

*ПЕТРАКОВ Ю.В., МИГОВИЧ А.В.***МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРНОГО 2.5-D ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ**

В статті розглянутий новий метод моделювання взаємодії кінцевої фрези із заготовкою при контурному 2,5-D фрезеруванні з метою визначення головного параметру процесу – швидкості видалення матеріалу. Представлений алгоритм підготовки даних та математична модель зачеплення фрези із заготовкою, які дозволяють визначити миттєвий об'єм матеріалу інструменту, що видаляється і визначає силу різання за механістичною моделлю під час оброблення. Для моделювання використовується представлення заготовки та інструменту у вигляді полігонів, а процес різання реалізується з використанням логічних операцій "перетинання" та "різниця". Такий підхід дозволяє виявити об'єм матеріалу, що видаляється інструментом під час певної ітерації моделювання з урахуванням геометрії його лез, та відобразити нову геометричну форму заготовки після видалення матеріалу з неї. Така нова форма буде використовуватись для моделювання наступного кроку алгоритму, що забезпечує неперервність процесу. Застосування розробленого алгоритму та математичної моделі дозволяє отримати коректні дані про миттєвий об'єм видаленого матеріалу, що в подальшому використовується для прогнозування сили різання і вирішення задачі оптимізації процесу контурного 2,5D фрезерування.

Ключові слова: моделювання контурного 2,5D фрезерування, зачеплення фрези-заготовка, швидкість видалення матеріалу, САМ-системи, верстати з ЧПК.

*PETRAKOV Y. V., MYGOVICH A. V.***SIMULATION 2.5-D COUNTUR MILLING ON CNC-MACHINE**

The article discusses a new method of modeling the cutter workpiece engagement during contour 2.5-D milling in order to determine the main process parameter - the material removal rate. A data preparation algorithm and a mathematical model of the engagement of the milling cutter with the workpiece are presented, which allow determining the instantaneous volume of the removed tool material and determining the cutting force according to the mechanical model during machining. For simulation, the representation of the workpiece and the tool in the form of polygons is used, and the cutting process is implemented using the logical operations "intersection" and "difference". This approach allows you to detect the volume of material removed by the tool during a certain simulation iteration, taking into account the geometry of its flutes, and to display the new geometric shape of the workpiece after removing material from it. Such a new form will be used to model the next step of the algorithm, which ensures the continuity of the process. The application of the developed algorithm and mathematical model allows obtaining correct data on the instantaneous volume of removed material, which is subsequently used to predict the cutting force and solve the problem of optimizing the contour 2.5D milling process.

Keywords: simulation of contour 2.5D milling, cutter-workpiece engagement, material removal rate, CAM systems, CNC machines.

Вступ

Процес контурного 2,5D фрезерування широко застосовується під час обробки внутрішніх та зовнішніх поверхонь штампів, кишень деталей авіаційної промисловості, прес-форм та інших деталей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Процес різання характеризується постійною зміною умов геометричної взаємодії інструменту та заготовки, результатом якої є зміна сили різання та деформації технологічної обробної системи (ТОС). Відомо, що під час керування процесом різання на верстатах з ЧПК використовується управляюча програма, яка розробляється в САМ-системах (Computer Aided Manufacturing). Отже, найпростішим способом впливу на процес різання на верстаті ЧПК є управління саме через таку програму. Такий підхід управління має назву - управління за апріорною інформацією і спирається на дані, що є відомі перед початком оброблення. Моделювання процесу обробки є невід'ємною частиною управління за апріорною інформацією та дозволяє визначити найважливіші недостатні параметри для проектування управляючої програми і вдосконалювати процес при витраті мінімальних ресурсів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Управління процесом різання вимагає геометричного моделювання зачеплення фрези із заготовкою за траєкторією формоутворення. Дослідниками використовуються різні методи геометричного моделювання взаємодії зачеплення інструмент-заготовка, серед яких найбільш часто застосовуються моделювання на основі алгоритму буфера глибини (Z-буфера), октантного дерева, точкового методу, що є дискретними представленнями об'єктів; алгоритму конструктивної твердотільної геометрії і аналітичного методу.

Алгоритм воксельного та октантного (бінарного) дерева використовує декомпозиційну об’ємну модель, представлену як сукупності простих тіл, наприклад кубів. Одне і те ж тіло може бути описане багатьма методами. Воксельне уявлення та уявлення октантного дерева є типовими декомпозиційними моделями з відповідними структурами даних [1].

Воксельне подання тіла реалізується найпростіше. Суть полягає у створенні навколо опрацьованого об’єкта початкового куба та його подальшого поділу трьома сімействами перпендикулярних до відповідних осей прямокутної системи координат площин на менші куби з розмірами сторін, що визначаються потрібною точністю відтворення вихідної фігури. Елементом тривимірного масиву, число яких дорівнює кількості сформованих кубиків, присвоюються значення 1 або 0 у залежності від перетину останніх тілом чи ні. Головний недолік розглянутого способу, для довільних геометричних об’єктів, полягає в суттєвих потребах обчислювальних ресурсів щоб забезпечити високу точність моделювання [2].

