

УДК 621.914:004.896

doi: 10.32620/aktt.2023.2.03

М. В. ФІЛІПОВА, М. О. ДЕМЧЕНКО, Д. О. СМОЛЬНИКОВ,
Н. В. БЕЗУГЛА, Г. А. БОГДАН

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Предметом дослідження є методи та засоби визначення впливу траєкторії руху інструменту на формування об'єму деталей складної форми. **Метою** є підвищення якості та точності виготовлення поверхонь деталей складного профілю після механічної обробки на оброблювальних центрах з ЧПК, шляхом вибору оптимальної стратегії обробки. **Завдання:** провести аналіз існуючих методів обробки деталей складного профілю на оброблювальних центрах з ЧПК; обґрунтувати вибір оптимальної стратегії обробки поверхні деталі. Використовуваними **методами** є: методи управління точністю обробки складних поверхонь, графічні методи формування траєкторії руху інструменту, механічні методи вимірювання геометричних розмірів. Отримані такі **результати**. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз існуючих методів та стратегій обробки поверхонь складного профілю та проведено адаптацію наявного досвіду в розробці керуючих програм, з використанням автоматизованих методів із застосуванням CAD / CAM систем. Як результат, в якості основного інструменту моделювання для створення деталі зі складним профілем було обрано CAD систему SolidWorks. Траєкторію руху інструменту створено за допомогою CAM систему SolidCAM, яка підтримує різні стратегії обробки таких елементів. З використанням розроблених керуючих програм за методами лінійної траєкторії, растрової траєкторії, спіральної траєкторії та траєкторії по ватерлініям, проведено експериментальне дослідження впливу траєкторії руху інструменту на точність обробки поверхонь, що розташовуються під різними кутами до осі обробки. Оцінено відхилення геометричних розмірів деталей, отриманих в результаті обробки за програмами, які сформовані різними методами, від величини реальних значень характеристик моделі. **Висновки**. На основі проведеного аналізу стратегій обробки деталей складного профілю визначено оптимальні траєкторії руху інструменту для деталей з такими поверхнями, як: під малим кутом, під великим кутом, радіусної поверхні та стики між поверхнями. Отримані результати експериментальних досліджень дозволили сформулювати рекомендації, що допоможуть створювати керуючі програми обробки деталей складної форми найбільш оптимальними. Вибір оптимальної траєкторії обробки деталей дозволить підвищити точність обробки на чистових операціях.

Ключові слова: траєкторія руху інструмента; метод формування траєкторії; об'ємне фрезерування; ЧПК; CAD/CAM система.

Вступ

Сучасний розвиток техніки і технологій в області металообробки, при зростаючій тенденції до підвищення точності і якості продукції, що виготовляється, призводить до підвищення вимог щодо точності та якості обробки поверхонь виробів.

Ефективність виготовлення виробів зі складним профілем поверхонь залежить від технічних можливостей верстатного устаткування, засобів технічної підготовки виробництва і способів управління рухом інструменту та оброблюваної заготовки, для отримання заданої точності та якості поверхні деталі 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 щодо точності обробки поверхонь деталей.

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

Тому 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.

1. Постановка задач

Основним засобом автоматизації механічної обробки є оброблювальні центри з ЧПК. Підвищення ефективності використання такого обладнання може бути досягнуто за рахунок підвищення точності обробки, 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 обробляючих центрах з ЧПК кінцевими циліндричними і радіусними фрезами [1].

Вагомим фактором, який 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 та точність обробки поверхонь виробів. Це відбувається через недостатнє 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 мало використовуються [2].

На точність обробки деталей впливають переважно ті деформації системи, які змінюють відстань між різальною кромкою інструмента і оброблюваною поверхнею, тобто деформації, спрямовані по нормалі 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].

Особливо важливо враховувати який саме тип фрезерування буде використовуватися: зустрічний чи попутний. Попутне фрезерування характеризується тим, що напрямок руху заготовки і вектор 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. В парі інструмент – деталь сили різання притискають заготовку до столу верстата, а при використанні збірного інструменту сили різання сприяють більш надійному кріпленню ріжучих пластин в гніздах корпусу інструменту. 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. Тому стружка налипає на ріжучу кромку і перешкоджає її роботі в наступний момент врізання, це може привести до заклинювання стружки між пластиною і заготовкою та, відповідно, до пошкодження пластини [1, 3].

Багатокоординатна обробка деталей з поверхнями складного профілю характеризується безперервною зміною параметрів різання, а саме параметрів припуску, який видаляється, та перетинів шарів, які знімаються, 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.

2. Мета дослідження

Проведений аналіз показав важливість врахування траєкторії руху інструмента відносно деталі, що впливає на формування поверхонь на чистових операціях фрезерної обробки. Траєкторія переміщення фрези в поєднанні з напрямком її обертання впливає на зміну геометрії зони різання та точність обробки відповідно до заданого допуску. Тому метою даного дослідження є підвищення якості та точності виготовлення поверхонь деталей складного

профілю після механічної обробки на оброблювальних центрах з ЧПК шляхом вдосконалення стратегії обробки

3. Аналіз стратегій обробки поверхонь складного профілю

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

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 керуючих програм, є автоматизований метод із застосуванням CAD / CAM систем. Застосування даного методу дозволяє задавати технологічні параметри обробки, створювати траєкторії руху інструменту, генерувати керуючу програму в кодах конкретного верстата [6, 7].

