєкторії руху інструменту по ватерлініям було проведено експеримент.

Експеримент виконувався на зразках, що виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т. Чорновий перехід виконувався трьохзубою кінцевою фрезою з швидкоріжучого сплаву діаметром $D = 6$ мм, подача $F = 1275$ мм/хв, частота обертання шпинделя $S = 6000$ об/хв (швидкість різання $V = 110$ м/хв), крок по осі z $I_Z = 0.7$ мм, припуск на стінки $Z = 0.1$ мм.

Чистовий перехід виконувався радіусною двухзубою твердосплавною фрезою діаметром $D = 4$ мм з радіусом $R = 2$ мм, подача $F = 1035$ мм/хв (0.1 мм/об), частота обертання шпинделя $S = 10350$ об/хв (швидкість різання $V = 130$ м/хв), крок по осі z $I_Z = 0.1$ мм.

Загальний вигляд траєкторії обробки по ватерлініям зображено на рисунку 3.12.

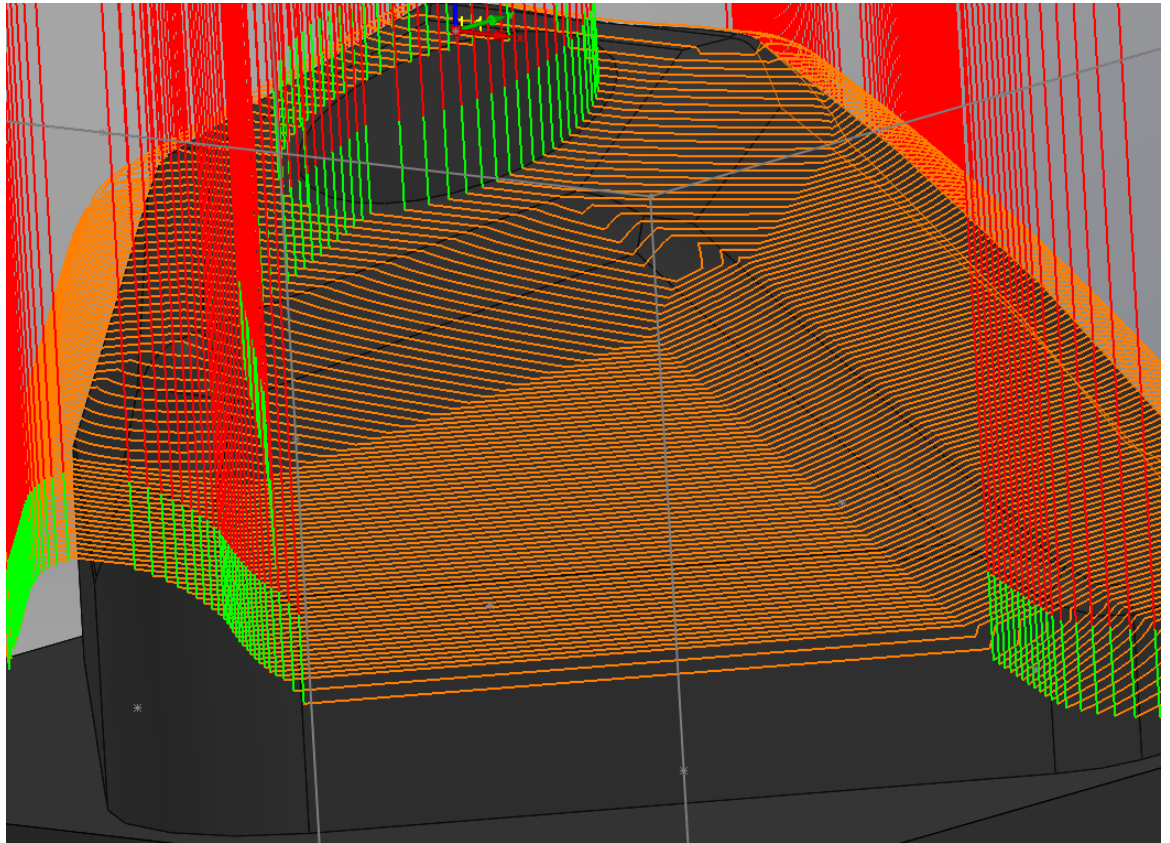


Рис.3.12 Траєкторія обробки по ватерлініям

В результаті проведення експерименту були отримані наступні значення заданих вище параметрів точності, що представлені в таблиці 3.11 (величина реального значення характеристики приведена як середнє

значення за результатами вимірювання 20 зразків по 3 вимірювання на кожний зразок).

Таблиця 3.11 Результати вимірювання зразка після обробки траєкторією по ватерлініям

№ характ.	Номінальне значення	Траєкторія - Ватерлінії	
		Реальне значення	Відхилення від ном.
1	80°0'0''	79°59'8''	-0°0'52''
2	89°10'44''	89°11'25''	0°0'40''
3	135°23'25''	135°23'59''	0°0'34''
4	135°23'25''	135°24'8''	0°0'42''
5	19°0'0''	19°0'53''	0°0'53''
6	21°38'2''	21°37'57''	-0°0'5''
7	0 мм	0,0021 мм	0,0021 мм
8	0 мм	0,0015 мм	0,0015 мм
9	0 мм	0,0033 мм	0,0033 мм
10	0 мм	0,0039 мм	0,0039 мм
11	0 мм	0,0010 мм	0,0010 мм
12	25 мм	25,0102 мм	0,0102 мм
13	25 мм	25,0110 мм	0,0110 мм
14	2 мм	2,0030 мм	0.0030 мм
15	0 мм	0,0036 мм	0,0036 мм
16	0 мм	0,0026 мм	0,0026 мм
17	Ra 2.5	Ra 0.542	-
18	Ra 2.5	Ra 0.963	-
19	n хв m сек	10 хв 33 сек	-

Зображення шорсткості поверхні після обробки зразка методом траєкторій по ватерлініям зображено на рисунку 3.13.

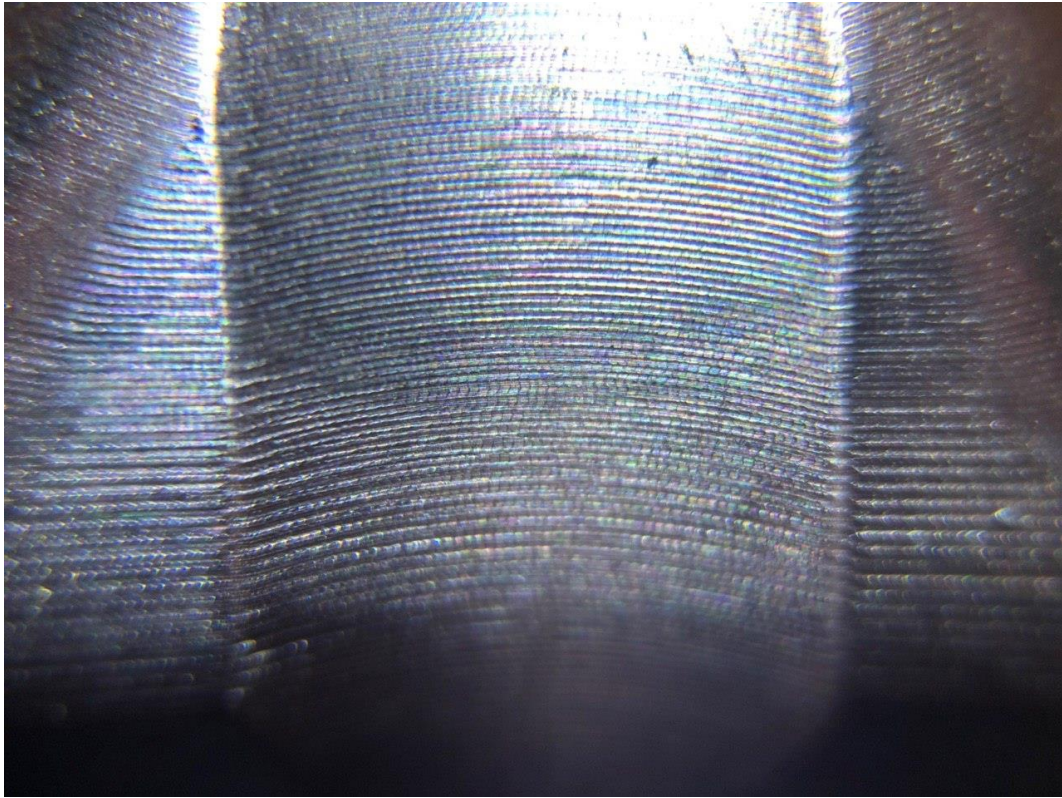


Рис 3.13 Шорсткість поверхні після обробки методом траєкторій по ватерлініям

Проведемо аналіз результатів по групам (табл. 3.12).

Таблиця 3.12 Аналіз результатів вимірювання зразка по групам після обробки за траєкторіями по ватерлініям

Група	Значення	Результат
I	$R1 = 0'52'' + 0'40'' + 0'34'' + 0'42'' + 0'53'' + 0'5''$	$R1 = 3'46''$
II	$R2 = 0.0021 + 0.0015 + 0.0033 + 0.0039 + 0.0010$	$R2 = 0.0118 \text{ мм}$
III	$R3 = 0.0102 + 0.0110 + 0.0030$	$R3 = 0.0242 \text{ мм}$
IV	$R4 = 0.0036 + 0.0026$	$R4 = 0.0062 \text{ мм}$
V	$R5 = (0.542 + 0.963) / 2$	$R5 = 0.752$
VI	$R6 = 10 \text{ хв } 33 \text{ сек}$	$R6 = 10 \text{ хв } 33 \text{ сек}$

3.5 Аналіз результатів дослідження

Після проведення експериментів виконаємо обробку та аналіз результатів. Виконаємо порівняльний аналіз результатів всіх методів, що використовувалися при проведенні експериментів (табл 3.13).

Таблиця 3.13 Порівняння результатів

Група	Метод				Результат (кращий)
	Лінійний	Спіральний	Растровий	Ватерлінії	
I	10'29''	23'9''	14'10''	3'46''	Ватерлінії
II	0.0158	0.0296	0.0245	0.0118	Ватерлінії
III	0.0284	0.0371	0.0570	0.0242	Ватерлінії
IV	0.0135	0.0156	0.0153	0.0062	Ватерлінії
V	0.910	0.835	0.766	0.752	Ватерлінії
VI	12 хв 17 сек	11 хв 12 сек	13 хв 25 сек	10 хв 33 сек	Ватерлінії

За результатом порівняльного аналізу, можемо зробити висновок, що серед всіх методів обробки найкращим виявився метод формування траєкторії руху інструменту по ватерлініям.

Виконаємо поетапний аналіз якості обробки різних типів поверхонь. Визначимо групи поверхонь, які будуть підлягати аналізу:

- поверхні, що розташовані під великим кутом до осі обробки
- поверхні, що розташовані під малим кутом до осі обробки
- радіусні поверхні
- стики між поверхнями

Спосіб формування траєкторій лінійним методом загалом показав досить непоганий результат. Перевагою даного методу є його обробка поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис 3.14).

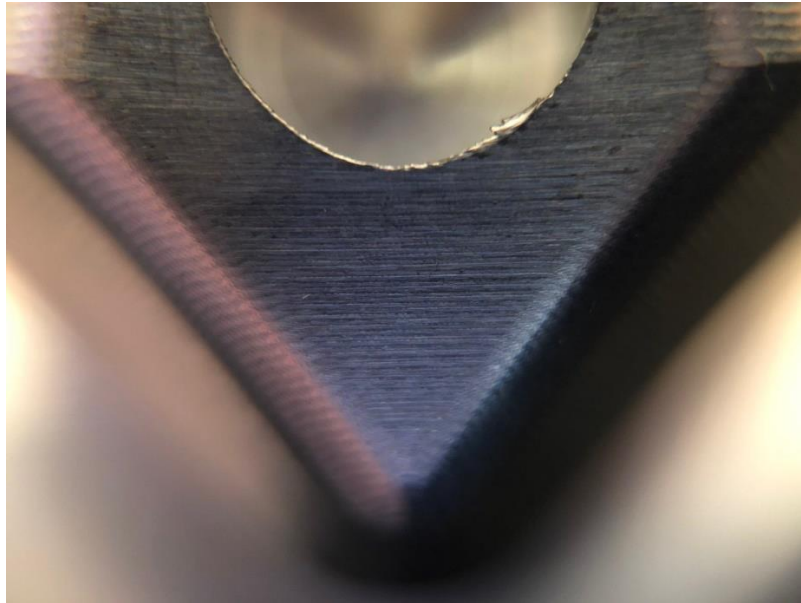


Рис 3.14 Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом лінійних траєкторій

Ще однією перевагою даного методу є якість утворених стиків між різними поверхнями (рис 3.15).

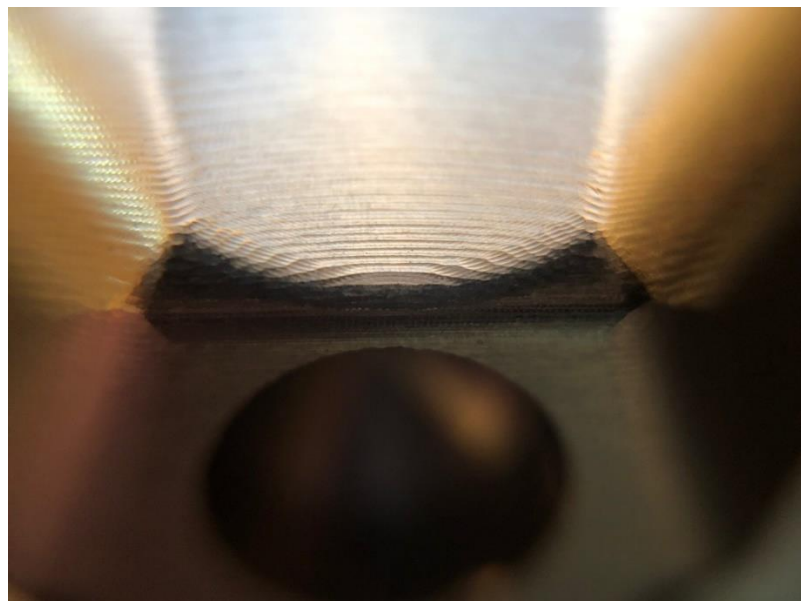


Рис 3.15 Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом лінійних траєкторій

Якість обробки поверхонь, що розташовані під великим кутом обробки, показала середній результат (рис 3.16).