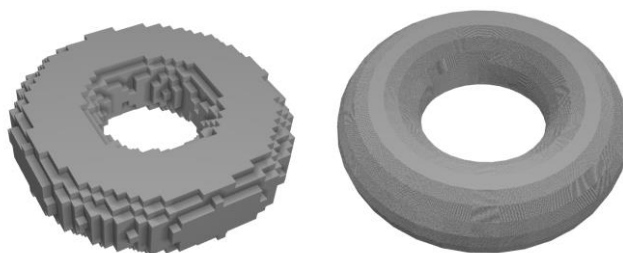


Рис. 1 – Візуалізація воксельного подання фігури тор різним розміром вокселів

Переваги воксельного подання включають максимальну точність опису об’ємних тіл довільної форми, моделювання складних фігур зі змінною кривизною поверхні та розрахунок параметрів об’ємного тіла, таких як маса та моменти інерції, через додавання параметрів вокселів. Також легко отримується результат булевих операцій. Головний недолік - збільшення обсягу пам’яті при збільшенні точності моделювання.

Уявлення октантного дерева схоже до воксельного через те, що тіло описується як сукупність шестигранників. Цей метод потребує менш серйозні вимоги до пам’яті.

При використанні октантного дерева початковий куб ділиться на вісім рівних кубів поперечними площинами. Назва уявлення походить від того, що об’єм маленького куба у вісім разів менше обсягу вихідного [1].

Якщо поточний кубик повністю належить тілу, то приймає значення 1. Якщо ні, то йому надається значення 0, дана вершина дерева не ділиться. У протилежному випадку описана процедура повторюється до присвоєння всім кінцевим вершинам значень 1 або 0 чи досягнення потрібних мінімальних розмірів кубиків (рис.2) [2].

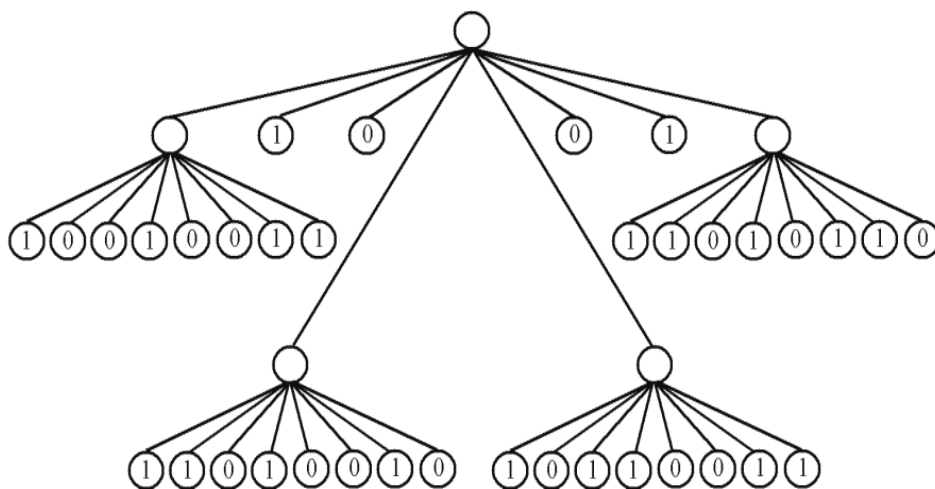


Рис. 2 – Приклад октантного дерева [2]

Недоліками процедури формування октантного дерева є необхідності в проведенні складних обчислень за геометричними співвідношеннями. Через необхідність визначення місцезнаходження конкретного октанту: усередині тіла, зовні або на їх межі.

Для геометричного моделювання подібних задач взаємодії може бути використаний алгоритм декселів та буфера глибини [3]. Основна ідея систем на основі декселів (елементів глибини) полягає в тому, щоб дискретизувати об'єкт не за допомогою кубодів (вокселів), а за допомогою паралельних сегментів ліній, які розташовані на регулярній сітці. Ці відрізки лінії можуть мати різну довжину, визначену їх початковою та кінцевою точками [4]. Такий метод був реалізований для опису взаємодії зачеплення інструмент-заготовка в модулі з відкритим доступом для мови програмування C++ Dystamill та проведеними за допомогою нього дослідженнями з моделювання сили різання під час 2.5D фрезерування [5, 6].

Якщо елементи використовуються лише в одному напрямку та мають однакове початкове значення [7], то для моделювання здійснюється вибір напрямку проектування, а перпендикулярно напрямку проектування обирається площина проектування, на яку наносять рівномірну сітку з перетинів прямих. Такий метод достатньо поширений в області моделювання процесів різання. Метод був застосований американською фірмою CGTech в своєму програмному продукті Vericut [7]. Цей підхід дуже простий у реалізації та має менший час обчислення, ніж воксельний підхід. Однак, недоліком є те, що не всі геометричні форми заготовки можуть бути змодельовані цим методом.

Для моделювання тривимірних об'єктів використовуються такі методи твердотілого моделювання, як Constructive Solid Geometry (CSG) або Boundary Representation (B-Rep) [1, 3]. Ці методи були розроблені в середині 1960-х років, коли системи CAD/CAM вимагали моделей, що містять геометричні розміри деталей. Дерево CSG використовує Булеві операції для представлення об'єктів. Всі операції проведені над об'єктом, що моделюється, в подальшому записується в дерево створення.