Необхідність програмування більш складних траєкторій переміщення виникає тоді, коли обґрунтований вибір діаметра застосовуваної фрези не перекриває ширину оброблюваної поверхні [8].

CAM-системи дозволяють розрахувати траєкторії руху інструменту при обробці окремих ділянок поверхні різними схемами [9]. Найбільш поширеними стратегіями обробки поверхонь при фрезеруванні торцевими і кінцевими фрезами є зигзаг, спіраль, петля та інші.

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 кромки на торці фрези.

Зняття припуску по спіралі або за еквідистантою 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 виді-

лити підвищене число допоміжних ходів, що призводить до зниження продуктивності.

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 кромки в кожен момент повороту зуба [1, 5].

В якості основного інструменту для моделювання обрано CAM систему SolidCAM від компанії SolidCAM Ltd (США). SolidCAM підтримує різні стратегії обробки таких елементів, як контур, вибірка і паз.

Для проведення експериментального дослідження запроєктовано деталь, що показана на рис. 1. Вибір даної деталі ґрунтується на спрямованих поверхнях та граней, наявності отворів та радіусів закруглення.

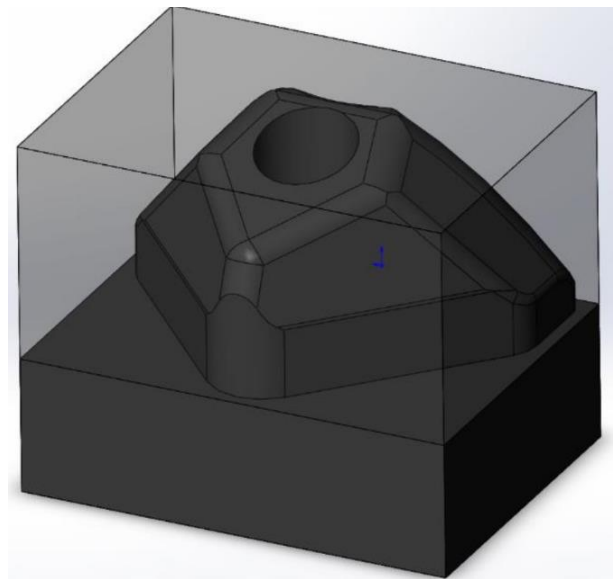


Рис. 1 Модель деталі в програмі SolidCAM

Створення траєкторії руху в програмі SolidWorks в модулі SolidCAM для обраної деталі відбувалося наступним чином. Створюються переходи відповідно до розробленого заздалегідь технологічного процесу обробки даної деталі, що показані в таблиці 1. Три перші переходи будуть однаковими для всіх варіантів обробки. Для правильної інтерпретації керуючої програми постпроцесором, вказано всі інструменти, що будуть використовуватися при обробці, та попередньо розрахованих режимів різання для кожного інструменту. Після внесення всіх необхідних даних та введення параметрів обробки, програма

формує траєкторії 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.

Таблиця 1
Технологічний процес обробки деталі

Перехід	Інструмент
1. Центрування	Свердло центральне (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)

Для визначення оптимальної стратегії обробки поверхні деталі було проведено моделювання з різними видами траєкторії переміщення інструменту. В модулі SolidCam HSS було обрано методи обробки деталі, що набули найширшого використання: лінійна траєкторія; растрова траєкторія; спіральна траєкторія; траєкторія по ватерлініям.

Для створення переходу чистового фрезерування та формування траєкторій кожним з обраних методів обираємо та задаємо всі необхідні технологічні параметри. Зображення сформованих траєкторій представлені на рис. 2-5.

