

Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.**В.В. Писаренко, магістр***Національний технічний університет України «КПІ»***О.О. Розенберг, д.т.н., проф.***Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

НОВА КОНЦЕПЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ 3D МОДЕЛІ ПРОТЕЗА КОЛІННОГО СУГЛОБА ЛЮДИНИ

Представлена нова концепція проектування 3D моделі ендопротеза, яка враховує кінематичну схему формоутворення верстата з ЧПК, що застосовується при його виготовленні. Запропонований метод дозволяє отримати геометричну модель у вигляді впорядкованих цифрових масивів, що є вхідними даними для САМ системи проектування програми управління верстатом з ЧПК. Крім того, пропонується на етапі проектування виконати деякі попередні розрахунки: визначення оптимальних координат технологічної осі, максимально можливого радіусу інструмента та кроку між рядками при обробці залежно від заданої шорсткості поверхні.

Актуальність проблеми. Протез колінного суглоба людини має складну 3D поверхню, виготовлення якої звичайно відбувається на верстаті з ЧПК. Відомо, що для підготовки управляючих програм все ширше використовуються САМ системи, а для оброблення подібних складних поверхонь без них просто неможливо розробити програму управління верстата з ЧПК. У той же час, огляд технологій, які застосовуються при виготовленні протезів, показує, що наразі не існують сталі рішення відносно їх формоутворення на верстатах з ЧПК. Для виготовлення таких деталей деякими фірмами навіть застосовуються п'ятикоординатні верстати з ЧПК (рис. 1), а для підготовки програм використовуються стандартні САМ системи, які не здатні проектувати управляючі програми верстатів спеціальної кінематики і не спроможні визначати режим різання.



Рис. 1. Фрезерування штучного суглоба на п'ятикоординатному верстаті DMU 50 фірми DECKEL MAHO

Відповідно до нової концепції підготовки виготовлення складних 3D поверхонь на верстатах з ЧПК, розробленої на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ», програма управління створюється при моделюванні процесу оброблення на ПЕОМ, причому кількість формуючих координат має бути зведена до мінімуму, а під час моделювання проектується не тільки формуюча траєкторія, а й автоматично визначається режим різання [1]. Таким чином, залишається актуальною науково-технічна проблема технологічної підготовки виробництва протезів з урахуванням викладеної вище нової концепції.

Постановка задачі. Оскільки розроблена концепція передбачає використання інтегрованих САД/САМ систем, то при її використанні насамперед необхідно підготувати вихідні дані геометричної моделі складної поверхні для подальшого використання при моделюванні процесу зрізування припуску, проектування траєкторій формоутворення і розрахунку режиму різання. Тому першим кроком є виконання наступних завдань:

1. Визначення оптимальної схеми формоутворення верстата з ЧПК за критерієм мінімуму координат, що управляються.
2. Формування цифрової моделі 3D поверхні з урахуванням схем формоутворення.
3. Визначенні геометричних параметрів інструментальної формуючої поверхні.
4. Підготовка геометричної схеми формоутворення до застосування в САМ системі для моделювання процесу зрізування припуску.

Вирішення таких завдань має виконуватись в САД системі, яка інтегрується з САМ системою підготовки управляючої програми верстата з ЧПК.