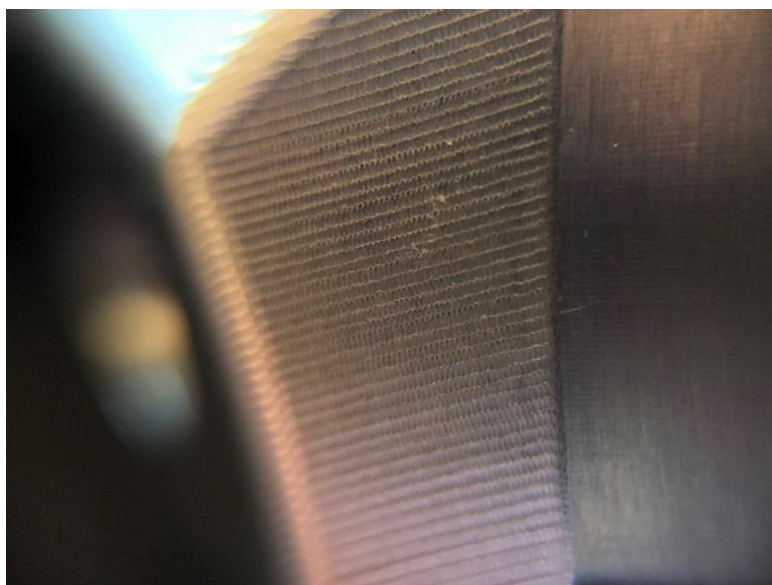


Рис 3.16 Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом лінійних траєкторій

Недоліком даного методу є його використання при обробці радіусних поверхонь (рис 3.17).

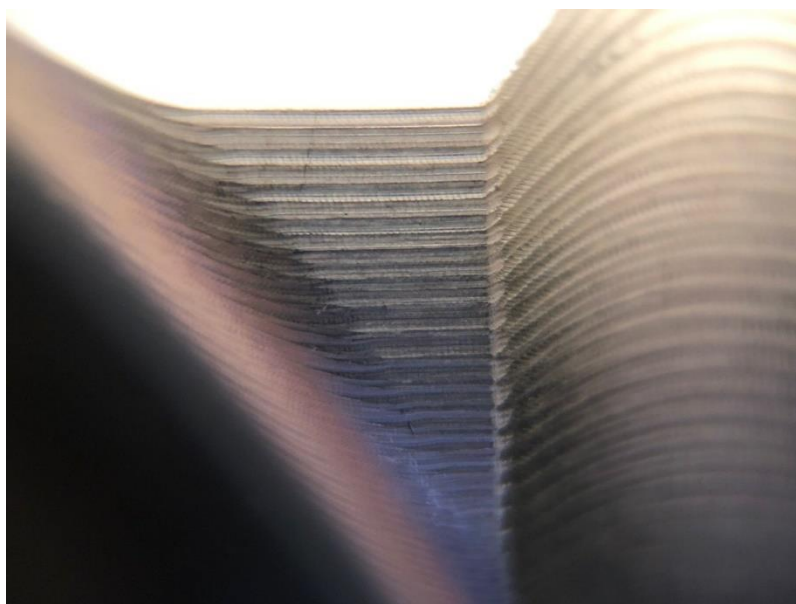


Рис 3.17 Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом лінійних траєкторій

Метод формування траєкторій руху інструменту по спіралі загалом показав найгірший результат з огляду на точність обробки. Перевагою цього методу є обробка радіусних поверхонь (рис 3.18).

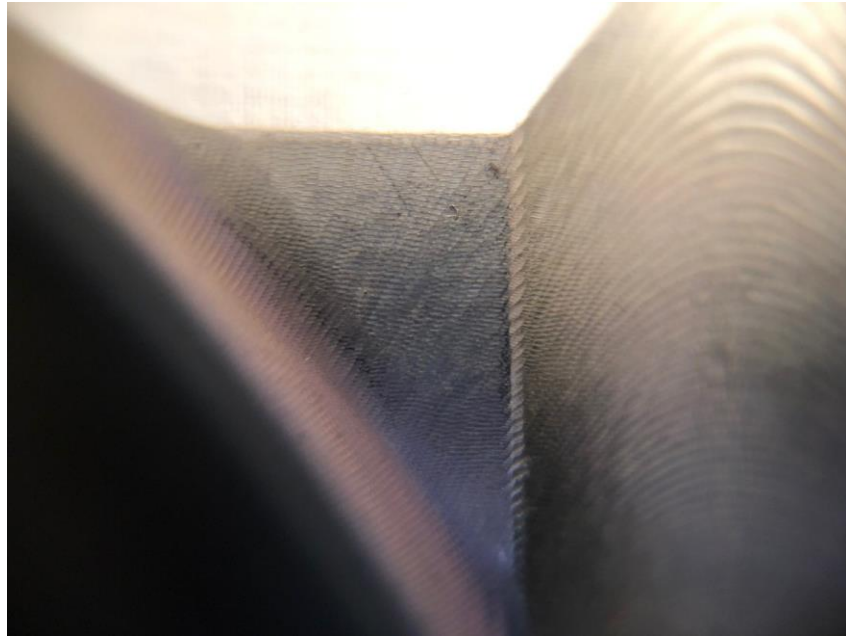


Рис 3.18 Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом спіральних траєкторій

Також перевагою цього методу є висока якість стиків між поверхнями (рис. 3.19).

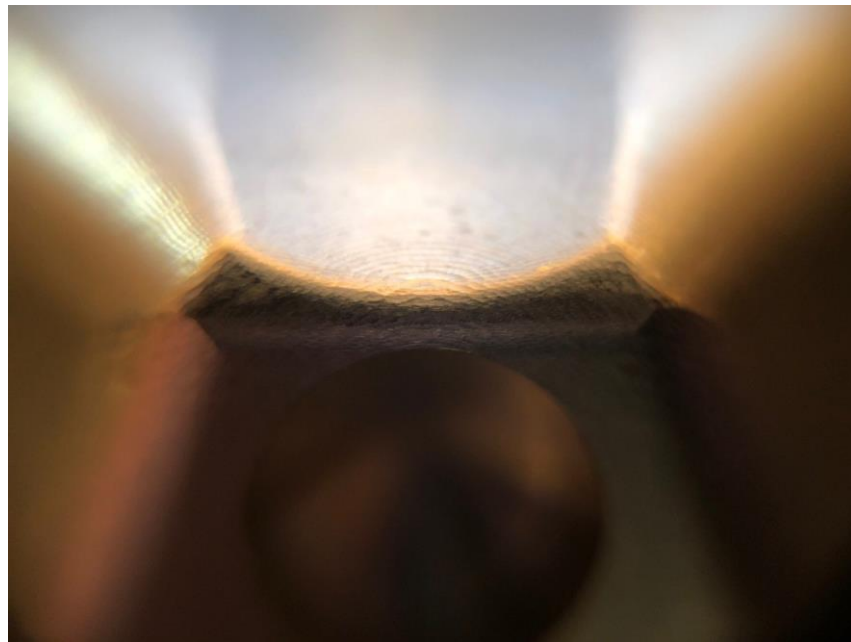


Рис 3.19 Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом лінійних траєкторій

Задовільною є якість обробки поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис 3.20).

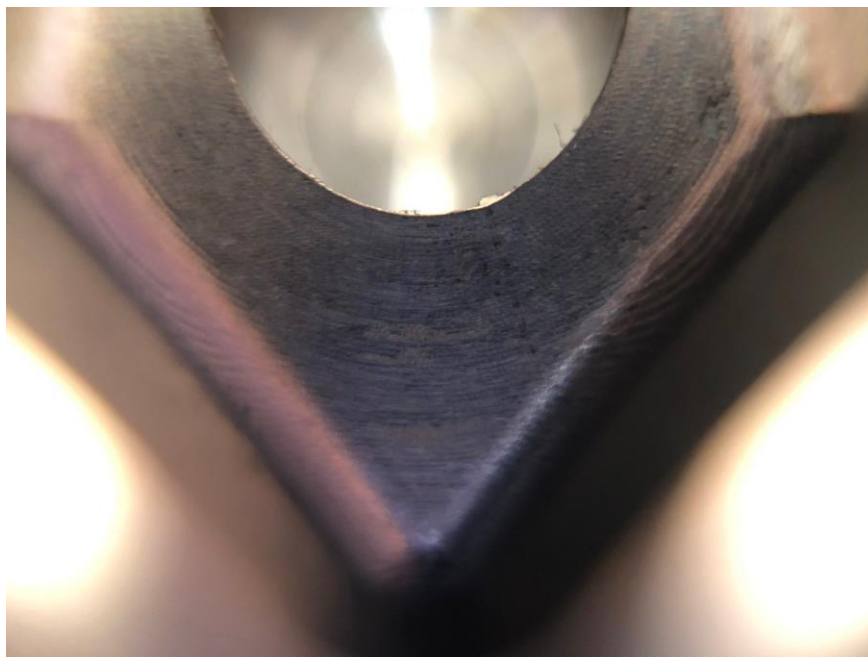


Рис 3.20 Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом спіральних траєкторій

Величезним недоліком методу спіральних траєкторій є незадовільна якість поверхонь, що розташовані під великим кутом до осі обробки. Поверхня, що розташована під великим кутом до осі обробки, сформована методом спіральних траєкторій, зображена на рисунку 3.21.

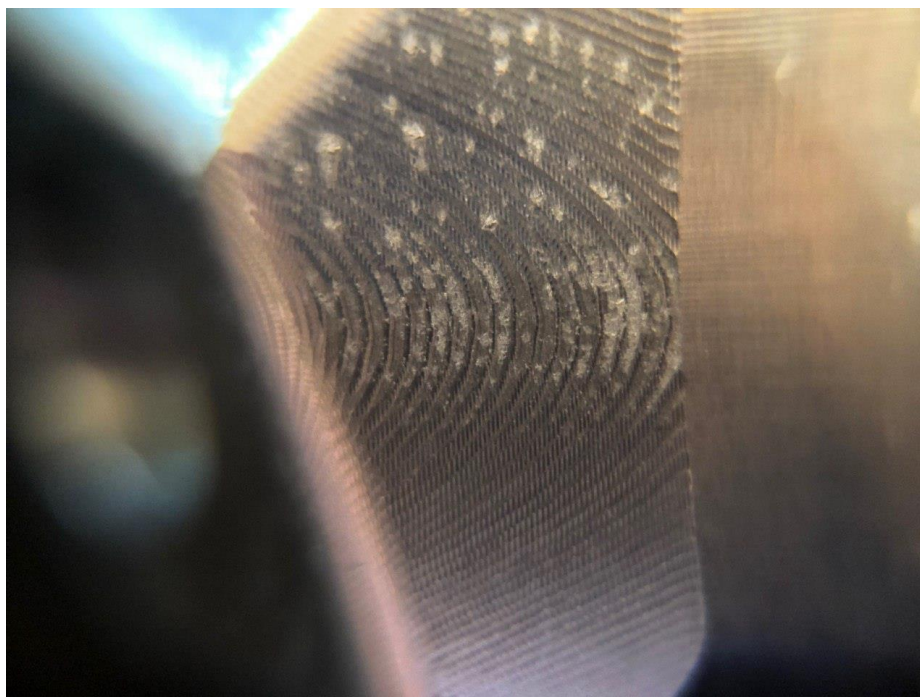


Рис 3.21 Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до осі обробки, яка була сформована методом спіральних траєкторій

Метод формування руху інструменту по растровій траєкторії загалом показав середній результат з огляду на точність обробки. Перевагою даного методу є обробка поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис 3.22).

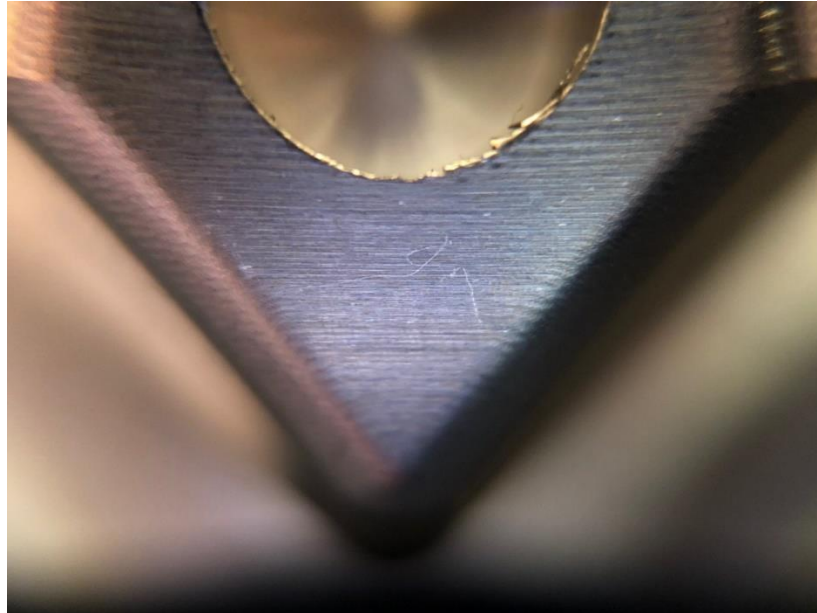


Рис 3.22 Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом растрових траєкторій

Задовільною є якість обробки поверхонь, що розташовані під великим кутом відносно осі обробки (рис 3.23).