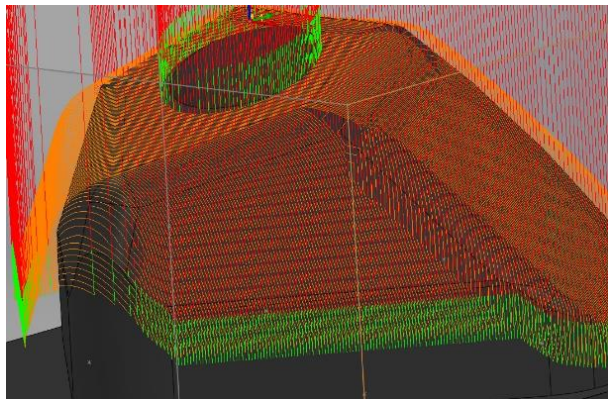


Рис. 2. Загальний вигляд лінійної траєкторії обробки

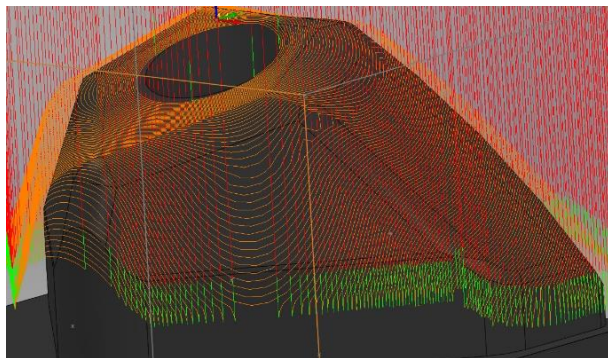


Рис. 3. Загальний вигляд спіральної траєкторії обробки

Чорновий перехід виконується тризубою кінцевою фрезою: діаметр фрези $D = 6$ мм, швидкість різання $V = 110$ м/хв, частота обертання шпинделя $S = 6000$ об/хв, подача $F = 1200$ мм/хв, крок по осі Z $IZ = 0,7$ мм, припуск на стінку $Z = 0,1$ мм.

Чистова обробка виконується радіусною фрезою: діаметр фрези $D = 4$ мм, радіус $R = 2$ мм, швидкості різання $V = 130$ м/хв, кількість обертів шпинделя $S = 10350$ об/хв, подача $F = 1035$ мм/хв, для кожної стратегії крок інструменту $Z = 0,1$ мм.

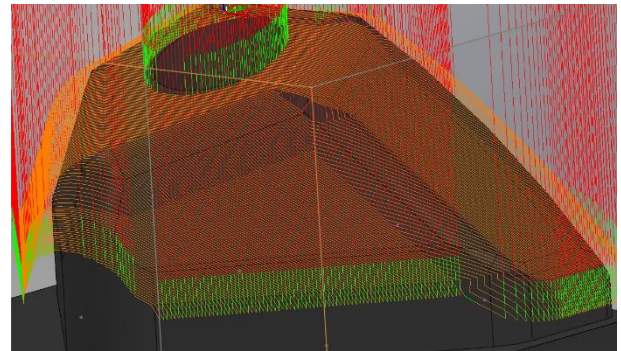


Рис. 4. Загальний вигляд растрової траєкторії обробки

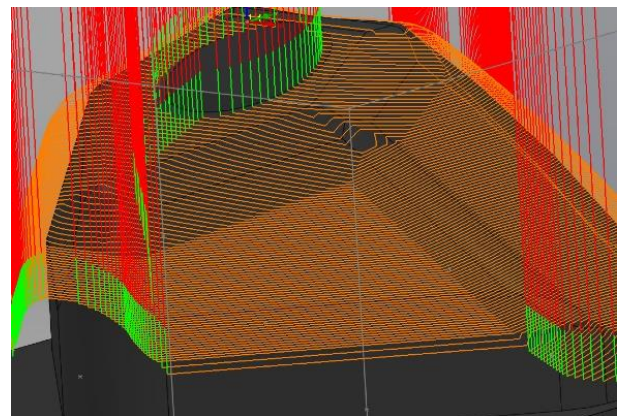


Рис. 5. Загальний вигляд траєкторії обробки по ватерлініям

Таким чином отримуємо в програмі траєкторії руху у вигляді керуючої програми для кожного, з обраних методів обробки. Керуюча програма представляється у вигляді команд, а саме G-код. Сформовані керуючі програми, містять дані про всі переміщення, які має виконати інструмент, відомості про сам інструмент, режими різання, а також допоміжну інформацію, яку може використати оператор оброблювального центра при проведенні наладки верстата та підготовки до обробки.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався вертикально-фрезерний оброблювальний центр з ЧПК DOOSAN DNM 4500 з системою управління Fanuc, для механічної обробки деталей з високою точністю і продуктивністю. Наявність

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

Вимірювання геометричних розмірів оброблених деталей проводилося на координатно-вимірювальній машині ZEISS DuraMax. Вимірювальний шуп для вимірювальної головки ZEISS VAST XXT представляє собою рубінову сферу з довжиною ніжки 20 мм.

Аналіз точності обробки відповідно до закладених в програмі проводиться за характеристиками, що наведені в таблиці 2.

Для дослідження обрано критерії, за якими буде відбуватися проведення аналізу результатів обробки поверхонь складного профілю за різними траєкторіями. Аналіз результатів проводиться за реальними значеннями характеристик, попередньо розбивши їх на групи, що представлені в таблиці 3.

4. Аналіз результатів експериментального дослідження

В результаті проведення експерименту отримані значення параметрів точності і величина реального

значення характеристики приведена як середнє значення за результатами вимірювання 20 зразків по 3 вимірювання на кожний зразок для кожного з обраних методів). Порівняльний аналіз результатів всіх методів, що використовувалися при проведенні експериментів приведений в таблиці 4.

На основі проведеного аналізу експериментальних даних (таблиця 4) можна зробити висновок, що формування траєкторії переміщення інструменту лінійним методом дає гарні результати точності і якості обробки поверхні. Перевагою даного методу є його обробка поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис. 6) та якість утворених стиків між різними поверхнями (рис. 7).