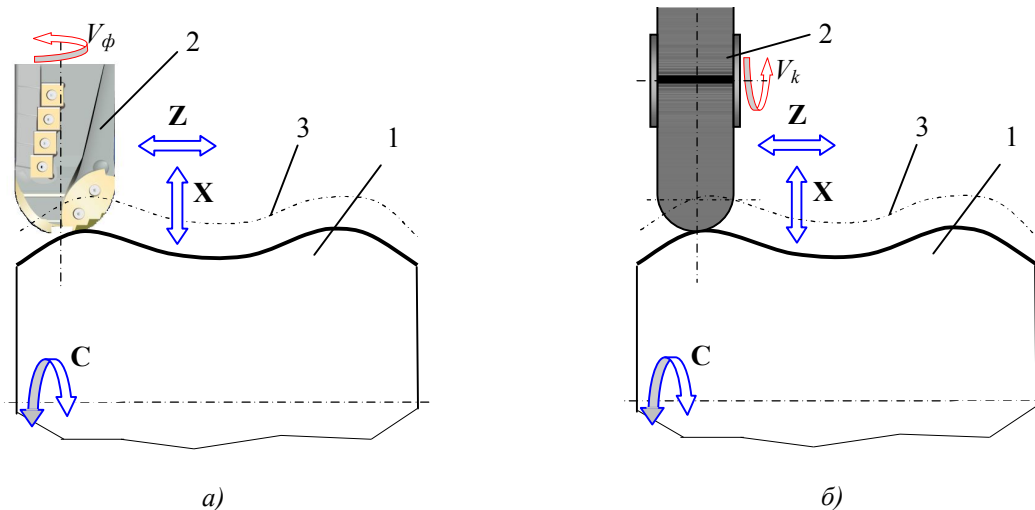
Розв'язання задачі. Одним із головних факторів, що суттєво впливає на схему формоутворення та необхідну компоновку верстата, є матеріал, з якого буде виготовлений штучний суглоб людини, оскільки від нього залежить вид оброблення: лезове чи абразивне.

При сучасному розвитку технологій протезування найбільш поширеними матеріалами є сплави на основі титану, які доцільніше обробляти лезовими видами, тобто високошвидкісним фрезеруванням

сферичними фрезами. Проте, як показує практика, титанові сплави не є ідеальними матеріалами для протезування штучних суглобів, з точки зору вживлення в організм людини. На сьогоднішній день в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України розроблена нова технологія вирощування штучного кристала сапфіра для виготовлення протезів, який має кращі медичні характеристики. В такому випадку для виготовлення слід застосовувати абразивну обробку.

Проведений аналіз показує, що при виготовленні штучних суглобів з титанових сплавів перевага залишається за лезовими методами оброблення, тоді як при обробленні суглобів з сапфіра доцільно використовувати абразивну обробку.

Таким чином, для лезової обробки складної поверхні штучного суглоба 1 рекомендується використовувати фрезу 2 зі сферичною вихідною інструментальною поверхнею та відповідну схему формоутворення (рис. 2, а).



а) б)
Рис. 2. Схеми формоутворення поверхні штучного суглоба:
а) – фрезеруванням, б) – шліфуванням

Фрезі 2 додається рух різання V_ϕ навколо вертикальної осі, а формоутворення здійснюється за трьома координатами, що управляються: обертальна C та поступальні Z і X . В результаті центр сферичної інструментальної поверхні фрези рухається за еквідистантою 3 до контуру деталі. Причому синхронний рух за координатами C та X повинен забезпечувати формоутворення в поперечному напрямку, а рух S_p за координатою Z – розповсюдження процесу різання на всю поверхню деталі (за рядками).

Компоновка верстата для абразивної обробки відрізняється тільки розташуванням осі головного руху V_ϕ різання шліфувального круга 2, яка має бути паралельною осі обертання заготовки 1 (рис. 2, б). Вихідна інструментальна поверхня має форму тора, а формоутворюючий рух здійснюється за еквідистантою 3 до профілю деталі центра округлення периферії шліфувального круга.

Геометрична модель 3D поверхні протеза представлена конструктором у вигляді тривимірного цифрового масиву, який являє собою координати точок у Декартовій системі координат (рис. 3, а). Конструктор надає вхідні дані (рис. 3, б), у тому вигляді, в якому йому зручно їх отримувати, в даному випадку профіль вимірювався на координатно-вимірвальній машині.