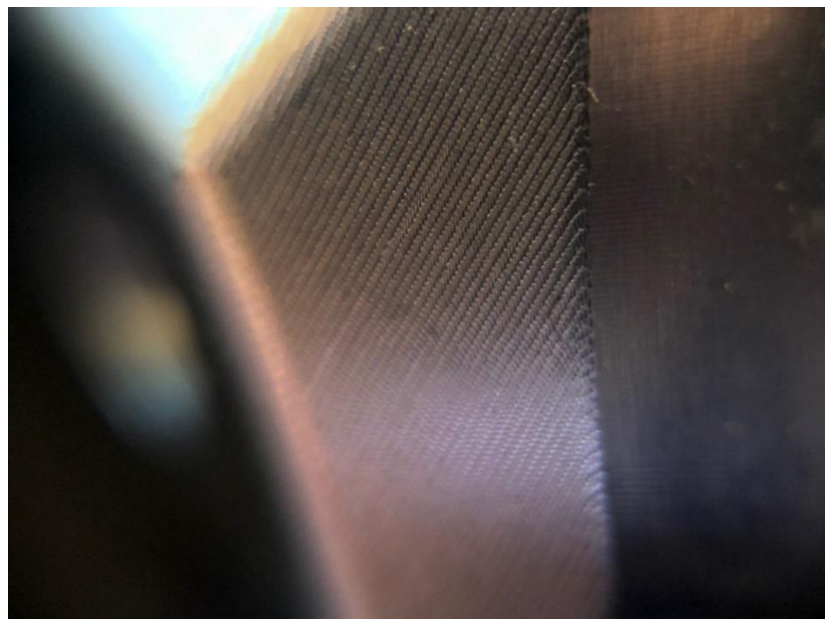


Рис 3.23 Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до осі обробки, яка була сформована методом растрових траєкторій

Недоліком є якість обробки радіусних поверхонь (рис 3.24).

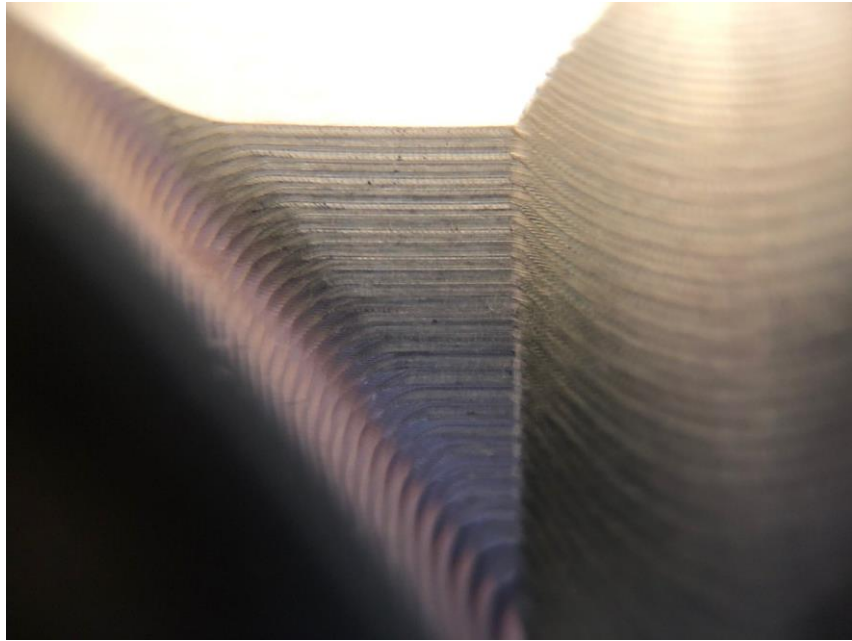


Рис 3.24 Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом растрових траєкторій

Великим недоліком способу растрових траєкторій є якість стиків між поверхнями (рис 3.25).

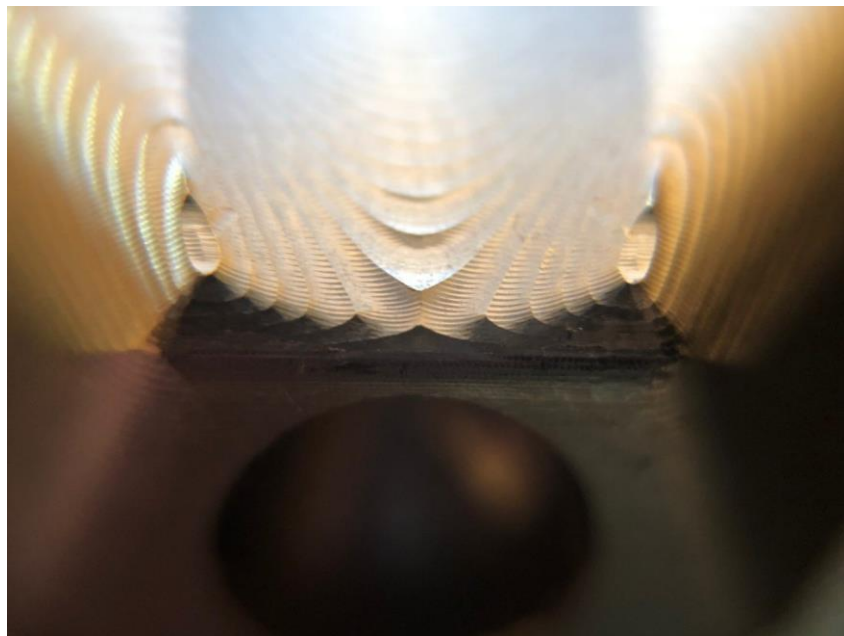


Рис 3.25 Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом растрових траєкторій

Метод формування траєкторій по ватерлініям показав найкращі результати по точності та непогані результати по часу обробки.

Перевагами даного методу є якість поверхонь, що розташовані під кутами до осі обробки. Поверхня, що розташована під великим кутом до осі обробки, зображена на рисунку 3.26.

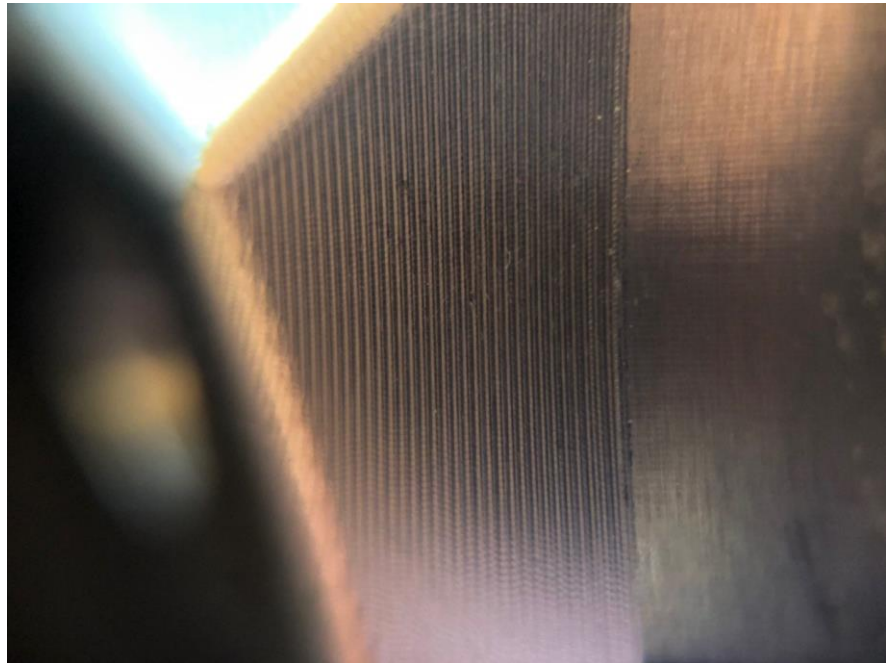


Рис 3.26 Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до осі обробки, яка була сформована методом траєкторій по ватерлініям
Високу якість мають також радіусні поверхні (рис. 3.27).

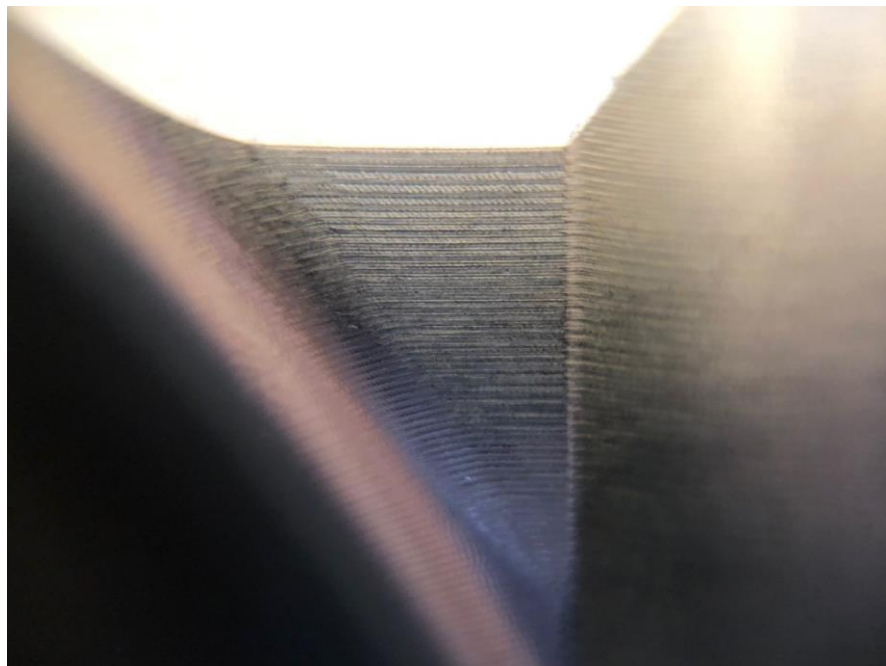


Рис 3.27 Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом траєкторій по ватерлініям

Задовільний результат показала якість стиків між поверхнями (рис 3.28).

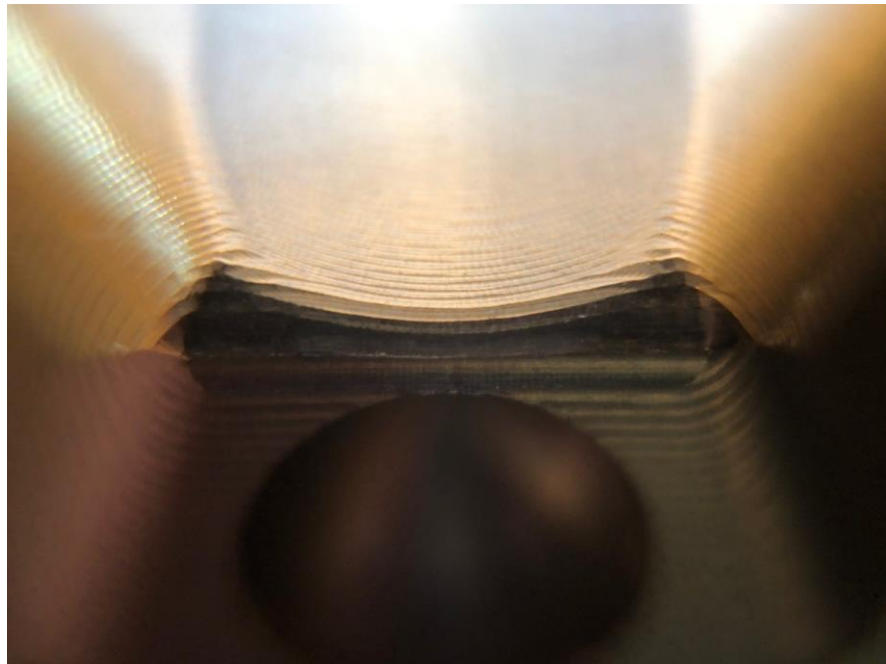


Рис 3.28 Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом траєкторій по ватерлініям

Недоліком даного методу є якість поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис 3.29).

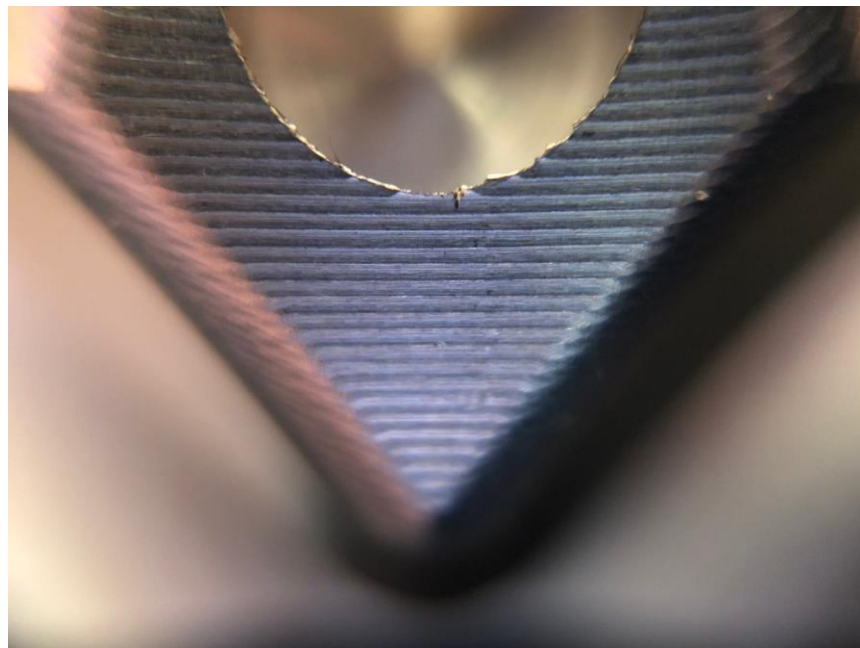


Рис 3.29 Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до осі обробки, яка була сформована методом траєкторій по ватерлініям

Виконаємо порівняння результатів, позитивний результат позначимо символом «+», нейтральний результат позначимо символом «Н», негативний результат позначимо символом «-». Порівняння результатів якості обробки різними методами відображено у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 Порівняння результатів обробки різних типів поверхонь

Тип поверхні	Метод формування траєкторії				Результат (кращий)
	Лінійний	Спіральний	Растровий	По ватерлініям	
Під малим кутом	+	Н	+	-	Лінійний / растровий
Під великим кутом	Н	-	Н	+	По ватерлініям
Радіусна поверхня	-	+	-	+	Спіральний / по ватерлініям
Стики між поверхнями	+	+	-	Н	Лінійний / спіральний

З огляду на результати порівняння різних методів, можемо дійти висновку, що найкращого результату можна досягти, формуючи комбіновані траєкторії руху інструменту, враховуючи дані з таблиці 3.14, яка показує переваги кожного з методів.