Таблиця 3

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

Таблиця 2

Характеристики для аналізу

№	Характеристика	Номинальне 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

Таблиця 4

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

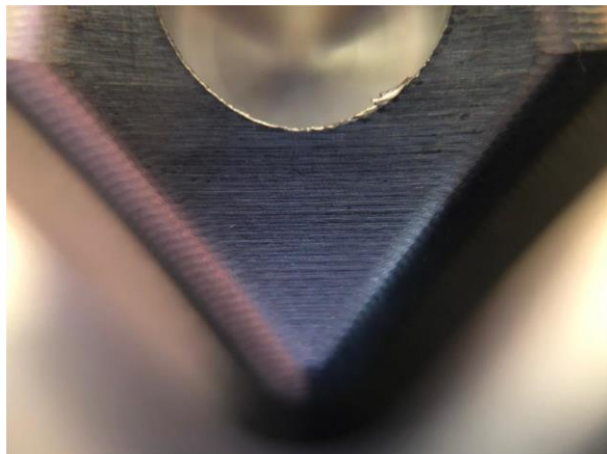


Рис. 6. Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом лінійних траєкторій

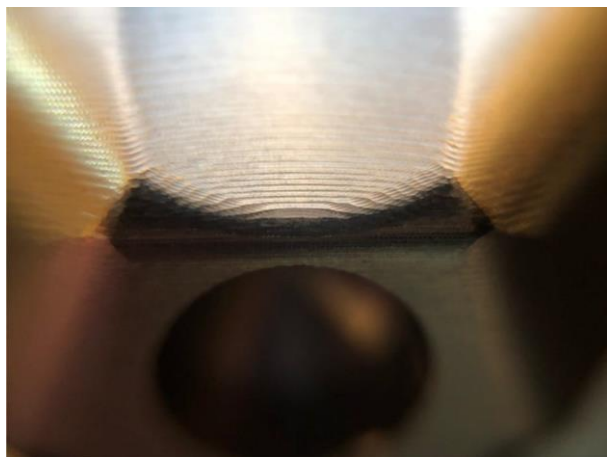


Рис. 7. Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом лінійних траєкторій

Якість обробки поверхонь, що розташовані під великим кутом обробки, показала середній результат (рис. 8). Недоліком даного методу є його використання при обробці радіусних поверхонь (рис. 9).

Метод формування траєкторій руху інструменту по спіралі загалом показав найгірший результат з

огляду на точність обробки. Перевагою цього методу є обробка радіусних поверхонь (рис. 10) та висока якість стиків між поверхнями (рис. 11). Задовільною є якість обробки поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис. 12).



Рис. 8. Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом лінійних траєкторій

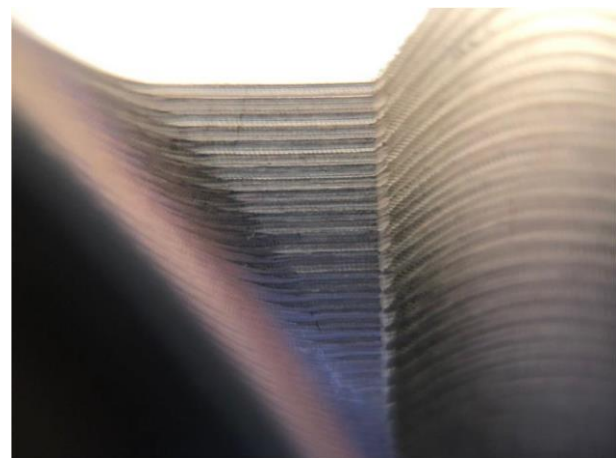


Рис. 9. Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом лінійних траєкторій

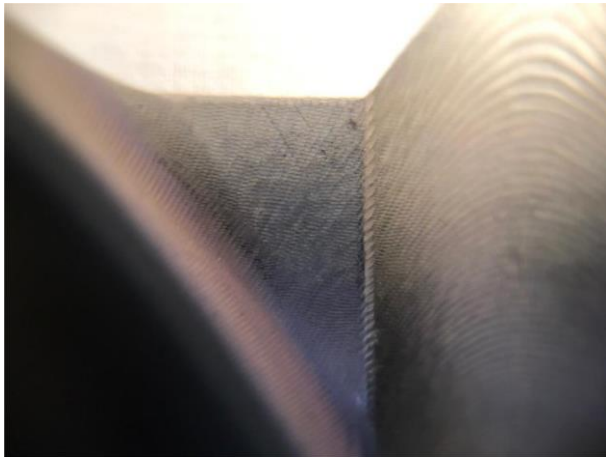


Рис. 10. Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом спіральних траєкторій

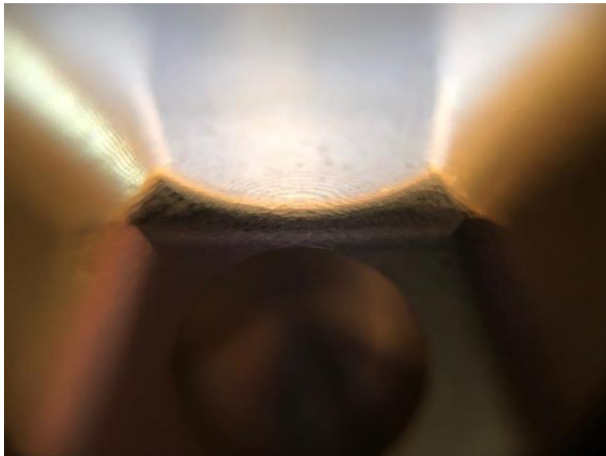


Рис. 11. Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом лінійних траєкторій