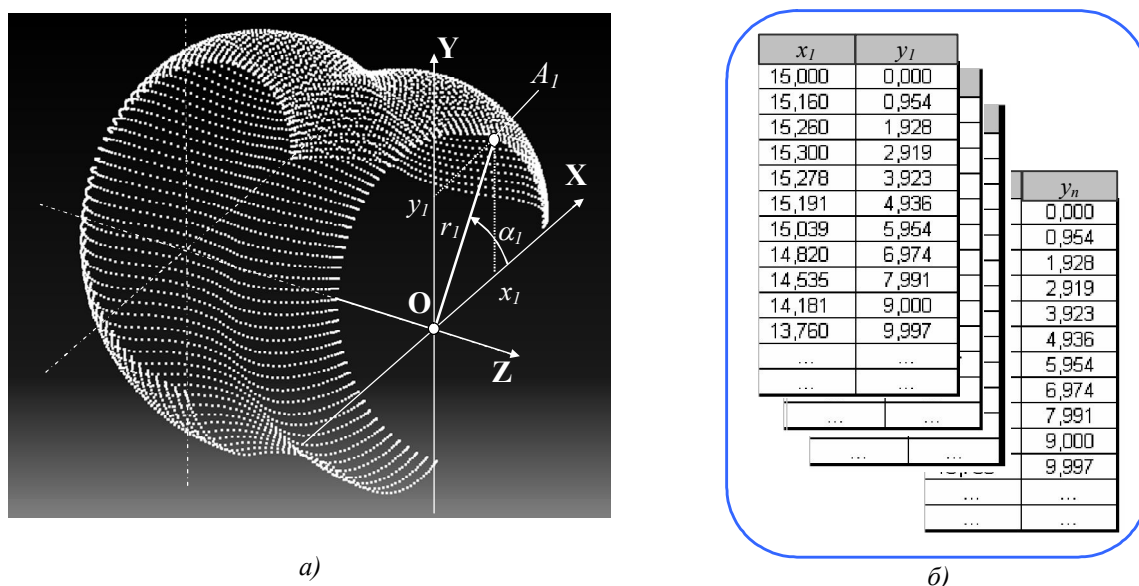


Рис. 3. Вихідна 3D геометрична модель у Декартовій системі координат

Відповідно до методики, розробленої на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ», вихідні дані геометричної моделі 3D поверхні мають бути трансформовані у цифрові масиви, які б відповідали обраній схемі формоутворення на верстаті. Завдяки такому підходу утворюються дискретні геометричні моделі, що будуть використані в САМ системі не тільки для проектування програми формоутворюючих рухів, а і для моделювання процесу зрізування припуску. В результаті з'являється можливість оцінювання процесу різання за кількісними характеристиками і проектувати комплексне управління процесом з метою стабілізації умов різання за траєкторією оброблення, оптимізації всього процесу різання, а також корекції формоутворюючої траєкторії.

Таким чином, вхідні дані для моделювання процесу механічної обробки в обраній системі формоутворення мають бути представлені у полярній системі координат (дивись рис. 4, а):

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}; \quad \varphi_i = \arctan\left(\frac{y_i}{x_i}\right), \tag{1}$$

де r – полярний радіус, φ – полярний кут.

Розраховані масиви (1) перебудовані в полярну систему координат, але мають ту ж саму структуру, що і первинні дані, а головне крок зміни може бути нерівномірним і занадто великим для розв'язання задач, що виникають при моделюванні процесу зрізування припуску. Тому був розроблений алгоритм необхідної підготовки розрахованих цифрових масивів, математичне ядро якого представляє перетворення у сплайн-функції, а саме Ермітовий кубічний сплайн [2]. Відомо, що саме такий сплайн зберігає ізогеометрію функції, що інтерполюється, і є інваріантним відносно до нерівномірності кроку вихідної сітки.

Оскільки вихідний масив точок будь-якого перерізу 3D поверхні протеза вже перетворений у полярну систему координат (1), то запропонований у роботі [2] алгоритм був адаптований. Якщо на ділянці у вузлах сітки задані значення координат точок, що описують деяку функцію $r_i = f(\alpha_i)$, то через ці точки можна провести кубічний сплайн, який на кожному відрізку визначається чотирма коефіцієнтами:

$$S(f, \alpha_i) = f_i, \tag{2}$$

де $I = 1 \dots n$.