Моделювання взаємодії зачеплення інструмент-заготовка, використовуючи ці методи, є вельми доцільне через свою точність та зменшує час опрацювання, на відміну від вище перелічених [4]. Але необхідно зазначити, що для використання такого підходу необхідно використовувати геометричні ядра, які, як правило, є комерційними (такі, як Parasolid).

Також необхідно згадати про точковий метод, що використовується для моделювання об'єктів, які були подані кінцевим методом [8, 3]. Відповідно метод дискретно описує об'єкт за допомогою трьохвимірного масиву точок. Використання цього метода збільшує точність моделювання та зменшить час в порівнянні з кінцевим методом.

Окрім вище наведених методів, для розрахунку взаємодії інструмента і заготовки з метою визначення площі перетину недеформованої стружки також використовується аналітичний підхід. Точність такого підходу, в свою чергу, залежить від апроксимованої інформації про поверхню заготовки та траєкторію руху фрези [3]. Такий метод можна вважати найшвидшим, але його можливості обмежуються тільки деякими випадками обробки [9].

Отже, необхідно допрацювати наведений в [10] алгоритм взаємодії зачеплення інструмент-заготовка при моделюванні видалення припуску для можливості його універсального застосування та розробити способи підготовки інформації до моделювання.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підготовка вихідних даних для моделювання процесу контурного 2,5D фрезерування, на підставі даних отриманих з САМ-системи, таких, як модель заготовки та управляюча програма. Розробити метод отримання траєкторії формоутворення, цифрової моделі контуру заготовки, інструментальної вихідної поверхні, допрацювати алгоритм видалення припуску при взаємодії фрези та заготовки.

Відповідно для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дискретно відобразити траєкторію руху інструмента;
- відобразити контур заготовки та інструментальної поверхні;
- допрацювати принцип взаємодії фрези з заготовкою для моделювання видалення припуску з урахуванням гвинтової лінії лез фрези та відобразити поверхню утворену нею;
- втілити розроблені процедури в прикладну програму, та перевірити їх працездатність.

Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження представляє собою процес контурного 2,5D фрезерування, що здійснюється за допомогою NC-програм на станках з ЧПК. Предметом дослідження є теоретичні методи аналізу геометричної взаємодії між фрезою та заготовкою, що допомогло встановити відповідні математичні моделі. Такі теоретичні розробки лягли в основу створення нового програмного забезпечення для моделювання процесу видалення матеріалу за допомогою кінцевої фрези на верстатах з ЧПК.

Принципи моделювання контурного фрезерування були розроблені з урахуванням апріорної інформації, отриманої від САМ-систем. Вхідні дані конвертуються в цифрові масиви, які представляють траєкторію формоутворення, вихідну інструментальну поверхню та заготовку.

Результати дослідження

Як відомо, для управління верстатами з числовим програмним керуванням використовуються керуючі програми, записані у вигляді G-кодів. У більшості випадків, системи ЧПК базуються на стандарті ISO 6983/DIN 66025, який визначає траєкторію руху фрези за допомогою команд (G01 – прямолінійний рух, G02, G03 – дуговий рух і т.д.). Дискретизація траєкторії руху інструмента відбувається за попередньо розробленими алгоритмами, які описані в [10, 11]. Вони були втілені в прикладну програму, результати функціонування якої за вихідною інформацією з управляючої програми представлені на рис. 3, де лінією 1 зображена дискретизована траєкторія.

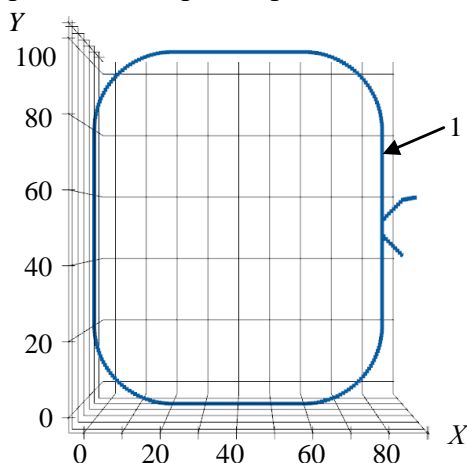


Рис. 3. – Дискретизована траєкторія формоутворення

Дискретизація застосовується лише для переміщень, які є робочими, оскільки при холостих переміщеннях вона не має сенсу, тому що різання не відбувається. Траєкторія руху інструменту представлена у вигляді множини P , яка складається з точок P_i , за якими переміщується інструмент:

$$P = \bigcup_{i=1}^n P_i . \quad (1)$$

Кожна розрахована точка записується в масив цифрових даних у вигляді:

G:..., X:..., Y:..., Z:..., I:..., J:..., F:..., S:...;

Цей запис є універсальним, оскільки він дозволяє зберігати значення, отримані з будь-якої команди. Для моделювання взаємодії фрези та заготовки та зрізування припуску використовується алгоритм [12], Vatti Polygon Clipping – це алгоритм обрізання полігонів, який був розроблений Vatti B.R. Полігон – фігура, яка складається з трьох або більше точок, які зветься вершинами, і з'єднаних між собою відрізками, які називаються ребрами.