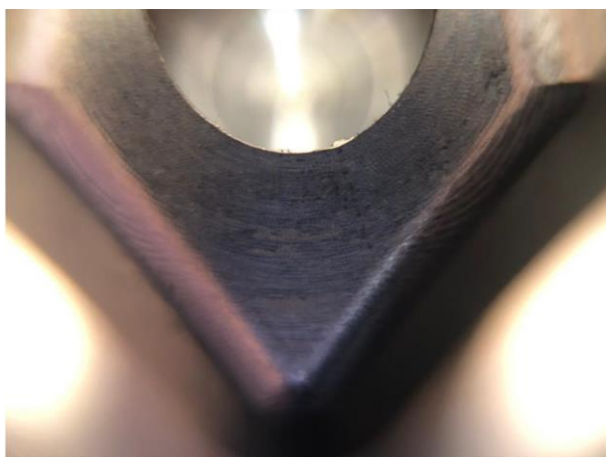


Рис. 12. Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом спіральних траєкторій

Величезним недоліком виявилася 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 рис. 13.

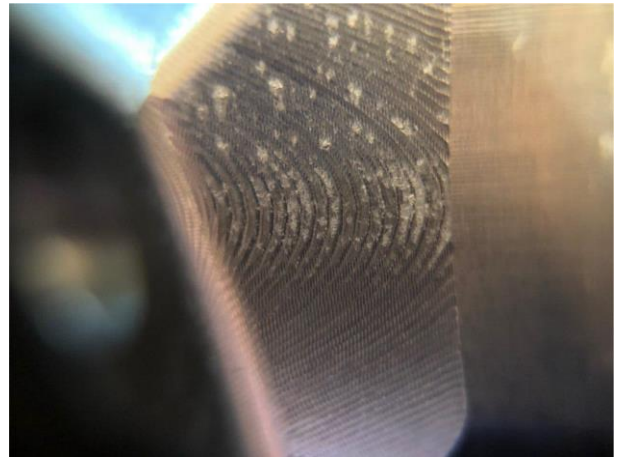


Рис. 13. Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до осі обробки, яка була сформована методом спіральних траєкторій

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. 14). Задовільною є якість обробки поверхонь, що розташовані під великим кутом відносно осі обробки (рис.15).

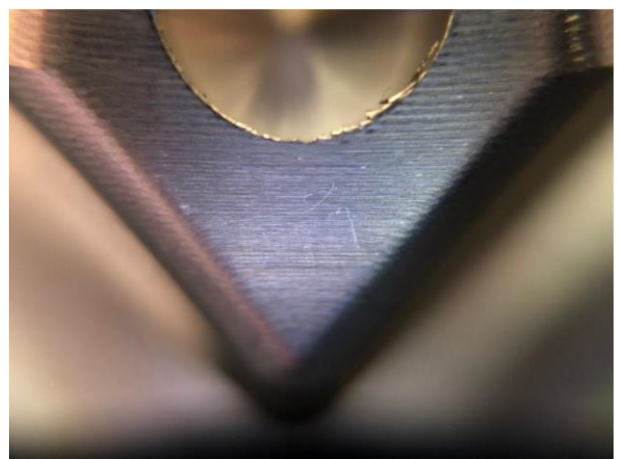


Рис. 14. Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до поверхні обробки, яка була сформована методом растрових траєкторій

Недоліком растровій траєкторії є якість обробки радіусних поверхонь (рис. 16), а великим недоліком способу растрових траєкторій є якість стиків між поверхнями (рис. 17).

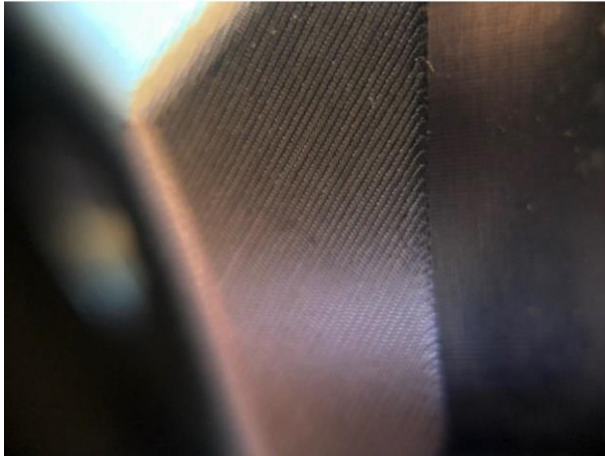


Рис. 15. Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до осі обробки, яка була сформована методом растрових траєкторій