Сформуємо список рекомендацій при виборі траєкторій руху інструменту при обробці поверхонь складного профілю:

1. Обробку поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки, найкраще виконувати по лінійній або растровій траєкторії руху. Можливим також є вибір спіральної траєкторії руху.

2. Обробку поверхонь, що розташовані під великим кутом відносно осі обробки, найкраще виконувати з використанням траєкторії по ватерлініям.

3. Обробку радіусних поверхонь, необхідно виконувати, використовуючи спіральну траєкторію або ж траєкторію по ватерлініям.

4. При виборі лінійної та спіральної траєкторії руху якість стиків між поверхнями буде найкращою.

Висновки до розділу

1. Наведено особливості обладнання, що використовувалося при проведенні експериментів – оброблюючого центра DOOSAN DNM 4500 та координатно-вимірювальної машини ZEISS Duramax.

2. Проведено підготовку до експериментів, а саме: назначено режими обробки, обрано поверхні, що підлягають аналізу, та обрано критерії, за якими проводився аналіз.

3. Виконано порівняльний аналіз результатів експериментів та розроблено систему рекомендацій щодо вибору траєкторій руху інструменту при обробці складнопрофільних поверхонь.

4. Розробка стартап проекту «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах»

4.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах вплив траєкторії руху інструменту на точність механічної обробки поверхонь складного профілю було розроблено систему рекомендацій щодо аналізу моделі деталі, з метою визначення комбінацій оптимальних траєкторій руху інструменту, у вигляді програмного продукту.

Даний розділ містить результати аналізу стартап проекту, метою якого є визначення змоги виходу даного продукту на ринок та його конкурентоспроможність. Інформаційна карта проекту представлена в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Інформаційна карта проекту

1. Назва проекту	CNC Precision
2. Автори проекту	Смольніков Д.
3. Коротка анотація	В даному проекті розглянуто створення та впровадження програмного продукту з підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю
4. Термін реалізації проекту	6 місяців
5. Необхідні ресурси	1. Інтелектуальні – знання авторів 2. Матеріальні – апаратне забезпечення 3. Фінансові – витрати на обладнання, створення проекту, рекламу.
6. Опис проблеми, яку вирішує проект	Проект вирішує проблему неоптимальних траєкторій руху інструменту, за рахунок яких знижується точність обробки
7. Головні цілі та завдання проекту	Головна ціль в створенні програмного продукту. Завдання: 1. Розробка програмного продукту 2. Вихід на ринок 3. Отримання прибутку
8. Очікувані результати	В результаті реалізації проекту отримаємо якісний програмний продукт, що значно підвищить точність механічної обробки

Ідеї, зміст та базові потенційні ринки, в межах яких необхідно шукати потенційних клієнтів, зображено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи рекомендацій щодо аналізу моделі деталі з метою визначення комбінованих оптимальних траєкторій руху інструменту	Підприємства, що виготовляють деталі складного профілю	1. Підвищення якості продукції 2. Підвищення продуктивності виробництва
	Проектування технологічних процесів	1. Підвищення ефективності проектування 2. Прискорення проведення розрахунків при проектуванні 3. Підвищення якості отриманих даних

Отже, пропонується створення програмного продукту для проведення аналізу існуючої моделі деталі з метою визначення типів поверхонь деталі, що, на основі отриманих раніше результатів дослідження в цьому напрямку, дозволить створити перелік рекомендацій щодо оптимального проектування траєкторій руху інструменту.

Проведемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів:

- визначимо перелік техніко-економічних характеристик даної ідеї;
- визначимо попереднє коло конкурентів (товарів-замінників), що вже доступні на ринку, та проведемо аналіз на основі визначених раніше значень техніко-економічних показників проектів конкурентів;

- виконаємо порівняльний аналіз показників: для ідеї визначено показники, що мають а) кращі значення (S, сильні); б) аналогічні значення (N, нейтральні); в) гірші значення (W, слабкі) (табл 4.3).

Таблиця 4.3 Аналіз кращих, аналогічних та гірших характеристик ідеї

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	Товари конкурентів				S	N	W
		Мій проект	Renishaw	Carl Zeiss	SolidWorks			
1.	Розпізнавання по кресленню	+	-	-	+	+		
2.	Надійність системи	висока	висока	висока	висока		+	
3.	Точність системи	висока	висока	висока	середня		+	
4.	Торгівельна марка	-	+	+	+			+
5.	Універсальність	висока	висока	середня	середня	+		
6.	Вартість	середня	висока	висока	висока	+		

Після проведення порівняльного аналізу характеристик проекту з конкурентами визначено сильні, нейтральні та слабкі сторони проекту, після цього можна сформулювати висновок щодо конкурентоспроможності даної ідеї. Сильними сторонами є можливість проведення аналізу на пряму з креслення, а також універсальність та вартість програмного продукту. Нейтральними сторонами є надійність та точність системи. Недоліком є відсутність торгівельної марки, тобто програмний продукт не є захищеним від копіювання.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В даному розділі виконаємо аудит технології, що використовується для реалізації ідеї створення проекту.

Визначимо технологічну здійсненність ідеї, що передбачає аналіз наступних складових (табл. 4.4):

- технологія, що використовується при реалізації проекту
- наявність технологій
- доступність технологій

Таблиця 4.4 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології, що використовуються	Наявність технології	Доступність технології
1.	Імпорт креслення деталі	Спеціальні програмні бібліотеки існуючих систем	Наявні, не потребують доопрацювань	Недоступні в повному об'ємі
2.	Імпорт 3D-моделі деталі	Спеціальні програмні бібліотеки існуючих систем	Наявні, не потребують доопрацювань	Недоступні в повному об'ємі
3.	Автоматизований аналіз вхідних даних на коректність	Мова програмування Python	Наявні	Доступні
4.	Проведення розрахунків	Мова програмування Python	Потребують створення	Доступні
5.	Експорт результатів у вигляді G-коду	Мова програмування Python	Наявні	Доступні

Після проведення аналізу таблиці можна зробити висновок, що даний проект можна реалізувати частково використавши вже наявні технології, але необхідним також є створення програмної частини, що реалізує проведення розрахунків оптимальних траєкторій на основі отриманих раніше даних. Насамперед це є створення бази даних, що в

своєму складі містить перелік типів поверхонь та рекомендацій щодо створення траєкторій для конкретних поверхонь. Сюди також входить створення програмної частини, що виконає розрахунок допоміжних параметрів, таких як час обробки, рекомендації щодо режимів різання та вибору необхідного інструменту.

Частина технологій, що будуть використовуватися при реалізації є доступними та не потребують додаткових доопрацювань, що значно спрощує розробку програмного продукту та не потребує додаткових витрат на нові розробки. Доступ до цих технологій можна отримати у відкритому доступі.

В результаті проведення даного аналізу ми можемо визначити, що технологічна здійсненність проекту є частковою.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту на ринок, ринкові загрози та перешкоди, що можуть виникнути на шляху впровадження проекту.

Це дозволить спланувати напрями розвитку та врахувати стан ринкових потреб з огляду на ринкове середовище, врахувати потреби клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 Попередня характеристика
потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од (1 рік /2 рік /3 рік)	75 000 / 200 000 / 1 000 000
3.	Динаміка ринку	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	відсутні
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ІЕЕЕ, ДСТУ
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

Аналіз ринку показав, що ринок має зростаючу динаміку та попит на даний продукт. Це дозволить потенційно легко ввійти на ринок, особливо при відсутності обмежень для входу, незважаючи на наявність конкурентів в даній галузі, що вже успішно реалізують свою продукцію.

Визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та визначимо орієнтовний перелік вимог для кожної групи товару (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Програмне забезпечення для аналізу моделі деталі з метою оптимізації траєкторій руху інструменту	«Арсенал», «Київ-Прилад», «Артем», Метрологічні центри	Зручність у користуванні; Економія часу та зусиль.	Надійність; Невисока вартість; Зручність у використанні; Довготермінова гарантія; Термін експлуатації; Демонстрація.

Отже, потенційною групою клієнтів даного продукту є підприємства авіа-, вертольото-, приладо- та машинобудівного напрямку.

При застосуванні даної технології можливі певні загрози (табл 4.7). Для попередження таких ситуацій необхідна наявність у складі компаній висококваліфікованих працівників, які зможуть в повній мірі реалізувати потенціал програмного продукту.

Таблиця 4.7 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Повернення	Відмовлення від покупки товару	Повернення коштів
2.	Конкуренти	Дані технології активно розвиваються у всьому світі	Моніторинг ринку
3.	Програмна поломка	Перевантаження системи	Перезавантаження продукту
4.	Втрата привабливості	З часом дизайн втрачає свою привабливість	Оновлення зовнішнього вигляду
5.	Проблеми з експлуатацією продукту	Часті питання, яких немає в інструкції до експлуатації	Гаряча лінія та підтримка клієнтів

В таблиці 4.7 було описано фактори загроз, які необхідно контролювати, щоб зменшити їх вплив на якість отриманих користувачем послуг. Для даних факторів приведений ряд рекомендацій щодо їх усунення.

Таблиця 4.8 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Спосіб використання	Більша кількість точок зв'язку з користувачем	Створення аналога з більшими можливостями
2.	Універсальність	Використання продукту в різних методах розрахунку	Розробка компактного, портативного та універсального продукту
3.	Розроблення нових проектів	Залучення нових працівників	Створення стартапів

В таблиці 4.8 наведено потенційні фактори можливостей, які сприяють ринковому впровадженню даного продукту, а також можливі реакції компанії.

Проведемо ступеневий аналіз конкуренції на ринку: визначимо основні особливості конкурентного середовища та його прояви (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії)
1. Олігополія	Конкуренція декількох домінуючих фірм	Створення продукту, що є конкурентоздатним
2. Національний	Конкуренція на міжнародному рівні	Нижча ціна, більш зручна система, підтримка національного продукту
3. Товарно-видова	Конкуренція між товарами, що виконують схожі функції	Реклама, нові функції
4. Внутрішньогалузева	Конкуренти виготовляють продукт, що задовольняє одну потребу	Розробка нових технологій
5. Цінова	Для великої частки клієнтів вирішальним фактором при виборі є ціна	Моніторинг цін на ринку
6. Марочна	Зареєстрований бренд, марка має величезний вплив на вибір і думку покупця	Реєстрація марки, рекламування товару

Після проведення ступеневого аналізу бачимо, що особливості конкурентного середовища має великі перспективи для конкурентної боротьби.

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в різних галузях виробництва (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 Аналіз конкуренції за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товар и-замінники
Складові аналізу	Renishaw Zeiss SolidWorks	AutoCad	Без дистриб'юторів . Самі ж компанії являються постачальниками товарів на ринок, щоб уникнути додаткових витрат	Клієнти залишають відгуки, оцінюють роботу продукту. Тому суб'єктивна оцінка з боку покупців завжди є високопоставлена	Товари з більш широким функціоналом
Висновки:	Багаті німецькі та британські компанії мають великий вплив на ринок	Необхідно прямувати до стандартів якості, заданих конкурентами	Постачальники продукції встановлюють ціну	Потреби ринку встановлюють покупці. Тому це завжди є ключовим фактором.	Може відбутися збільшення конкуренції

Аналіз показав прямих та потенційних конкурентів, було визначено, що головними силами, що діють на конкуренцію, є постачальниками та товари-замінники.

Визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 4.11). Оцінка є попередньою, оскільки продукт ще не впроваджено.

Таблиця 4.11 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Новизна і прогрес	Сучасні технології
2	Якість	Висока якість (результати роботи підтверджені експериментально)
3	Собівартість	Низька собівартість продукції
4	Гарантія	Продовжена гарантія на 2 та більше років
5	Знижка на оптову покупку	При масовій закупці продукту – знижки (залежно від обсягу)

Проведемо порівняльний аналіз сильних і слабких сторін нашого продукту (табл 4.12).

Таблиця 4.12 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Новизна і прогрес	15						X	
2	Якість	11				X			
3	Собівартість	17							X
4	Гарантія	11				X			
5	Знижка на оптову покупку	12					X		

Аналіз сильних та слабких сторін показав, що новизна і прогрес та собівартість продукту дають перевагу продукту над іншими продуктами конкурентів, тому проект є конкурентоспроможним на ринку.

Таблиця 4.13 SWOT – аналіз стартап проекту

Сильні сторони: - використання сучасних мов програмування - зручний інтерфейс - клієнто-орієнтованість - корисність	Слабкі сторони: - низька популярність на ринку - відсутність патентів
Можливості: - попит продукту - отримання держзамовлень - розширення на іноземному ринку - збільшення продажів	Загрози: - проблеми з постачальниками - проблеми з товарами-конкурентами - поява більш модернізованої продукції - втрата клієнтів

В таблиці 4.13 проведено SWOT – аналіз продукту. Наведено сильні та слабкі сторони продукту, наведено можливості та загрози зі сторони продуктів конкурентів. SWOT - аналіз допоміг зрозуміти чинники, що можуть створити перешкоди на шляху реалізації продукту та його виходу на широкий ринок в майбутньому.

На основі SWOT – аналізу розробимо альтернативи поведінки ринкового впровадження продукту та його виведення на ринок, строки реалізації продукту, ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.14).

**Таблиця 4.14 Альтернативи ринкового впровадження
стартап проекту**

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Укладення договорів із конкурентами про співпрацю та взаємообмін запатентованими розробками	30%	2 місяці
2	Укладення договорів з партнерами про розширення взаємної партнерської діяльності	50%	4 місяці
3	Укладення договорів з робочим персоналом щодо розширення функціоналу продукту	95%	2 тижні
4	Стратегія розширення компанії та збагачення цінними кадрами	90%	6 місяців

На основі проведеного аналізу альтернативного ринкового впровадження оберемо найбільш ймовірні отримання ресурсів та з меншим строком реалізації. Буде обрана стратегія розширення компанії та збагачення цінними кадрами.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Першим кроком розроблення ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку, тобто опис потенційних споживачів (табл 4.15).