Цей алгоритм працює з двома полігонами, що лежать на площині – «subject polygon» базовий полігон та «clip polygon» той полігон, що обрізає [13]. Мета полягає у тому, щоб визначити множину точок перетину базового з обрізаючим полігоном.

Отже, для моделювання необхідно створити проекцію 3D-моделі заготовки на площину. Цей відбиток представляє собою переріз 3D-моделі на висоті, заданій управляючою програмою. На площині заготовка та інструмент будуть представлені у вигляді базового та обрізного полігонів.

Метод дозволяє моделювати процес обробки заготовки, використовуючи набір логічних операцій, таких як перетин (\cap) та відмінність (\setminus), для полігонів на площині. Операція перетину допомагає створити полігон, який описує фігуру, що вилучається інструментом протягом відповідної ітерації моделювання, тоді як операція відмінності дозволяє отримати оновлену геометричну форму заготовки після видалення матеріалу з неї.

Послідовність моделювання процесу оброблення представлена на прикладі деталі, тривимірна модель якої показана на рис. 4.

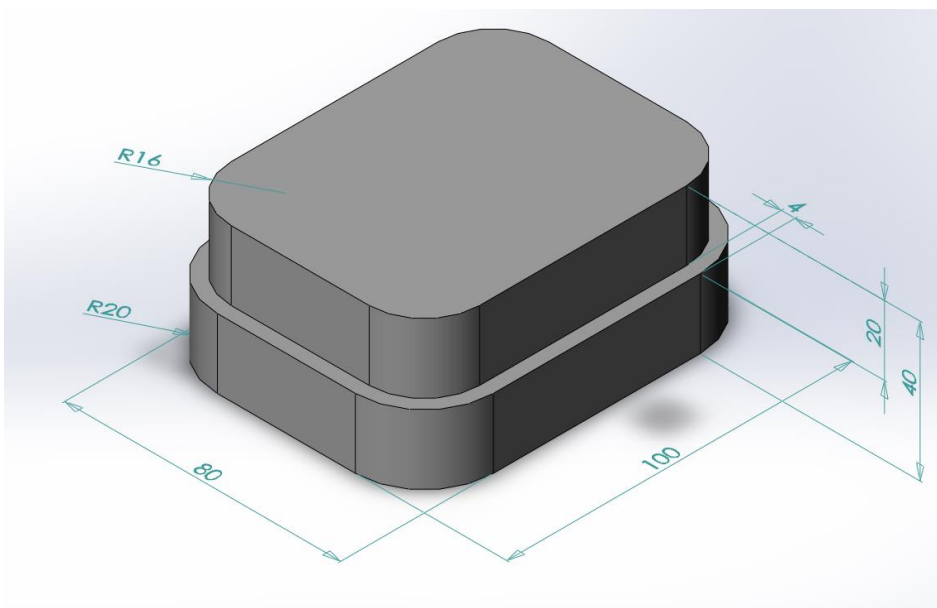


Рис. 4 – 3D-модель деталі

Моделювання відбувається на площині 2 (рис. 5), де спочатку розташовано проекцію заготовки 1 у формі полігону W . Фреза 3 зображена, як полігон T і переміщується відповідно до заздалегідь дискретизованої траєкторії 4.

Нехай під час певної ітерації моделювання процесу зрізування припуску переріз інструмента T знаходиться в точці P_i , яка відповідає одній з точок траєкторії руху інструмента. Тоді нова фігура $Tf_{z,i}$, що відображає видалення матеріалу одним зубом фрези, буде сформована шляхом протягування полігону T до точки P_{fz} (рис. 6). Дистанція між P_i та P_{fz} характеризується величиною подачі на зуб і обчислюється за наступним виразом:

$$f_z = \frac{F_{xe}}{n \cdot S}, \quad (2)$$

де F_{xe} – хвилинна подача (мм/хв), n – кількість зубів фрези, S – швидкість шпинделя (об/хв).

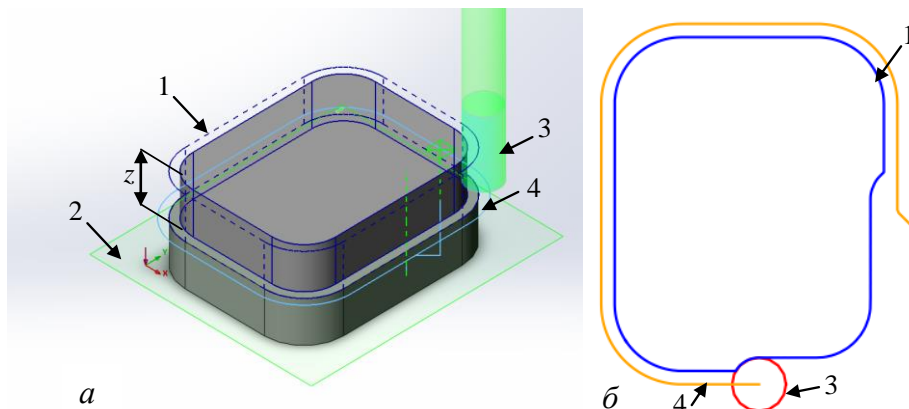


Рис. 5. – Результати моделювання:
а) візуалізація оброблення (САМ-система), б) контур фрезерування