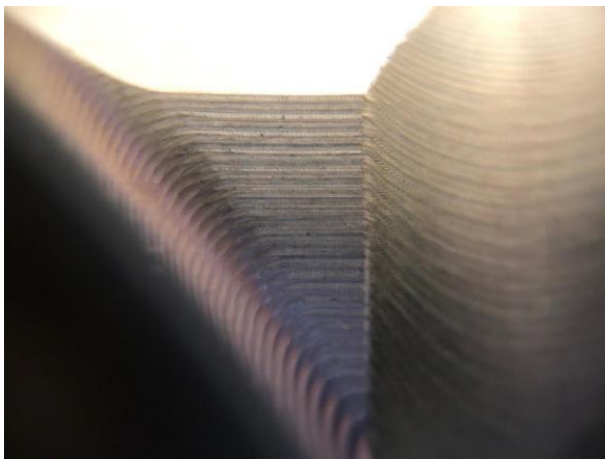


Рис. 16. Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом растрових траєкторій

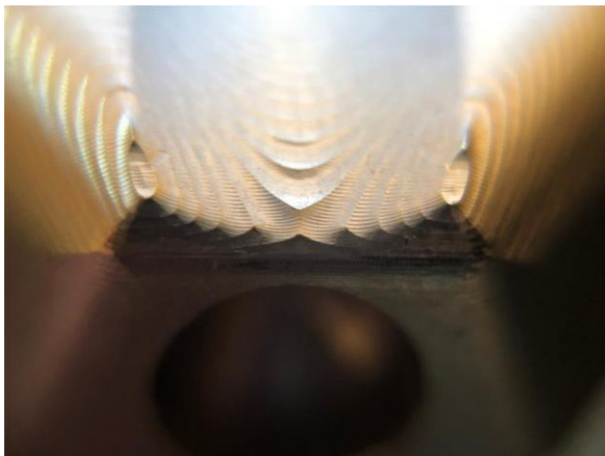


Рис. 17. Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом растрових траєкторій

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 18. Високу якість мають також радіусні поверхні (рис. 19).

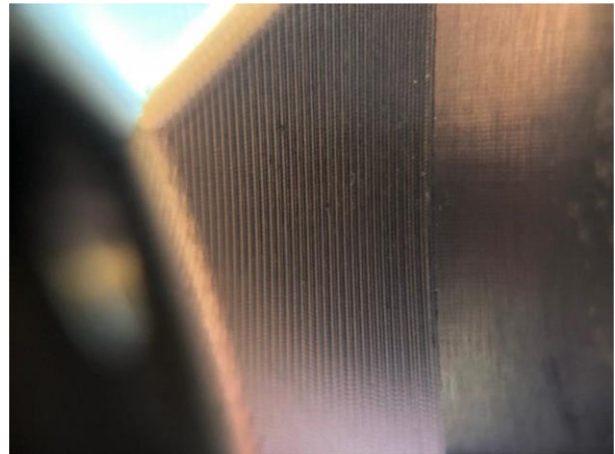


Рис. 18. Зображення поверхні, що розташована під великим кутом до осі обробки, яка була сформована методом траєкторій по ватерлініям

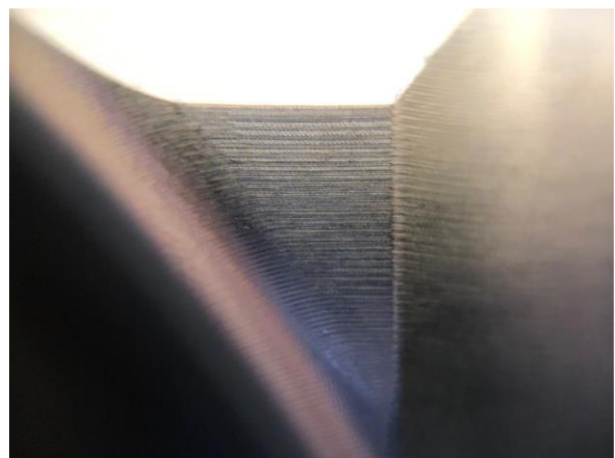


Рис. 19. Зображення радіусної поверхні, яка була сформована методом траєкторій по ватерлініям

Задовільний результат показала якість стиків між поверхнями (рис. 20). Недоліком даного методу є якість поверхонь, що розташовані під малим кутом до осі обробки (рис. 21).

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 4.

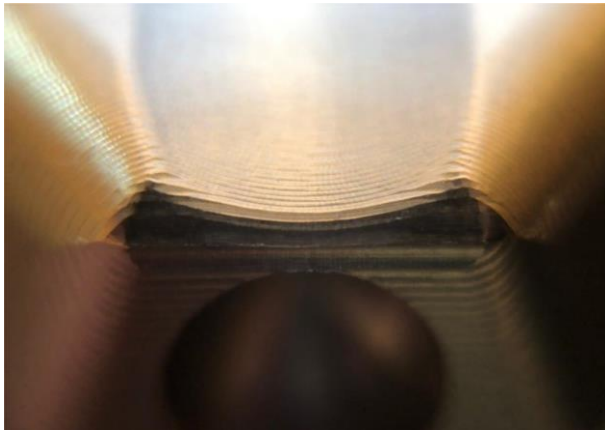


Рис. 20. Зображення стиків між поверхнями, які були сформовані методом траєкторій по ватерлініям