Для визначення цих коефіцієнтів маємо відповідно до рівняння (2) $4n-6$ співвідношень. Оскільки сплайн на кожному з відрізків визначається чотирма коефіцієнтами, а на всій ділянці $4(n-1)$ коефіцієнтами, то задаються два додаткових співвідношення у вигляді кінцевих умов, за якими виконується «зшивання» сплайнів на межах відрізків. Застосовують дві кінцеві умови:

$$\begin{aligned} 1) & S'_3(f, a) = f'(a); \quad S'_3(f, b) = f'(b). \\ 2) & S''_3(f, a) = f''(a); \quad S''_3(f, b) = f''(b). \end{aligned} \tag{3}$$

Кінцеві умови 1. Сплайн розраховується за залежностями:

$$S_3(\alpha) = r_i + (\alpha - \alpha_i) \dot{r}_i + t(B + tA), \tag{4}$$

де $t = (\alpha - \alpha_i) / (\alpha_{i+1} - \alpha_i)$; $A = -2U + \dot{y}_i + \dot{y}_{i+1}$; $B = -A + U - \dot{y}_i$; U – поділена різниця першого порядку.

Кінцеві умови 2. Сплайн розраховують за залежностями:

$$S_3(\alpha) = r_i \varphi_1 + r_{i+1} \varphi_2 + (\alpha_{i+1} - \alpha_i)(m_i \varphi_3 + m_{i+1} \varphi_4), \quad (5)$$

де величини, що визначають значення похідних у вузлах сітки, розраховуються за залежностями:

$$m_i = \dot{y}_i - V \cdot \ddot{y}_i / 3 - V \cdot \ddot{y}_{i+1} / 6; \quad m_{i+1} = \dot{y}_i + V \cdot \ddot{y}_i / 6 + V \cdot \ddot{y}_{i+1} / 3;$$

де $V = x_{i+1} - x_i$. Функції $\varphi_1 - \varphi_4$ визначають за формулами:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= (1 - U^2) \cdot (1 + 2U); & \varphi_2 &= U^2(3 - 2U); \\ \varphi_3 &= U(1 - U)^2; & \varphi_4 &= -U^2(1 - U); \end{aligned}$$

де $U = (\alpha - \alpha_i) / (\alpha_{i+1} - \alpha_i)$.

В результаті роботи алгоритму одержують сплайн, що представляє задану криву у перетвореній системі координат з заданим кроком зміни полярного кута.

Не менш важливою задачею є визначення оптимального положення технологічної осі деталі, яка при обраній схемі формоутворення буде співпадати з віссю C (дивись рис. 2). Відомо [3], що варіювання координат технологічної осі дає можливість зменшити діапазон нерівномірності умов різання на різних ділянках поверхні, підвищити точність оброблення. Задача визначення оптимального положення технологічної осі може бути сформульована наступним чином: знайти таке положення осі, коли максимальний діапазон зміни кута тиску у кінематичній парі інструмент–деталь буде мінімальним. Отже, така задача відноситься до класу мінімаксних задач, яку при $R_k = 0$ зручно представити так:

$$\max_{x, y, R_k=0} (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Кут тиску в такому разі визначається за формулою:

$$\gamma_i = \arctan\left(\frac{dr_i / d\alpha_i}{r_i}\right). \quad (7)$$

Алгоритм розв'язку задачі оптимізації побудований за схемою пошуку, аналогічною симплекс-методу, тобто перебором величин координат x і y у заздалегідь визначеній області для кожного перерізу деталі. Спочатку організується рух з певним кроком за координатою x при фіксованій координаті y і визначається її оптимальна величина, а потім змінюється координата y і цикл повторюється за всією визначеною областю. Далі вибирається таке сполучення координат x і y , що відповідає досягненню умови (6).