Отже, полігон R_i , який отриманий в результаті операції перетину полігонів W_i та Tf_{zi} , відображає фігуру, що відповідає матеріалу, видаленому під час даної ітерації:

$$R_i = W_i \cap T_{fz_i}, \quad (3)$$

Полігон W_{i+1} , що описує заготовку на поточній ітерації моделювання утворюється в результаті виконання операції різниці полігону заготовки W_i і фігури, що за аналогією з фігурою T_{fz} має початком точку P_i та протягує полігон T по траєкторії формоутворення, але робить це до наступної точки траєкторії P_{i+1} . Така фігура буде мати назву Tr_i

$$W_{i+1} = W_i - Tr_i, \quad (4)$$

Таким чином знаходиться контур заготовки після моделювання оброблення на кожній ітерації та відбувається підготовка до наступного кроку.

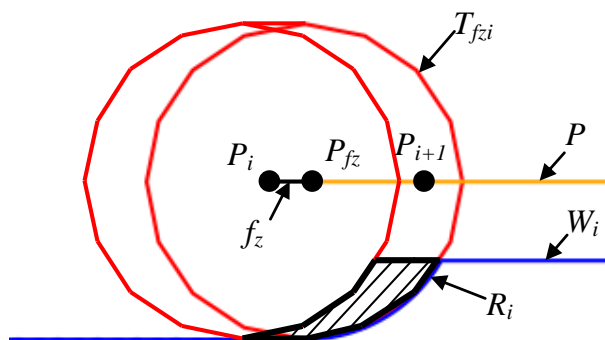


Рис. 6. Моделювання процесу зрізування матеріалу

Для урахування спірального розташування зуба фрези за висотою необхідно встановити взаємодію кожного зуба фрези в області дуги різання відповідно до кута α нахилу спіральної канавки. З метою вирішення цього завдання фреза представляється своїми перетинами на вибраних висотах h_{ij} (рис. 7, а), які відокремлюють значення висоти контакту інструмента із заготовкою z . Для обчислення площі на кожному заданому рівні висоти, потрібно модифікувати полігон T_{fz} . Відповідно до (3), полігон T_{fz} складається з двох кіл, які відображають видалення матеріалу під час переміщення фрези вздовж траєкторії довжиною

fz , слід знайти точки на гвинтових лініях, які проектується на площину висоти, що розглядається, і після застосування формули (3) отримати полігон R_{ij} відповідно до цих точок на кожному рівні висоти.

Точки D_{ij} та C_{ij} (рис. 7, б), що обмежуватимуть полігон T_{fz} проектується з гвинтової лінії лез фрези відповідно для кожного кола, що формує фігуру T_{fz} , з центів кіл P_i, P_{i+1} , до D_i, C_i проводяться лінії кути між якими і віссю x системи координат управляючої програми будуть кутами θ повороту радіус-вектора, що лежить в основі гвинтової лінії. Надалі координати точок D_i та C_i на відповідних висотах h_{ij} будуть знаходитися за формулами що параметрично описують гвинтову лінію:

$$\begin{cases} x(t) = r * \cos(t + \theta) \\ y(t) = r * \sin(t + \theta), \\ h_{ij}(t) = p * t / (2 * \pi) \end{cases} \quad (5)$$

де r – радіус фрези, θ – кут повороту радіус-вектора, t – параметр, кут що утворює гвинтову лінію, знаходиться, як $t = (2 * \pi * h_{ij}) / p$; p – крок гвинта ($p = 2 * \pi * R * \tan(\alpha)$), α – кут підйому гвинтової лінії.

Відповідно вихідний полігон R_{ij} , для опису видаленої площі на кожній заданій висоті h_i буде отримуватись із взаємодії полігона, що описує заготовку W_i і модифікованого полігона T_{fz} , що обмежується гранню, утвореною точками D_{ij} і C_{ij} , а його площа S буде знаходитися за допомогою формули площі Гауса:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left| \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} \right) + x_n y_1 - \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i \right) - x_1 y_n \right|, \quad (6)$$

де S_{ij} – площа полігона, n – кількість сторін полігона, $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ – координати вершин багатокутника.

В свою чергу, аналог швидкості видалення припуску – об’єм матеріалу видалений на певній ітерації руху фрези, може бути визначений, як сума об’ємів розрахованих через формулу:

$$MRR_i = \sum_{j=1}^{N-1} \left(\frac{h_{ij}}{3} \right) * (S_{ij} + S_{i(j+1)} + \sqrt{S_{ij} * S_{i(j+1)}}), \quad (7)$$

де, N – кількість пар перерізів на висоті; j – індекс, який відображає пару перерізів (значення від 1 до $N-1$); h_i – відстань між парою перерізів на висоті, що відповідає індексу i ; S_{ij} – площа полігона R_{ij} в основі; $S_{i(j+1)}$ – площа полігона R_{ij} в вершині фігури об’єм якої розраховується. В залежності від необхідної точності моделювання кількість перерізів N може змінюватися.