Таблиця 4.15 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватні власники	Готові	Високий попит	Висока	Середня
2	Держава	Готові	Середній попит	Низька	Складна
Які групи обрано: на основі аналізу потенційних груп споживачів оберемо групу приватних власників					

На основі аналізу цільових груп споживачів були обрані цільові групи для яких буде запропонований наш продукт з підвищення точності механічних обробки складнопрофільних поверхонь на оброблюючих центрах.

Визначимо та сформуємо розвиток базової стратегії для роботи в обраному сегменті ринку (табл 4.16).

Таблиця 4.16 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія спеціалізації	Орієнтування не тільки на клієнтів, але і на власників підприємств. Рекламу продукту та створення умов для стійкого попиту на товар; якісне обслуговування.	Якісне обслуговування; Оптимальне співвідношення ціна-якість;	Стратегія спеціалізації

З базову стратегію обрано стратегію спеціалізації, що передбачає надання продукту важливих з точки зору клієнта властивостей, що зробить продукт привабливішим за товар конкурентів.

Оберемо стратегію конкурентної поведінки (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 Стратегія конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Компанія буде шукати нових споживачів	Так - схожість технологій - методологія	Стратегія наслідування лідеру

Для входу на ринок обрано стратегію наслідування лідеру, це дозволить зменшити боротьбу з конкурентами, зосередитися на отриманні прибутку.

На основі потреб споживачів обраного сегменту до постачальника та продукту та в залежності від обраних стратегій розвитку та стратегій конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування, що буде відображати ринкову позицію, згідно якої клієнти зможуть ідентифікувати проект (табл. 4.18).

Таблиця 4.18 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока якість та точність	Стратегія спеціалізації	Оптимальне співвідношення ціни та якості	Висока якість, надійність, індивідуальний підхід, сервісне обслуговування

Результатом є вибір такої базової стратегії як стратегія спеціалізації, за стратегію конкурентної поведінки обрано стратегію наслідування лідеру. Цільовими групами було обрано приватні підприємства, за рахунок нових технологій компанія буде захоплювати нових клієнтів та перехват конкурентної ініціативи.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап проекту

Першим кроком при розробці маркетингової програми є розробка маркетингової концепції товару, що отримає споживач.

Проведемо аналіз конкурентоспроможності товару в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Якість	Висока якість	Розробка продукту проводилась на високому рівні з використанням результатів експериментальних досліджень
2.	Доступність	Доступність продукції	Невисока вартість
3.	Контроль працездатності	Самодіагностика	Оповіщення про можливі збої в роботі продукту
4.	Точність	Висока точність	Точність вище, ніж у конкурентів

Результатом аналізу ключових переваг концепцій потенційного товару є висновок про те, що продукт з підвищення точності механічної обробки складнопрофільних поверхонь на оброблюючих центрах задовільнить всім вимогам потенційних клієнтів.

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару, що уточнить ідею продукту, фізичні складові, основні його характеристики та особливості процесу його надання (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Задоволення потреби користувача, зручне використання продукту, функціональна вигода, висока якість та точність.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Якість	Нм	Тл
	Точність	Нм	Тл
	Економічність	Нм	Вр
	Надійність	М	Тл
	Довговічність	Нм	Тх
	Технологічність	М	Тх
	Якість: Відповідає держстандартам		
	Пакування: програмне забезпечення на електронному носії		
Марка: назва організації			
III. Товар із підкріпленням	Реклама		
	Оновлення системи, технічна діагностика, знижки		
Товар буде захищено від копіювання за рахунок захисту інтелектуальної власності, розробки патентів.			

Визначимо рівень витрат, що є необхідними для створення стартапу (табл. 4.21).

Таблиця 4.21 Витрати на створення стартапу

№ п/п	Стаття витрат	Обсяг витрат, тис.грн.
1.	Придбання технічного обладнання	200
2.	Оренда приміщення	30
3.	Проектування програмного продукту	100
4.	Тестування продукту	10
5.	Виплати персоналу	150
6.	Реклама	50

Наступним кроком є визначення цінової політики, при формуванні якої необхідно керуватися аналізом цін конкурентів та змоги потенційних споживачів до придбання продукту (табл 4.22).

Таблиця 4.22 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	50 000 грн	75 000 грн	Високий	25 000 - 35 000 грн

Проведено аналіз ринкових цін на товари замінники та товари аналоги, визначено середній рівень доходів споживачів та встановлено нижню та верхню межу ціни на продукт.

Виберемо власну систему збуту, керуючись специфікою закупівельної поведінки основних цільових клієнтів. Оберемо, як виробник продає товар клієнту, канали збуту, канали контакту з клієнтом (табл. 4.23).

Таблиця 4.23 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Закупівля зі змінами або модифікована закупівля. Передбачається придбання зміненого продукту, зміна ціни на товар, зміна комплектації	Доставка товару, налаштування системи та первинна діагностика	Нульовий рівень	Продаж безпосередньо клієнту від виробника

Обрано продаж товару клієнту напряму від виробника. Обрано канал нульового рівня, тому що компанія прагне мати постійний контакт з покупцем (табл 4.24).

Таблиця 4.24 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Ознайомлення з товаром на сайті, можливість оцінити ефективність системи, оформлення гарантії, укладання договору.	Сайт компанії, електронна пошта, телефон, виставки	Об'єктивність інформації, що представлена, про товар та компанію.	Зацікавлення у товарі, представлення інформації про компанію та продукт	Висока якість та надійність, економічність

Висновки до розділу

Результатом даного розділу є визначення переваг запропонованого продукту - програмного забезпечення для аналізу моделі деталі з метою оптимізації траєкторій руху інструменту - щодо вже існуючих аналогів на ринку.

Проведено аналіз потенційних переваг продукту, проведено аналіз сильних та слабких сторін продукту, визначено коло конкурентів та товарів-замінників, що вже існують на ринку.

Проведено технічний аудит ідеї, визначено технологічну здійсненність ідеї. Визначено критерії та ринкові можливості за рахунок яких є можливим ефективний вихід продукту на ринок та які можна використати під час впровадження ідеї. Визначено фактори загроз, що

можуть стати на перешкоді під час виходу ідеї на ринок, та фактори можливостей, що відображають реакцію компанії та різноманітні фактори.

Обґрунтовано конкурентоспроможність ідеї, проведено аналіз факторів конкурентоспроможності. Розроблено ринкові стратегії проекту, описані цільові групи потенційних споживачів, визначено базові стратегії розвитку, конкурентної поведінки та позиціонування.

Також проведено аналіз трирівневої моделі товару. Сформовано цінову політику компанії на основі аналізу встановлених конкурентами цін на товари аналоги. Приділено особливу увагу до якості та точності наданих послуг, економічності товару та простоті використання. За ринкову поведінку було обрано стратегію наслідування лідеру, на основі якої розроблено входження на ринок та обрано цільовий сегмент потенційних користувачів.

Загальні висновки за результатами магістерської дисертації

В даній роботі розроблено систему рекомендацій щодо вибору траєкторій руху різального інструменту при обробці поверхонь складного профілю, що забезпечить підвищення точності механічної обробки та підвищить продуктивність виготовлення деталей.

Для вирішення поставлених задач було:

- проведено аналіз сучасного стану питання дослідження;
- визначено переваги та недоліки різних траєкторій руху інструменту;
- запропоновано методику створення керуючих програм для верстатів з ЧПК в системі SolidCAM;
- запропоновано методику створення планів вимірювання складнопрофільних деталей в системі ZEISS Calypso;
- проведено експериментальні дослідження впливу траєкторій руху різального інструменту на точність обробки складнопрофільних деталей.
- розроблено стартап-проект та встановлено можливість його реалізації та впровадження на ринку

В процесі роботи було застосовано теоретичні знання та експериментальні методи досліджень.

Список використаної літератури

1. Батуев, В. В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск: ЮУГУ, 2007. – 208 с.
2. Автоматизированное проектирование технологических процессов // Антонюк В. С., Выслоух С. П., В. И. Аверченков. – Киев УМК ВО, 1989 – 116 с.
3. Корчак, С. Н. Прогнозирование точности и качества при проектировании технологических процессов механической обработки: Учебное пособие. – 2-е изд., перер. и доп. / С. Н. Корчак, В. И. Гузеев, Г. И. Буторин и др.; Под общ. ред. В.И. Гузеева. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 66 с.
4. Гузеев, В. И. Теория и методика производительности контурной обработки деталей разной точности на токарных и фрезерных станках с ЧПУ: дис. ... докт. техн. наук. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 517 с.
5. Никитенко, В. М. Технологические процессы в машиностроении : учебно-лабораторный практикум / В. М. Никитенко. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 36 с.
6. Вэй Пью Маунг Повышение эффективности контурной обработки на станках с ЧПУ путем коррекции траектории и режимов резания: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2000. – 163с
7. Гимадеев, М. Р. Анализ механизма формирования микрорельефа при 5-ти координатной индексной обработке / М. Р. Гимадеев // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XIX краевого конкурса ученых и аспирантов, Хабаровск, 13-20 янв. 2017 г. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. – 258 с.

8. Городецкий, Ю. И. Динамика торцового и цилиндрического фрезерования / Ю. И. Городецкий // Известия вузов. Машиностроение. – 1996. №1-3. – С. 81-86.
9. Харченко А.О. Верстати з ЧПУ та обладнання гнучких виробничих систем: Навчальний посібник для студентів вузів. - К.: ВД «Професіонал», 2004. - 304 с.
10. Р.І. Гжіров, П.П. Серебреніцькій. Програмування обробки на верстатах з ЧПК. Довідник, - Л.: Машинобудування, 1990. - 592 с.
11. Автоматизированная подготовка программ для станков с ЧПУ: Справочник / Под общ. ред. Р.Э. Сафраган. – К.: Техника, 1986. – 191 с.
12. Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 136 с.
13. Татаркин, Е. Ю. Проектирование технических систем управления точностью механической обработки: монография / Е. Ю. Татаркин, А. М. Марков, А. А. Ситников. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 1996. – 174 с.
14. Стельмаков, В. А. Метод оценки точности гладких цилиндрических отверстий по диаметральному размеру и относительному положению их осей / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. - № I-1 (25). – С. 73-81.
15. Аверьянова И.О., Виноградов А.В., Продан Р.К. Построение геометрической модели и разработка управляющей программы / И.О. Аверьянова, А.В. Виноградов, Р.К. Продан - М.: МГИУ, 2009. - 35 с.
16. Аверьянова И.О., Продан Р.К., Виноградов А.В. Разработка управляющих программ для системы управления класса CNC с

применением DXF – файлов. Приводная техника, №4 (92), август 2011. – с. 29 – 32.

17. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении/Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров и др.; Под общ. ред.Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
18. Ивахненко А.Г. Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем. Дисс. д-ра техн. наук: спец. 05.03.01. Москва, СТАНКИН. – 1998.
19. Аверченков, В. И. Автоматизация выбора режущего инструмента и инструментальных стратегий обработки на многофункциональном техническом оборудовании с ЧПУ / В. И. Аверченков, А. В. Аверченков, М. В. Терехов // Научные технологии в машиностроении. – № 10, 2012. – С. 28-35.
20. Аверченков, В. И. Исследование процесса формирования погрешности обработки при использовании систем активного контроля настройки инструмента станка с ЧПУ / В. И. Аверченков, Л. Б. Филиппова // «Вестник БГТУ». Выпуск №2. 2013. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 4-10.
21. Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 136 с.
22. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

ДОДАТКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ТОВ «Зброяр»

Горбань С.І.

2019 р.

АКТ

про впровадження результатів магістерської дисертації
студента гр. ПБ-81мп

Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Смольнікова Дениса Руслановича

Комісія в складі голови – генерального директора Горбаня Сергія Івановича і членів: начальника виробництва Бортника Андрія Григоровича і в.о. начальника технологічного відділу Захарова Андрія Дмитровича склали дійсний акт про те, що результати магістерської дисертації «Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах», зокрема:

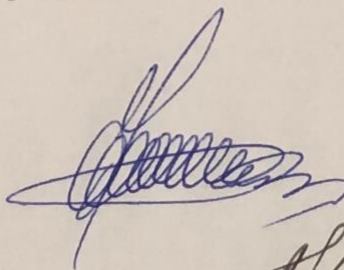
- методи і засоби підвищення точності процесу фрезерування складнопрофільних поверхонь;
- особливості використання оброблюючих центрів при виготовленні деталей складного профілю;
- методика вибору траєкторій руху інструменту при фрезеруванні поверхонь складного профілю.

використані на виробництві під час виготовлення відповідальних деталей складного профілю.

Впровадження в технологічний процес обробки результатів магістерської дисертації дозволило підвищити точність виготовлення відповідальних деталей складного профілю за рахунок розробки оптимальних керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням. В результаті значно підвищено точність оброблюваних деталей та продуктивність виготовлення в цілому.

ГОЛОВА КОМІСІЇ:

Генеральний директор

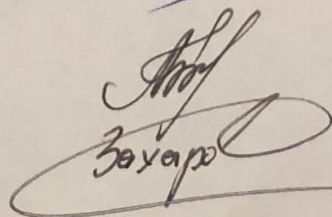


Горбань С.І.

ЧЛЕНИ КОМІСІЇ:

Начальник виробництва

В.о. начальника технологічного відділу



Бортник А.Г.

Захаров А.Д.

СПИСОК
наукових праць Смольнікова Дениса Руслановича

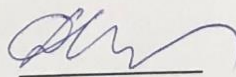
№ п/п	Назва	Видавництво, журнал чи номер авторського свідоцтва	К-сть друк. сторінок	Прізвища співавторів
1.	Підвищення точності механічної обробки поверхонь складного профілю на оброблюючих центрах	XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні»	3	
2.	Особливості фрезерної обробки деталей з просторово-складними поверхнями	XII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»	5	Філіппова М.В.

Декан ПБФ



Тимчик Г.С.

Студент



Смольніков Д.Р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
на тему:

**«Підвищення точності механічної
обробки поверхонь складного
профілю на оброблюючих центрах»**

Смольніков Д.Р.
Науковий керівник:
Філіппова М.В.