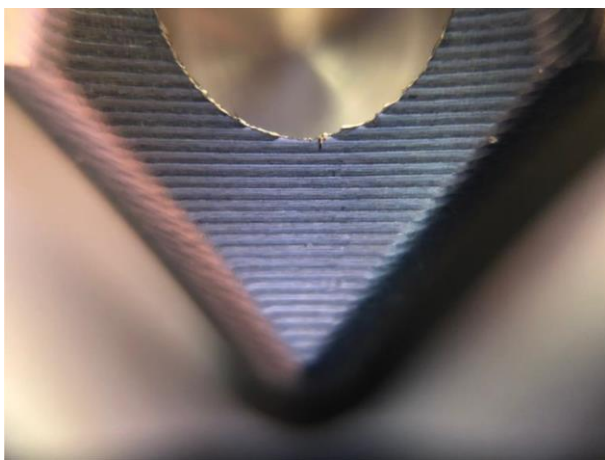


Рис. 21. Зображення поверхні, що розташована під малим кутом до осі обробки, яка була сформована методом траєкторій по ватерлініям

З огляду на результати порівняння різних методів, слід зазначити, що найкращого результату можна досягти, формуючи комбіновані траєкторії руху інструменту, враховуючи дані з таблиці 5, яка показує переваги кожного з методів.

Тому слід враховувати наступні рекомендації 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.

Отримані результати експериментальних досліджень дозволили сформулювати рекомендації, що допоможуть створювати керуючі програми обробки деталей складної форми найбільш оптимальними. Вибір вірної траєкторії обробки деталей дозволить підвищити точність обробки на чистових операціях.

Висновок

Виготовлення деталей зі складним профілем поверхонь 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 на оброблювальних центрах з ЧПК.

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

На основі проведеного дослідження стратегій обробки деталей складного профілю визначено оптимальні траєкторії руху інструменту для деталей з такими типами поверхонь, як: під малим кутом, під великим кутом, радіусної поверхні та стики між поверхнями. Комбінування даних методів формування

Таблиця 5

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

траєкторії руху інструменту при фрезеруванні дозволяє підвищити точність обробки на чистових операціях. Отримані результати можуть бути використані в подальших дослідженнях формоутворення деталей складної форми при їх виготовленні на верстатах з ЧПК з вибором оптимальної траєкторії руху інструменту.

Внесок авторів: формування проблеми – **М. В. Філіппова**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **Г. А. Богдан**; аналіз стратегій обробки поверхонь складного профілю – **М. О. Демченко**; створення моделі деталі та аналіз її характеристик – **М. В. Філіппова**; формування керуючої програми – **Д. О. Смольников**; отримання результатів експериментальних досліджень – **Н. В. Безугла**, **Д. О. Смольников**; аналіз результатів дослідження – **М. О. Демченко**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Дослідження точності технологічного процесу обробки типових мікромеханічних компонентів [Текст] / В. О. Остаф'єв, І. М. Діордица, С. Ф. Петренко, М. В. Філіппова // Вісник Національного технічного університету України. Серія Приладобудування. - 2006. - № 32. - С. 83-89.

2. Вислоух, С. П. Математичне моделювання параметрів технологічних процесів механічної обробки деталей приладів [Текст] / С. П. Вислоух, О. В. Волошко // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. - 2005. - № 29. - С. 63-67.

3. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing [Text] / I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker. - Springer Science + Business Media, 2019. - 459 p.

4. Ethem, K. A novel tool path planning and feedrate scheduling algorithm for point to point linear and circular motions of CNC-milling machines [Text] / K. Ethem, K. Selcuk // Journal of Manufacturing Processes. - 2023. - Vol. 95. - P. 53-67. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.003.

5. Petrakov, Y. Accuracy control of contour milling on CNC machines [Text] / Y. Petrakov, D. Shuplietsov // Mechanics and Advanced Technologies. - 2018. - Vol. 83, no. 2. - P. 51-56. DOI: 10.20535/2521-1943.2018.83.132223.

6. Kumar, A. Effects of Process Parameters on Surface Roughness in Incremental Sheet Forming [Text] / A. Kumar, V. Gulati, P. Kumar // Materials Today: Proceedings. - 2018. - Vol. 5. - P. 28026-28032. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.043.

7. Design and fabrication of 3-axis CNC milling machine using additive manufacturing. [Text] / K. Jitendra, S. Sagar, T. Skand, S. Vishal, P. Shiva // Materials Today: Proceedings. - 2022. - Vol. 68, no. 6. - P. 2443-2451. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.145.

8. Petrakov, Y. Technology for Programming Contour Milling on a CNC Machine [Text] / Y. Petrakov, V. Korenkov, A. Myhovych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2022. - Vol. 2, no. 1 (116). - P. 55-61. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.

9. Tsukanov, R. Designing of non circular air intakes for subsonic gas-turbine engines [Text] / R. Tsukanov // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2022. - № 6. - С. 4-14. DOI: 10.32620/aktt.2022.6.01.

References

1. Ostafev, V. A., Dyordytsa, Y. M., Petrenko, S. F. and Fylyppova, M. V. Doslidzhennia tochnosti tekhnolohichnoho protsesu obrobky typovykh mikromekhanichnykh komponentiv [Process Accuracy Study of Typical Micromechanical Components]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy. Seriya Pryladowbuduvannia, 2006, no. 32, pp. 83-89.