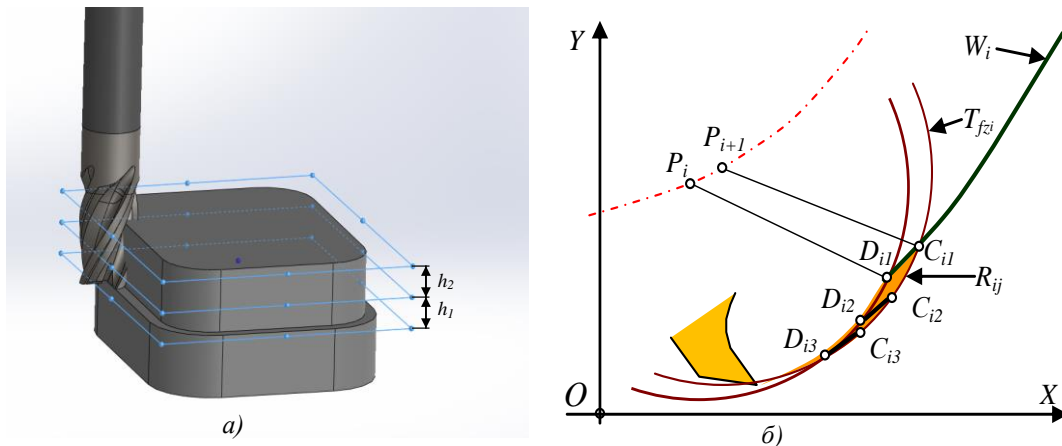


Рис. 7. – Визначення площі видаленого матеріалу по висоті взаємодії фрези і заготовки

В роботі було застосовано алгоритм моделювання процесу видалення матеріалу із заготовки під час 2,5D контурного фрезерування при чорновому обробленні. Вхідні дані для моделювання включають інструмент – кінцеву фрезу $\varnothing 16$ мм, ріжуча висота 32 мм з 4 зубами, кутом нахилу леза 30° , виготовлену з суцільного карбіду A20 Solid carbide. Припуск, який видаляється, має ширину 4 мм і висоту 20 мм, а матеріал заготовки – Сталь 45.

На рис. 8, зліва зображена управляюча програма в G-кодах. Створена програма для моделювання, здатна підтримувати будь-яку управляючу програму, розроблену в САМ-системі. У вікні справа відображено моделювання процесу різання, а знизу розташований графік зміни аналогу швидкості видалення матеріалу відповідно до траєкторії формоутворення.

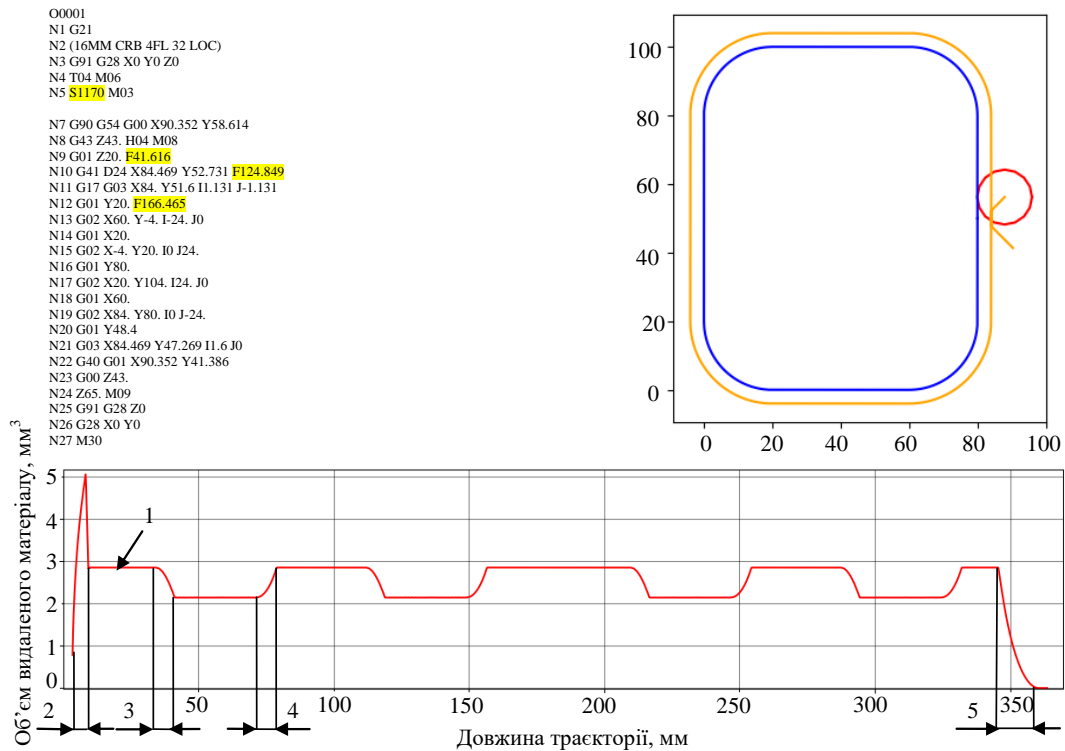


Рис. 8. – Інтерфейс програми моделювання чорнового проходу при контурному фрезеруванні