Київ - 2019

Актуальність роботи.

У сучасному виробництві велика частина деталей складного профілю виготовляється обробкою різанням.

Прогресивним способом забезпечення точності оброблюваних поверхонь на верстатах з ЧПК є вибір оптимальної стратегії обробки.

Таким чином можна зробити висновок, що дослідження впливу стратегії обробки на точність є актуальною задачею.

Мета дослідження: розробка системи рекомендацій вибору траєкторій руху різального інструменту для підвищення точності виготовлення деталей на оброблюючих центрах.

Об'єкт дослідження: механічна обробка поверхонь деталей складного профілю.

Предмет дослідження: підвищення точності механічної обробки поверхонь деталей складного профілю на основі визначення оптимальних траєкторій руху інструменту.

Задачі дослідження:

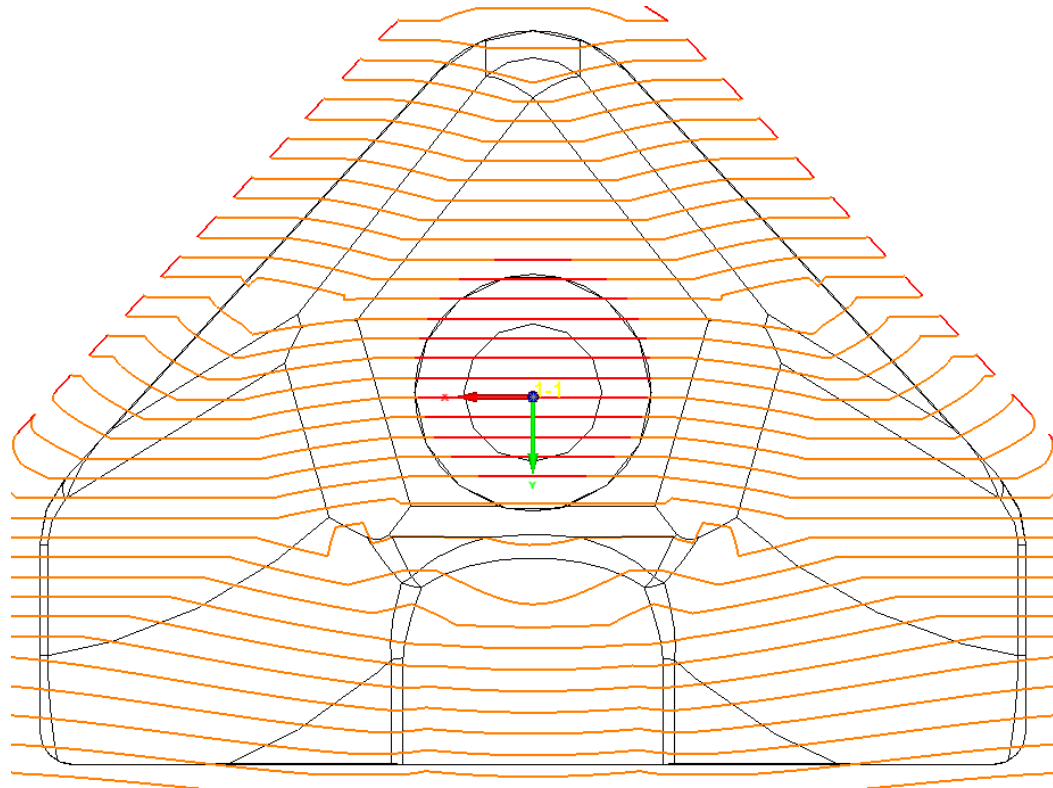
- на основі аналізу процесу виготовлення деталей з поверхнями складного профілю, визначити оптимальні траєкторії руху інструменту;
- розробити методику проведення дослідження для визначення точності поверхонь деталей складного профілю;
- провести експериментальні дослідження точності обробки поверхонь складного профілю;
- провести аналіз експериментальних досліджень;
- надати рекомендації щодо вибору траєкторій руху різального інструменту при механічній обробці поверхонь складного профілю.

Наукова новизна:

- отримано залежності параметрів точності різних типів поверхонь від траєкторій руху різального інструменту;
- створено систему рекомендацій щодо вибору траєкторій руху різального інструменту для різних типів поверхонь.

Практична цінність:

- визначено оптимальні траєкторії руху різального інструменту для різних типів поверхонь;
- надано методичні рекомендації з використання системи ZEISS Calypso при проектуванні плану вимірювань складнопрофільних поверхонь;
- надано методичні рекомендації з використання системи SolidCAM при розробці керуючих програми для верстатів з ЧПК.



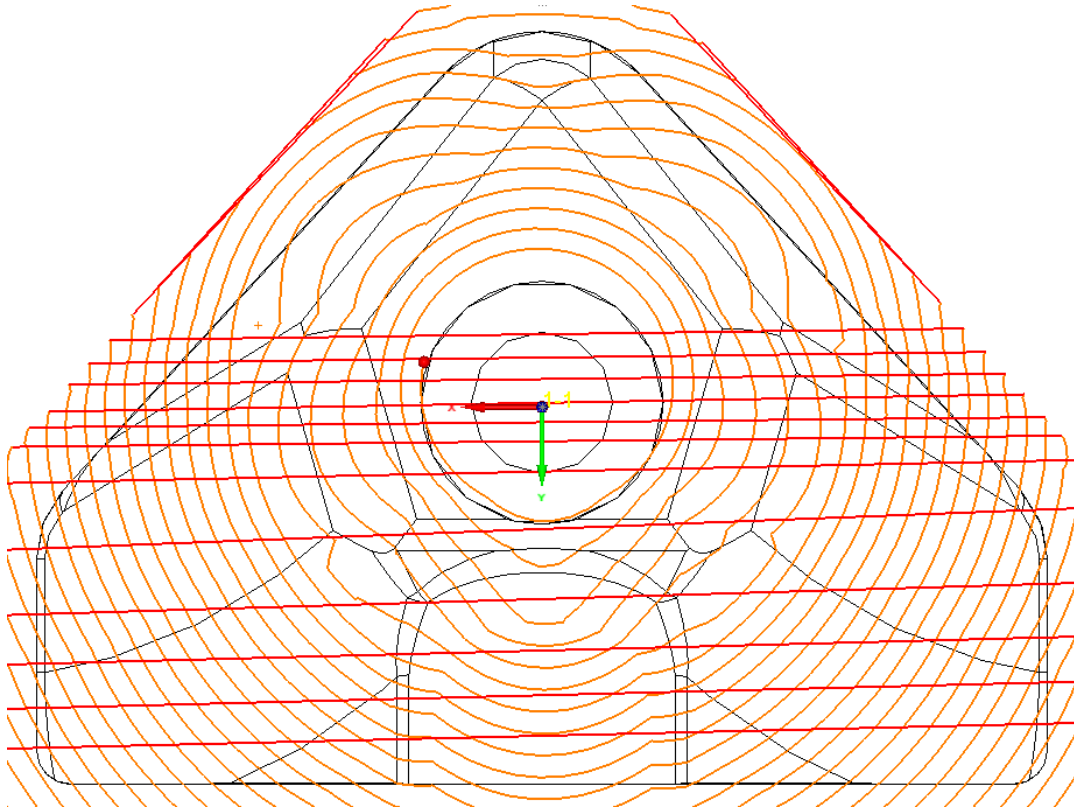
Лінійна траєкторія

Вхідні дані:

Фреза : $D = 4 \text{ мм}; R = 2 \text{ мм};$
Швидкість різання : $V = 130 \text{ м/хв};$
Подача : $F = 0.1 \text{ мм/об};$
Крок : $\Delta Z = 0.1 \text{ мм}.$

Вихідні дані:

Час обробки = 9 хв 2 сек
Шорсткість $R_a = 0.63 \text{ мкм}$



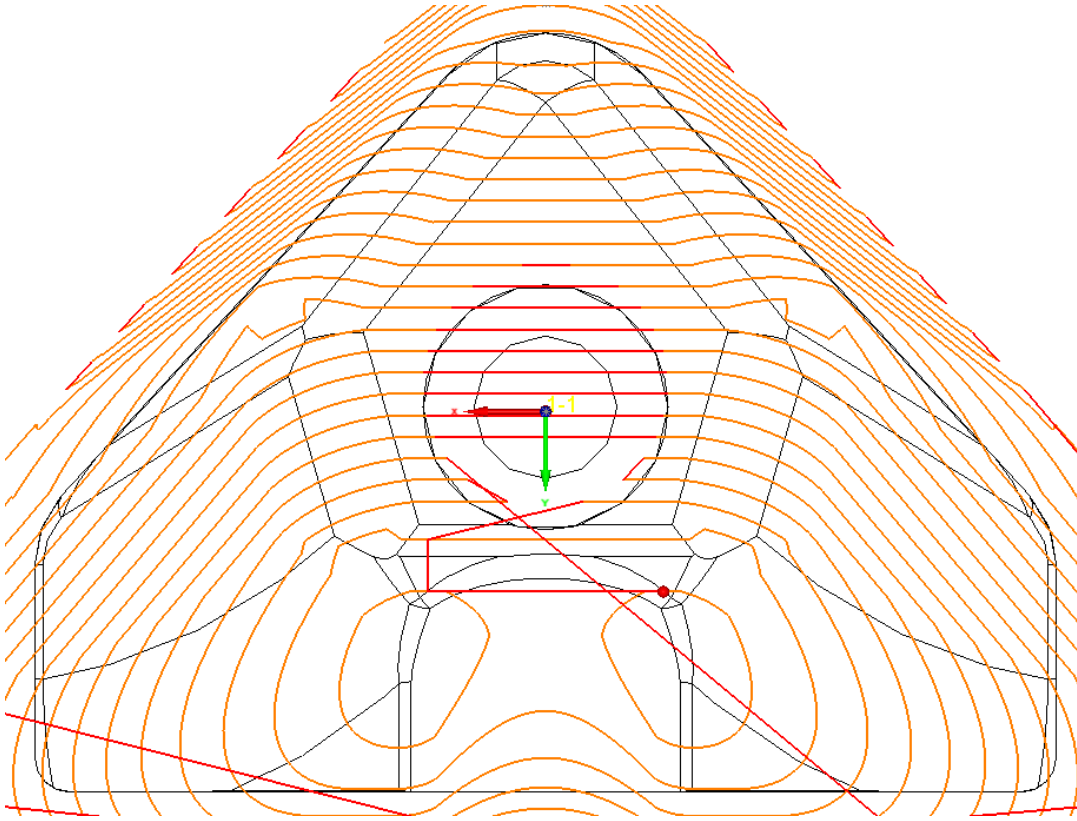
Спіральна траєкторія

Вхідні дані:

Фреза :	$D = 4 \text{ мм}; R = 2 \text{ мм};$
Швидкість різання :	$V = 130 \text{ м/хв};$
Подача :	$F = 0.1 \text{ мм/об};$
Крок :	$\Delta Z = 0.1 \text{ мм}.$

Вихідні дані:

Час обробки = 7 хв 51 сек
Шорсткість $R_a = 0.63 \text{ мкм}$



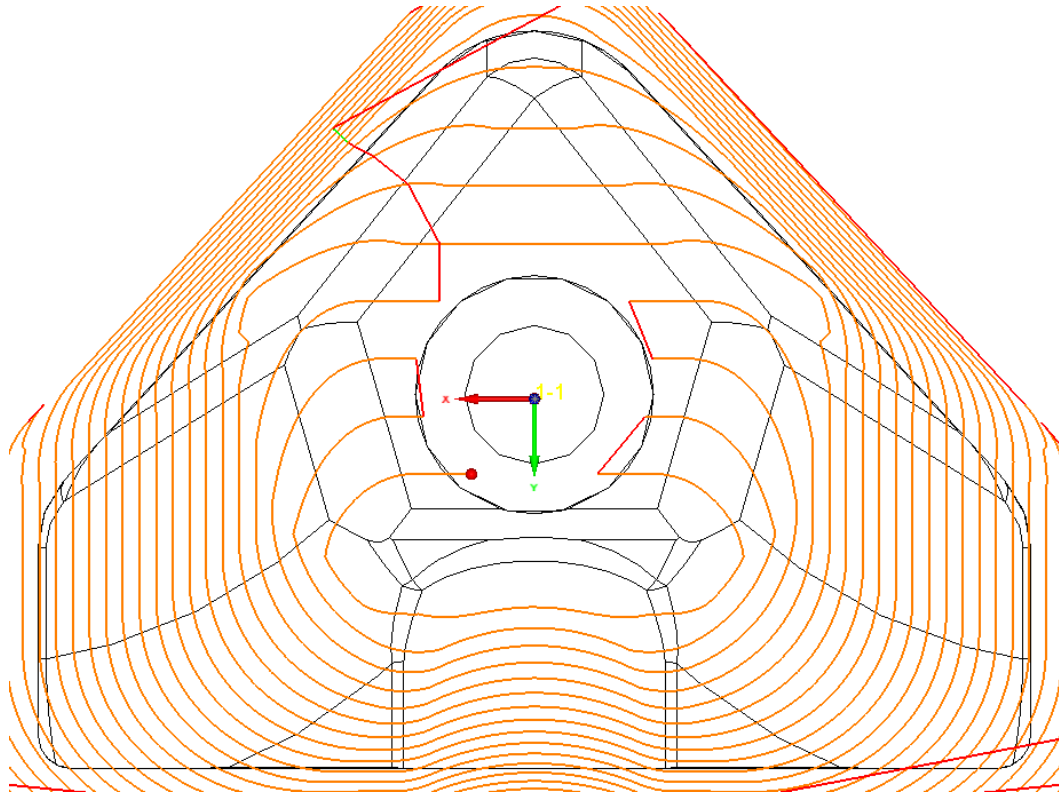
Растрова траєкторія

Вхідні дані:

Фреза :	$D = 4 \text{ мм}; R = 2 \text{ мм};$
Швидкість різання :	$V = 130 \text{ м/хв};$
Подача :	$F = 0.1 \text{ мм/об};$
Крок :	$\Delta Z = 0.1 \text{ мм}.$

Вихідні дані:

Час обробки = 8 хв 38 сек
Шорсткість $R_a = 0.63 \text{ мкм}$



Траєкторія по ватерлініям

Вхідні дані:

Фреза :	$D = 4 \text{ мм}; R = 2 \text{ мм};$
Швидкість різання :	$V = 130 \text{ м/хв};$
Подача :	$F = 0.1 \text{ мм/об};$
Крок :	$\Delta Z = 0.1 \text{ мм}.$

Вихідні дані:

Час обробки = 8 хв 42 сек
Шорсткість $R_a = 0.63 \text{ мкм}$

Обладнання та умови проведення експериментальних досліджень

10

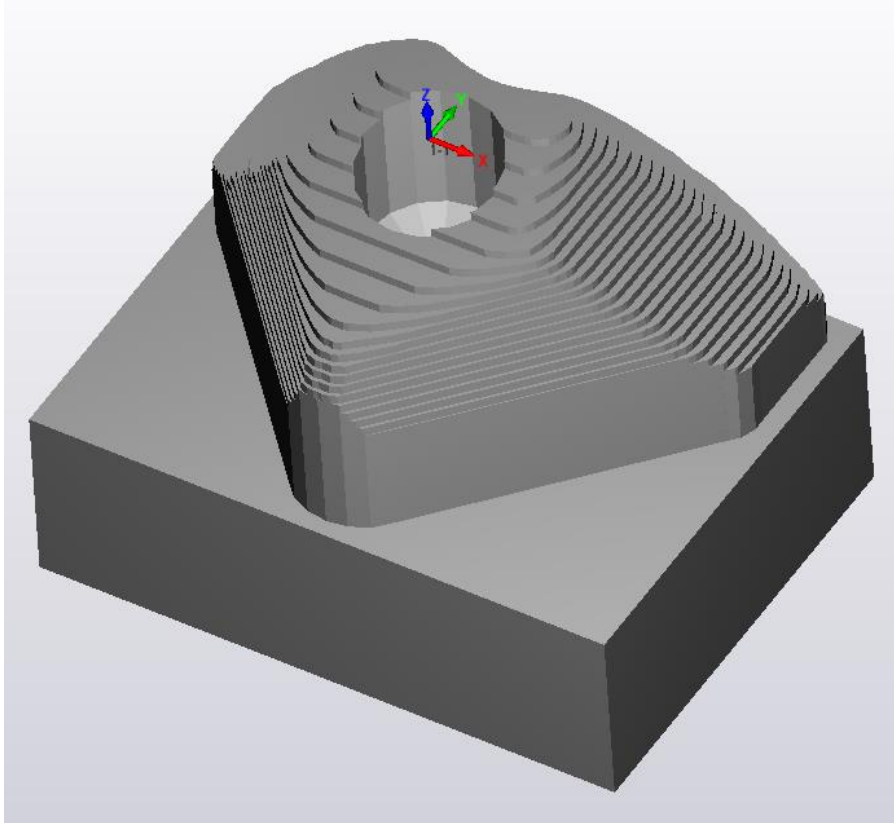


Чорнова обробка:
 $D = 6 \text{ мм};$
 $V = 110 \text{ м/хв};$
 $F = 0.2 \text{ мм/об};$
 $\Delta Z = 0.7 \text{ мм}.$

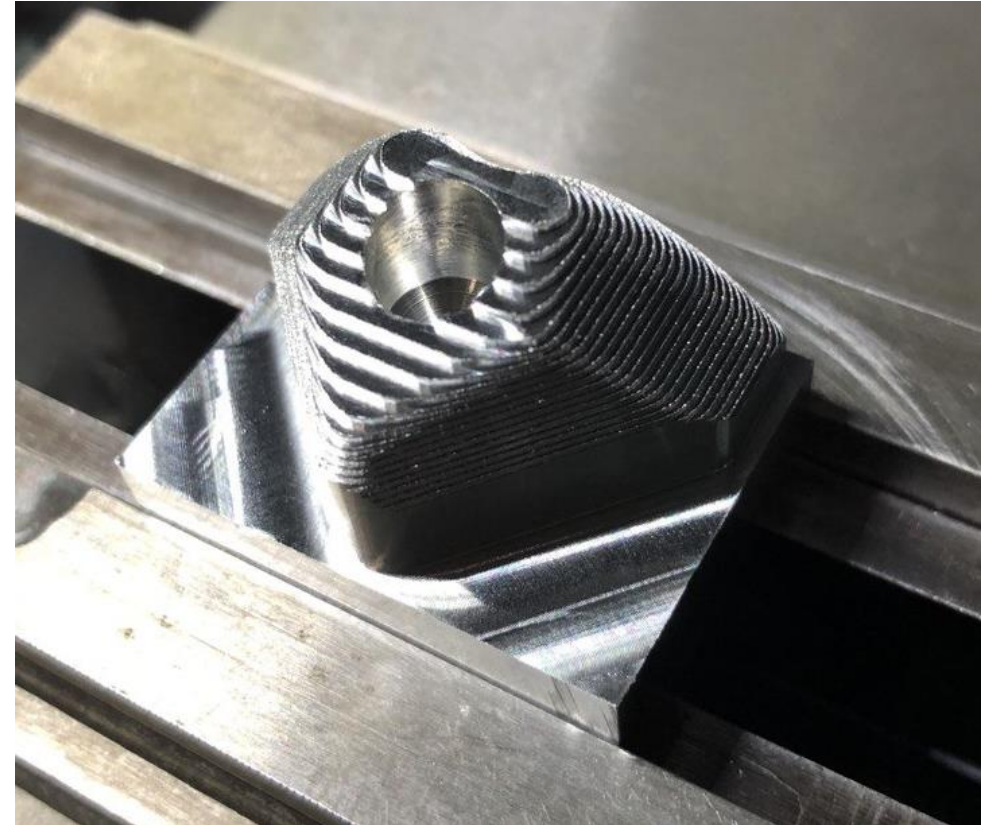
Чистова обробка:
 $D = 4 \text{ мм}; R = 2 \text{ мм};$
 $V = 130 \text{ м/хв};$
 $F = 0.1 \text{ мм/об};$
 $\Delta Z = 0.1 \text{ мм}.$

Вертикально-фрезерний
оброблюючий центр
DOOSAN DNM 4500

Проведення експериментальних досліджень



Модель заготовки після чорнової
обробки, що отримана в системі
SolidCAM



Заготовка після чорнової
обробки на оброблюючому
центрі

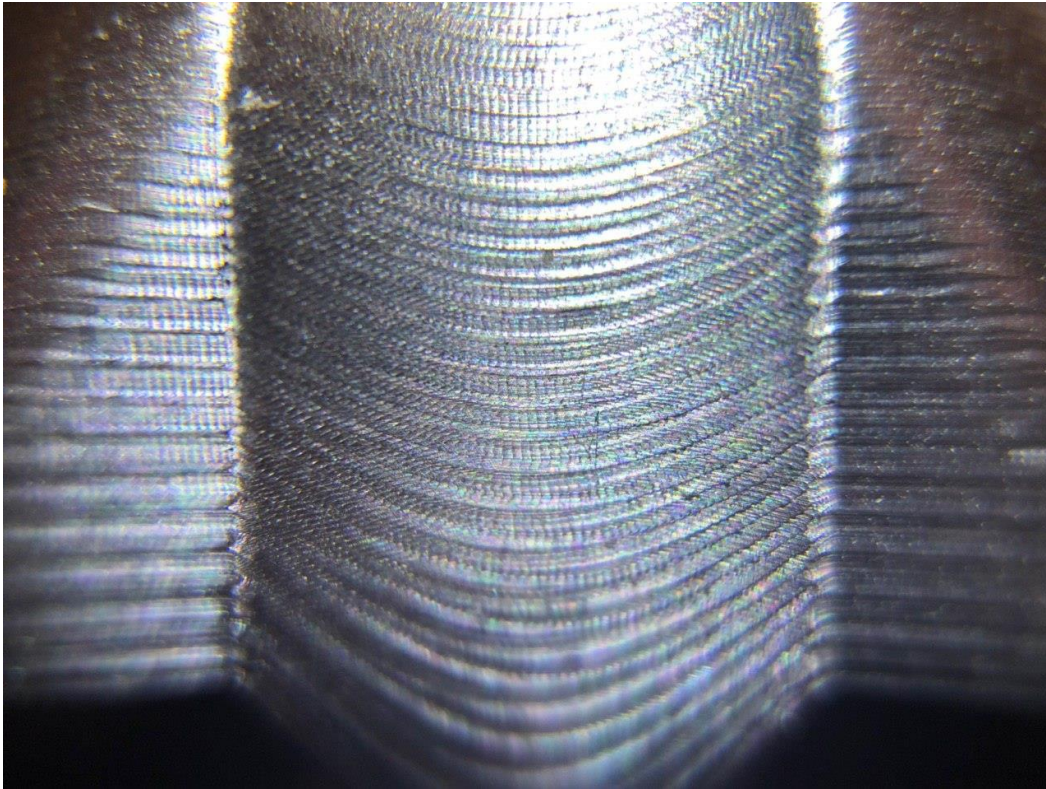


Координатно-вимірювальна
машина ZEISS Duramax



Профілограф MarSurf PS1

Лінійна траєкторія



Зображення поверхні
після обробки

№	Номинальне значення	Траєкторія - Лінійна	
		Реальне значення	Відхилення від ном.
1	80°0'0"	79°59'2"	-0°0'58"
2	89°10'44"	89°12'41"	0°1'57"
3	135°23'25"	135°24'32"	0°1'7"
4	135°23'25"	135°24'16"	0°0'51"
5	19°0'0"	19°0'47"	0°0'47"
6	21°38'2"	21°33'13"	-0°4'49"
7	0 мм	0,0041 мм	0,0041 мм
8	0 мм	0,0020 мм	0,0020 мм
9	0 мм	0,0030 мм	0,0030 мм
10	0 мм	0,0056 мм	0,0056 мм
11	0 мм	0,0011 мм	0,0011 мм
12	25 мм	25,0110 мм	0,0110 мм
13	25 мм	25,0108 мм	0,0108 мм
14	2 мм	2,0066 мм	0,0066 мм
15	0 мм	0,0057 мм	0,0057 мм
16	0 мм	0,0078 мм	0,0078 мм
17	Ra 2.5	Ra 0.929	-
18	Ra 2.5	Ra 0.891	-
19	n хв m сек	12 хв 17 сек	-