2. Vysloukh, S. P. and Voloshko, O. V. Matematychnе modeliuвання parametriv tekhnolohichnykh protsesiv mekhanichnoi obrobky detalei pryladiv [Mathematical model of parameter technological processes of mechanical machining of instrument parts]. Visnyk NTUU „KPI”. Seriya pryladobuduvannia, 2005, no. 29, pp. 63-67.

3. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufactu. Springer Science + Business Media Publ., 2019. 459 p.

4. Ethem, K. and Selcuk, K. A novel tool path planning and feedrate scheduling algorithm for point to point linear and circular motions of CNC-milling machines. Journal of Manufacturing Processes, 2023, vol. 95, pp. 53-67. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.003.

5. Petrakov, Y. and Shuplietsov, D. Accuracy control of contour milling on CNC machines. Mechanics and Advanced Technologies, 2018, vol. 83, no. 2, pp. 51-56. DOI: 10.20535/2521-1943.2018.83.132223.

6. Kumar, A., Gulati, V. and Kumar, P. Effects of Process Parameters on Surface Roughness in Incremental Sheet Forming. Materials Today: Proceedings, 2018, vol. 5, pp. 28026-28032. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.043.

7. Jitendra, K., Sagar, S., Skand, T., Vishal, S. and Shiva, P. Design and fabrication of 3-axis CNC milling machine using additive manufacturing. Materials Today: Proceedings, 2022, vol. 68, no. 6, pp. 2443-2451. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.145.

8. Petrakov, Y., Korenkov, V. and Myhovych, A. Technology for Programming Contour Milling on a CNC Machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, vol. 2, no. 1 (116), pp. 55-61. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.255389.

9. Tsukanov, R. Designing of non circular air intakes for subsonic gas-turbine engines. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology, 2022, no. 6, pp. 4-14. DOI: 10.32620/aktt.2022.6.01.

Надійшла до редакції 01.03.2023, розглянута на редколегії 17.04.2023

USE OF AUTOMATED DESIGN SYSTEMS TO IMPROVE MACHINING ACCURACY

**Maryna Filippova, Mariia Demchenko, Denis Smolnikov,
Natalia Bezuglaya, Galina Bohdan**

The subject of the study is methods and means of determining the influence of the trajectory of the tool on the foreground of the volume of complex parts. The aim is to improve the quality and accuracy of the production of composite profile parts after machining at CNC machining centers, by using the optimal machining strategy. Task: to analyze existing methods of processing complex profile parts at CNC processing centers and justify the choice of the optimal strategy for the side of the surface of the part. The methods used are: methods of controlling the accuracy of processing complex surfaces, graphical methods of forming the trajectory of the tool, and mechanical methods of measuring geometric dimensions. The results obtained are as follows. To achieve this goal, an analysis of existing methods and strategies for processing surfaces of a complex profile was carried out and the existing experience in the development of control programs was adapted using automated methods with the application of CAD/CAM systems. As a result, SolidWorks was chosen as the primary modeling tool for creating a part with a complex profile. The tool path is created using the SolidCAM CAM system, which supports various strategies for processing such elements. Using the developed control programs based on the methods of linear trajectory, bitmap trajectory, spiral trajectory, and waterline trajectory, experimental analysis of the influence of the tool trajectory on the accuracy of processing surfaces located at different angles to the processing axis was carried out. Deviations of geometrical dimensions of parts obtained in re-treatment by programs formed using different methods from the real values of model characteristics are evaluated. Conclusions. Based on the analysis of the strategies for processing parts of a complex profile, the optimal trajectories of the tool are determined for parts with surfaces such as at a low angle, at a high angle, radius surface, and joints between surfaces. The results of experimental studies in further shaping of folding parts when they are prepared on CNC machine with the choice of the optimal trajectory of the movement of the tool. The choice of the optimal trajectory of the processing of parts allows to increase the accuracy of the processing in finishing operations.

Keywords: tool path; method of forming trajectory; volumetric milling; CNC; CAD/CAM system.

Філіппова Марина В'ячеславівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Демченко Марія Олександрівна – канд. техн. наук, асист. каф. виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Смольников Денис Рушанович – студ. каф. виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Безугла Наталія Василівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Богдан Галина Анатоліївна – канд. техн. наук, доц. каф. автоматизації та систем неруйнівного контролю, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Maryna Filippova – PhD, Associate Professor of Department of Instrument Making, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: m.filippova@kpi.ua, ORCID: 0000-0003-4910-3249, Scopus Author ID: 57195685484.

Mariia Demchenko – PhD, Assistant of Department of Instrument Making, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: dmariiaa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0436-1092.

Denis Smolnikov – student of Department of Instrument Making, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: Smolnikov_d@gmail.com.

Natalia Bezuglaya – PhD, Associate Professor of Department of Instrument Making, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: myhkam1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4321-2068, Scopus Author ID: 55977873000.

Halina Bohdan – PhD, Associate Professor of Department of Non-Destructive Testing Instruments and Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: bogdangalya@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6745-1509.