Після завантаження та аналізу початкового файлу керівної програми для верстата з ЧПК, розробленої в середовищі САМ-системи CAMWorks, система автоматично відображає траєкторію переміщення інструменту. Водночас, ділянки, де відбувається видалення матеріалу заготовки, розбиваються дискретно. Дискретність встановлюється користувачем. Контур заготовки автоматично створюється на основі завантаженої 3D-моделі у форматі STL. Інформацію про інструмент вводить користувач, а величина z , яка є висотою різання, визначається системою автоматично внаслідок аналізу траєкторії формоутворення та завантаженої моделі заготовки.

Під час моделювання в кожній точці траєкторії переміщення інструменту встановлюється аналог швидкості видалення матеріалу, а графік зміни відображається у вікні моделювання інтерфейсу (лінія 1 на рис. 8). Моделювання процесу фрезерування можна розділити на такі етапи: ділянка 2 – вхід інструменту, ділянка 3 – початок обробки дуги, 4 – завершення обробки дуги, 5 – вихід зі зони різання.

Результати та їх обговорення

Розроблена математична модель на основі геометричної взаємодії фрези із заготовкою дозволяє знайти аналог швидкості видалення припуску при контурному фрезеруванні. Розроблені алгоритми підготовки та моделювання процесу видалення припуску, втілені в

прикладну програму, що дозволяє їх використовувати для прогнозування процесу контурного фрезерування і в подальшому розробити управління для стабілізації швидкості видалення припуску за формоутворюючою траєкторією. Це дасть можливість оптимізувати операції контурного фрезерування за критерієм максимуму продуктивності при виконання всіх вимог за якістю оброблення.

Для реалізації такого методу необхідно розробити алгоритми, які дозволять модифікувати управляючу програму, створену у САМ-системі, з метою керування процесом різання шляхом зміни режимів різання за траєкторією формоутворення.

Висновки

1. Розроблено метод дискретизації траєкторії руху інструмента що дозволяє моделювати процес контурного 2,5D фрезерування та був успішно втілений в прикладній програмі.
2. Запропоновані принципи моделювання та видалення припуску на основі точкової моделі взаємодії фрези та заготовки з урахуванням гвинтової лінії лез фрези, що забезпечує універсальність використання програми для моделювання та підвищує її практичну значимість для обробки різноманітних контурів.
3. Проведено втілення розроблених методів в прикладну програму та перевірено їх функціональність, що підтверджує адекватність розроблених методів та можливість їх застосування для моделювання контурного 2,5D фрезерування з метою прогнозування результатів при технологічній підготовці виробництва.

References

1. Meagher D. Geometric Modeling Using Octree-Encoding. Computer Graphics and Image Processing, vol.19, Jun. 1982, pp. 129-147. doi: [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90104-6)
2. Virchenko G., Martynov V., Sergeychuk O., Usenko V. (2018). Applying Using Structural-Parametric Geometric Models for Rational Design of Technological Processes. Mechanical Engineering. International Journal of Engineering & Technology, 7(4.8), 570-574. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27308>
3. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. CIRP Annals, vol. 63 (2), pp.585–605, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.007>
4. Boz Y., Erdim H., Lazoglu I. A comparison of solid model and three orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three and five-axis virtual milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 81 (5-8), pp.811–823, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7251-7>
5. Dambly V., Rivière-Lorphèvre É., Verlinden O. Tri-Dexel Based Cutter-Workpiece Engagement Determination For Robotic Machining Simulator. Procedia CIRP, vol. 107, pp. 1059-1064, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.108>.
6. Huynh H.N., Rivière-Lorphèvre E., Ducobu F., Ozcan A., Verlinden O. Dystamill: a framework dedicated to the dynamic simulation of milling operations for stability assessment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 98(5-8), pp. 2109–2126, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2357-3>
7. Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G., Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining. Computer-Aided Design, vol. 35, pp. 333-346, 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(02\)00055-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00055-6)
8. Kersting P., Biermann D. Modeling techniques for simulating workpiece deflections in NC milling. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 7(1), pp. 48–54, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.08.002>
9. Tunc L.T., Budak E. Extraction of 5-axis milling conditions from CAM data for process simulation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 43(5-6), pp. 538–550, 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1735-7>
10. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. Technology for programming contour milling on a CNC machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 2(1 (116), pp. 55–61, 2022. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255389>
11. Petrakov Y.V., Myhovych A.V. Design of digital arrays of shape-forming trajectories - a prerequisite for contour milling simulation. Innovations of Youth in Mechanical Engineering, vol. 3, pp. 398-401, 2021. doi: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.229929>
12. Vatti B.R. A generic solution to polygon clipping. Communications of the ACM, vol. 35(7), pp. 56–63, Jul. 1992. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/129902.129906>
13. Max K. Agoston. Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms. Springer Science & Business Media, 2005. <https://www.hive.co.uk/Product/Max-K-Agoston/Computer-Graphics-and-Geometric-Modelling--Mathematics/18275071>

Відомості про авторів / About the Authors

Петраков Юрій Володимирович (Yuri Petrakov) – професор, доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, E-mail: yetrakov.86@gmail.com, тел.: +38 (068)-356-54-79, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0525-4769>

Мигзович Артур Володимирович (Artur Myhovych) – аспірант кафедри технології машинобудування НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, E-mail: arthurmygovych@gmail.com, тел.: +38 (095)-126-91-55 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8687-6879>

УДК 621.923

DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9

ГАСАНОВ М.І., РУДНЕВ А.В., КОТЛЯР О.В., ТИТАРЕНКО О.В., КОРЧАГИН І.Г.