Відхилення
кутів

Відхилення
площинності

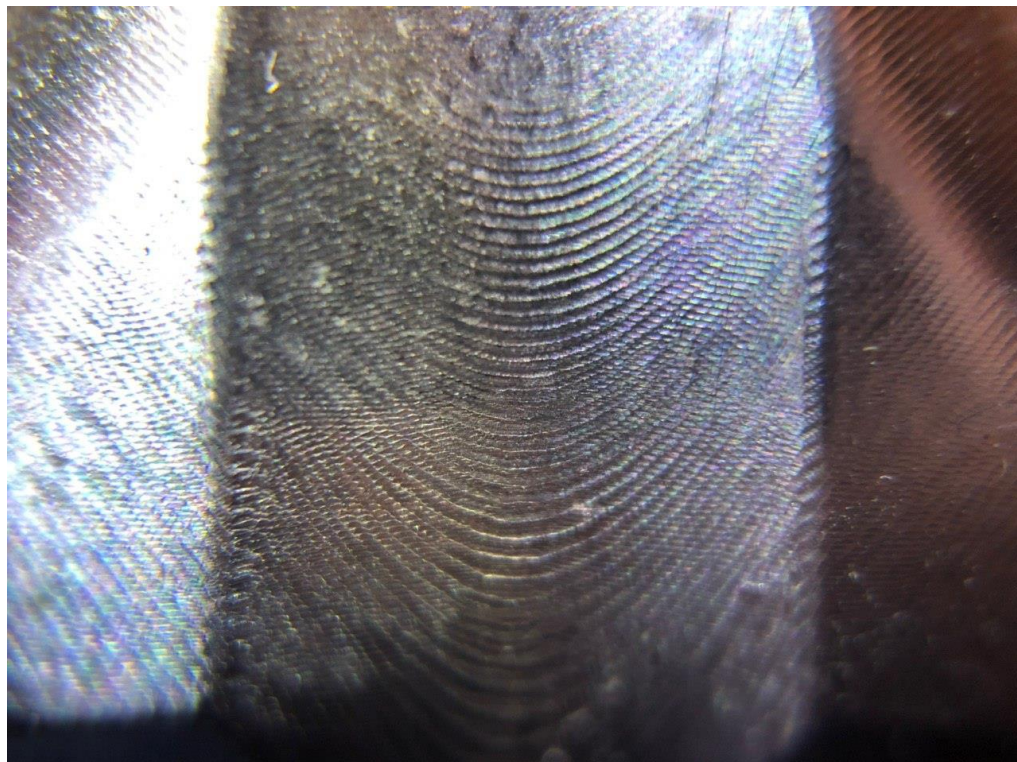
Відхилення
радіусів

Відхилення
форми

Шорсткість

Час
обробки

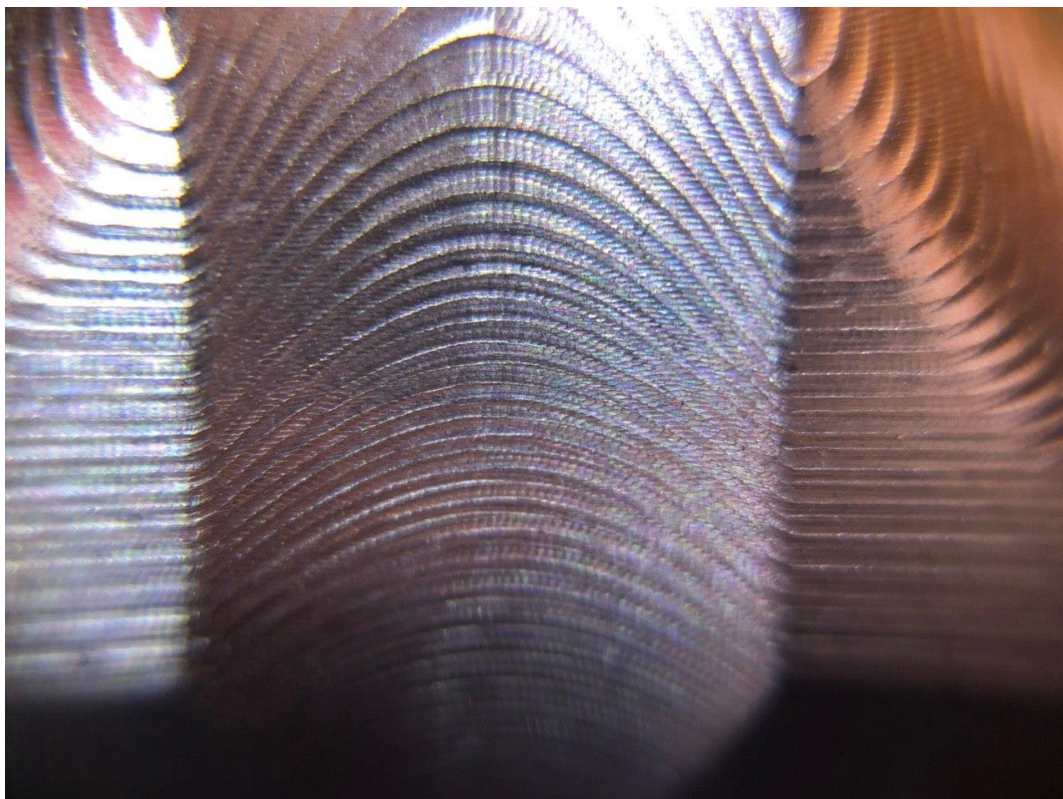
Спіральна траєкторія



Зображення поверхні
після обробки

№	Номінальне значення	Траєкторія - Лінійна		
		Реальне значення	Відхилення від ном.	
1	80°0'0"	79°58'31"	-0°1'29"	Відхилення кутів
2	89°10'44"	89°12'17"	0°1'33"	
3	135°23'25"	135°19'56"	-0°3'29"	
4	135°23'25"	135°24'38"	0°1'12"	
5	19°0'0"	19°7'3"	0°7'3"	
6	21°38'2"	21°19'39"	-0°8'23"	
7	0 мм	0,0038 мм	0,0038 мм	Відхилення площинності
8	0 мм	0,0050 мм	0,0032 мм	
9	0 мм	0,0095 мм	0,0095 мм	
10	0 мм	0,0074 мм	0,0074 мм	
11	0 мм	0,0039 мм	0,0039 мм	
12	25 мм	25,0156 мм	0,0156	Відхилення радіусів
13	25 мм	25,0149 мм	0,0149	
14	2 мм	2,0066 мм	0.0066 мм	Відхилення форми
15	0 мм	0,0054 мм	0,0054 мм	
16	0 мм	0,0102 мм	0,0102 мм	
17	Ra 2.5	Ra 0.846	-	Шорсткість Час обробки
18	Ra 2.5	Ra 0.825	-	
19	n хв m сек	11 хв 12 сек	-	

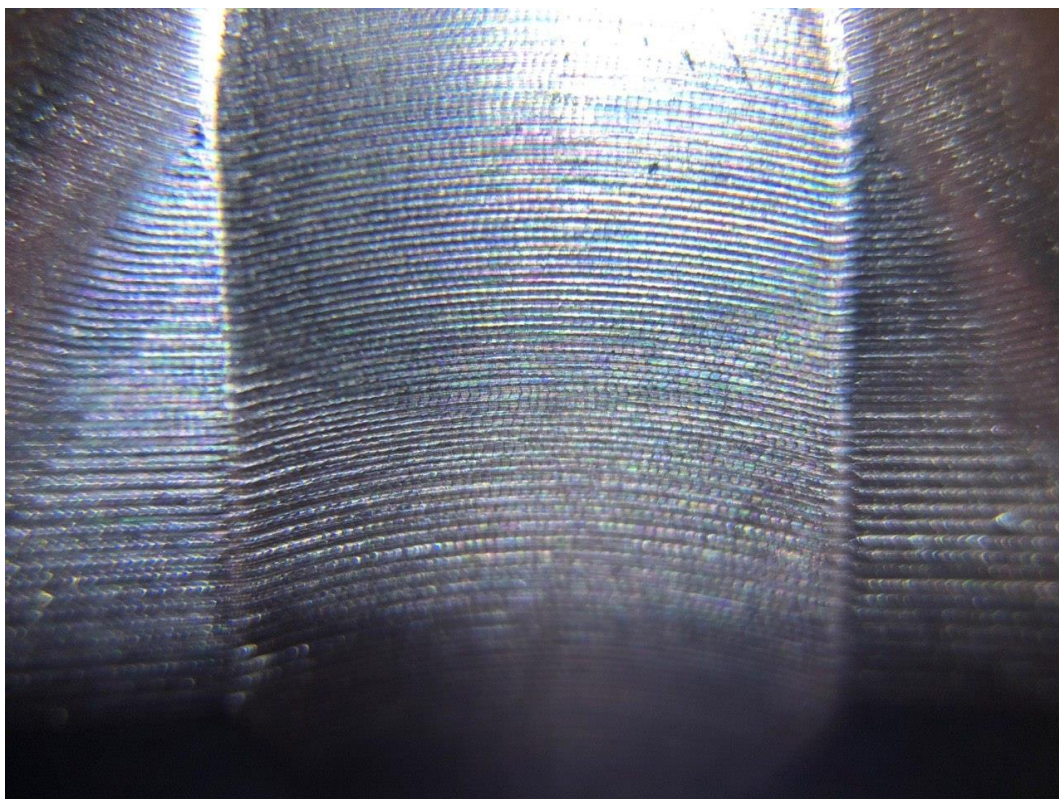
Растрова траєкторія



Зображення поверхні
після обробки

№	Номинальне значення	Траєкторія - Лінійна		
		Реальне значення	Відхилення від ном.	
1	80°0'0''	79°58'47''	-0°1'13''	Відхилення кутів
2	89°10'44''	89°11'36''	0°0'52''	
3	135°23'25''	135°24'58''	0°1'33''	
4	135°23'25''	135°24'46''	0°1'21''	
5	19°0'0''	19°3'15''	0°3'15''	
6	21°38'2''	21°32'6''	-0°5'56''	
7	0 мм	0,0044 мм	0,0044 мм	Відхилення площинності
8	0 мм	0,0055 мм	0,0055 мм	
9	0 мм	0,0030 мм	0,0030 мм	
10	0 мм	0,0081 мм	0,0081 мм	
11	0 мм	0,0035 мм	0,0035 мм	
12	25 мм	25,0234 мм	0,0234	Відхилення радіусів
13	25 мм	24,0230 мм	0,0230	
14	2 мм	2,0106 мм	0.0106 мм	Відхилення форми
15	0 мм	0,0054 мм	0,0054 мм	
16	0 мм	0,0099 мм	0,0099 мм	Шорсткість Час обробки
17	Ra 2.5	Ra 0.916	-	
18	Ra 2.5	Ra 0.617	-	
19	n хв m сек	13 хв 25 сек	-	

Траєкторія по ватерлініям



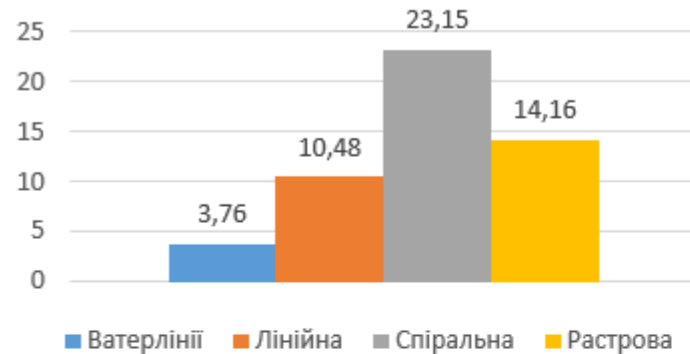
Зображення поверхні
після обробки

№	Номинальне значення	Траєкторія - Лінійна		
		Реальне значення	Відхилення від ном.	
1	80°0'0''	79°59'8''	-0°0'52''	Відхилення кутів
2	89°10'44''	89°11'25''	0°0'40''	
3	135°23'25''	135°23'59''	0°0'34''	
4	135°23'25''	135°24'8''	0°0'42''	
5	19°0'0''	19°0'53''	0°0'53''	
6	21°38'2''	21°37'57''	-0°0'5''	
7	0 мм	0,0021 мм	0,0021 мм	Відхилення площинності
8	0 мм	0,0015 мм	0,0015 мм	
9	0 мм	0,0033 мм	0,0033 мм	
10	0 мм	0,0039 мм	0,0039 мм	
11	0 мм	0,0010 мм	0,0010 мм	
12	25 мм	25,0102 мм	0,0102 мм	Відхилення радіусів
13	25 мм	25,0110 мм	0,0110 мм	
14	2 мм	2,0030 мм	0.0030 мм	Відхилення форми
15	0 мм	0,0036 мм	0,0036 мм	
16	0 мм	0,0026 мм	0,0026 мм	Шорсткість Час обробки
17	Ra 2.5	Ra 0.542	-	
18	Ra 2.5	Ra 0.963	-	
19	n хв m сек	10 хв 33 сек	-	

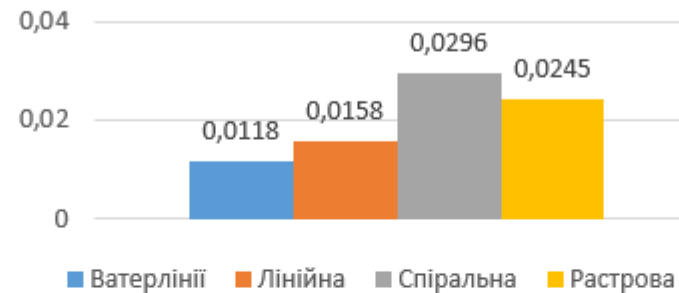
Порівняння результатів дослідження

17

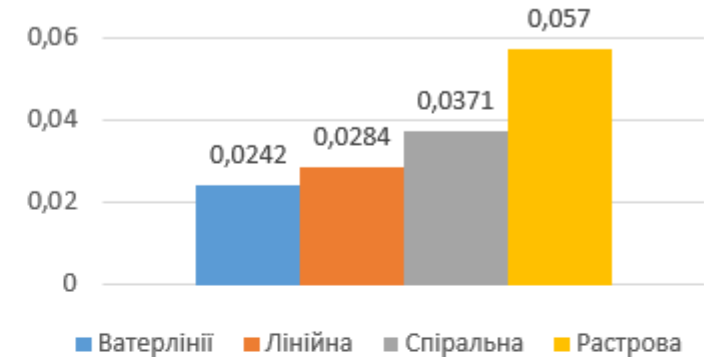
I. Відхилення кутів (град.)



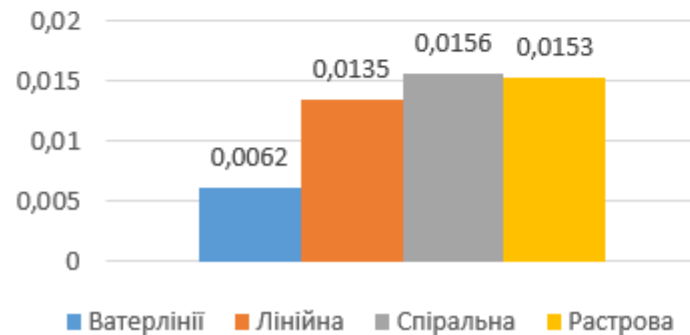
II. Відхилення площинності (мм)



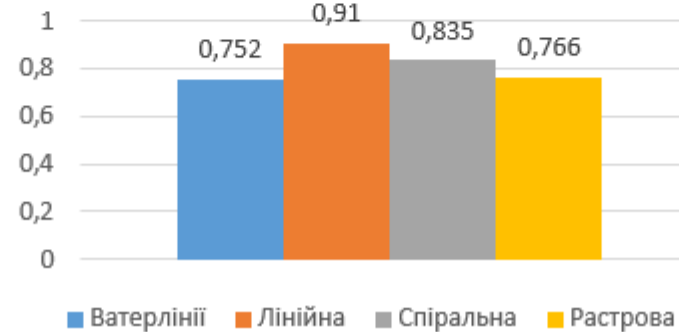
III. Відхилення радіусів (мм)



IV. Відхилення форми (мм)



V. Значення шорсткості



VI. Час обробки (хв)



Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних даних

18

Час обробки

Траєкторія	Теоретичне значення	Фактичне значення
Лінійна	9 хв 2 сек	12 хв 17 сек
Спіральна	7 хв 51 сек	11 хв 12 сек
Растрова	8 хв 38 сек	13 хв 25 сек
Ватерлінії	8 хв 42 сек	10 хв 33 сек

Шорсткість

Траєкторія	Теоретичне значення	Фактичне значення
Лінійна	0,630	0,910
Спіральна	0,630	0,835
Растрова	0,630	0,766
Ватерлінії	0,630	0,752

Рекомендації за результатами аналізу

19

Тип поверхні	Метод формування траєкторії				Результат (кращий)
	Лінійний	Спіральний	Растровий	По ватерлініям	
Під малим кутом	+	Н	+	-	Лінійний / растровий
Під великим кутом	Н	-	Н	+	По ватерлініям
Радіусна поверхня	-	+	-	+	Спіральний / по ватерлініям
Стики між поверхнями	+	+	-	Н	Лінійний / спіральний

«+» – позитивний результат;
«Н» – нейтральний результат;
«-» – негативний результат;

- проведено аналіз сучасного стану питання дослідження;
- визначено переваги та недоліки різних траєкторій руху інструменту;
- запропоновано методику створення керуючих програм для верстатів з ЧПК в системі SolidCAM для оброблення складнопрофільних деталей;
- проведено експериментальні дослідження впливу траєкторій руху різального інструменту на точність обробки складнопрофільних деталей;
- на основі проведеного аналізу експериментальних досліджень запропоновано методику створення планів вимірювання складнопрофільних деталей в системі ZEISS Calypso;
- розроблено стартап-проект та встановлено можливість його реалізації та впровадження на ринку.