ОЦІНКА ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТВЕРДИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проаналізовано результати досліджень сил різання при алмазному шліфуванні матеріалів, що використовуються при виготовленні та ремонті авіаційної техніки: титанового сплаву ВК6 та жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11H23T3MP. Шліфування проводилося з використанням твердих змащувальних матеріалів, що були розроблені авторами. Отримані результати дозволяють стверджувати, що тверді змащувальні матеріали здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленням їх складу.

Ключові слова: алмазне шліфування, тверді змащувальні матеріали, важкооброблювані матеріали, титановий сплав, жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь.

HASANOV M.I., RUDNEV A.V., KOTLYAR O.V., TYTARENKO O.V., KORCHAGIN I.G.

ASSESSMENT OF THE LUBRICATING CAPACITY OF SOLID LUBRICATING MATERIALS IN DIAMOND GRINDING OF HEAVY-PROCESSED MATERIALS

The results of research on cutting forces during diamond grinding of materials used in the manufacture and repair of aircraft equipment: titanium alloy VK6 and heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel 10X11H23T3MP were analyzed. Grinding was carried out using solid lubricating materials developed by the authors. The obtained results allow us to state that solid lubricating materials are able to effectively reduce friction. Stearic acid should be considered the basis for the creation of TZM with further improvement of their composition.

Keywords: Key words: diamond grinding, hard lubricating materials, hard-to-machine materials, titanium alloy, heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel.

Вступ. Всі передові досягнення військової техніки, зокрема авіаційної, ґрунтуються на широкому використанні конструкційних матеріалів з високою міцністю, жаро- та корозійною стійкістю, високим опором втомі та незмінними фізико-механічними характеристиками у широкому діапазоні температур. Це, в першу чергу, високоміцні титанові сплави та нержавіючі жаростійкі сталі, леговані нікелем (більше 20%). Серед загального переліку відповідальних деталей авіабудування особливо виділяють силові деталі та зварні вузли планерів (силові балки, лонжерони, шпангоути, вузли навіснагрегатів, нервюри, рейки закрилків та передкрилків), силові деталі та вузли шасі (підкоси, коромисла візка, шліц-шарніри, гальмівні важелі) [1]. Унікальні властивості зазначених сплавів роблять їх незамінними для вузлів шасі, лопаток турбін авіадвигуна та деталей вихрової камери згоряння [2].

З технологічної точки зору виготовлення таких складних елементів сучасної техніки є непростим завданням, оскільки матеріали погано виливаються, обробляються тиском, зварюються та піддаються різанню – в цілому відносяться до важкооброблюваних. Забезпечити високу якість поверхні при всій складності форми деталі вдається тільки за умов особливого підходу щодо її формування на всіх етапах виробництва. При цьому на завершальні (фінішні) етапи покладається найбільша відповідальність за створення мікрогеометричного профілю поверхні.

Процеси фінішної абразивної обробки – шліфування – для більшості деталей з важкооброблюваних сплавів стали єдиною можливістю забезпечити точність форми та розмірів, здобути необхідну шорсткість поверхні та фізико-механічні властивості поверхневого шару і гарантувати таким чином високу функціональність, надійність та довговічність деталей. Однак, саме процеси шліфування через значну енергоємність потребують значних витрат на свою реалізацію (20-25% від загальних витрат на виробничий процес [3]), які переважно пов'язані з використанням значної кількості мастильно-охолоджувальних речовин та зменшенням їх шкідливого впливу. Зважаючи на світові тенденції щодо підвищення екологічності виробництва [4] та піклування про природні ресурси, все більш актуальними стають технології мінімального [5] та твердого змащування, використання багат шарових абразивних кругів з зернами різного розміру та форми [6], оптимізація параметрів режиму шліфування з урахуванням стану поверхні шліфувального інструменту [7].

Результати попередніх досліджень [8], переконливо засвідчили ефективність використання твердих змащувальних матеріалів (стеарин технічний, себацинова кислота та їх суміш, суміш стеаринової кислоти та дисульфід молібдену) при алмазному шліфуванні твердого сплаву (ВК6) при швидкості різання до 25 м/с. Найкращі показники якості поверхні порівняно з обробкою без змащування були отримані на зразках жароміцної сталі [9]. Розширення технологічних можливостей шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок вивчення силових характеристик процесу при використанні твердих змащувальних матеріалів іншого