Для розв'язання визначених вище завдань була створена прикладна програма, математичне ядро якої складають наведені вище залежності та алгоритми. Завантаження вихідних даних, що представляють 3D поверхню в Декартовій системі координат виконується у діалоговому режимі з текстового файлу при натисканні відповідної кнопки на інтерфейсі (рис. 4). При натисканні кнопки «Побудувати перерізи» виконуються процедури формування тривимірних цифрових масивів, що представляють ту ж саму 3D поверхню в полярній системі координат відповідно до обраної схеми формоутворення.

Для пошуку оптимального положення технологічної осі, відповідно до сформульованої вище задачі, необхідно натиснути кнопку «Розрахунок» у вікні «Оптимізація». Оптимальне положення технологічної осі визначається автоматично для кожного перерізу деталі, номер якого встановлений у вікні.

Створена прикладна програма дозволяє оцінити ефективність оптимізації за графіками зміни кута тиску при обробці деталі на верстаті з ЧПК, коли вісь C верстата (рис. 2) співпадає з конструкторською віссю, а коли – з оптимальною технологічною віссю.

На рис. 4 представлений стан головного інтерфейса програми при оцінці результатів оптимізації для 23-го перетину 3D поверхні деталі. Такий переріз позначений лінією 1 на 3D зображенні поверхні, а графіки кутів тиску при обробці коло конструкторської осі – лінією 2, при обробці коло технологічної осі – лінією 3. Діапазон зміни кута тиску $\delta\gamma$ зменшений більш ніж у 4 рази: з $\delta\gamma_1 = 1,8^\circ$ до $\delta\gamma_2 = 0,4^\circ$.

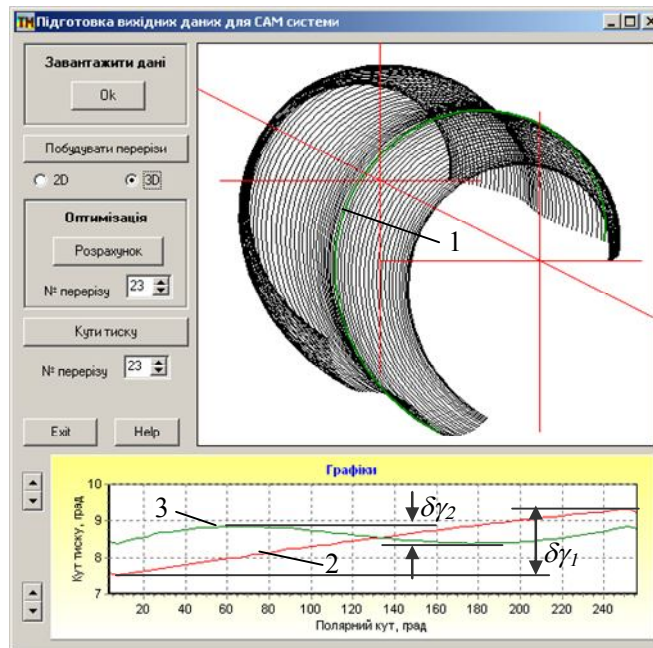


Рис. 4. Головний інтерфейс програми і результати оптимізації

Зменшення діапазону зміни кута тиску приводить до зменшення похибки формоутворення при відхиленні діаметра шліфувального круга від розрахункового внаслідок його правки. При цьому з'являється можливість під час експлуатації круга використовувати одну управляючу програму, а компенсацію зміни його діаметра виконувати шляхом корекції розміру інструмента безпосередньо на верстаті з ЧПК.

Одним із головних питань при моделюванні процесу зрізування припуску з наступним проектуванням траєкторії руху інструмента є визначення подачі S_p на рядок, тобто відстані між двома сусідніми проходами. При заданих типах і параметрах оброблюваної поверхні й інструмента величина подачі на рядок апіорі буде визначатися кривизною поверхні у місці обробки, радіусом інструментальної поверхні і припустимою висотою гребінця h , що залишається на оброблюваній поверхні між двома сусідніми проходами (рис. 5). Ця висота визначатиме детерміновану складову параметра R_z шорсткості обробленої поверхні.

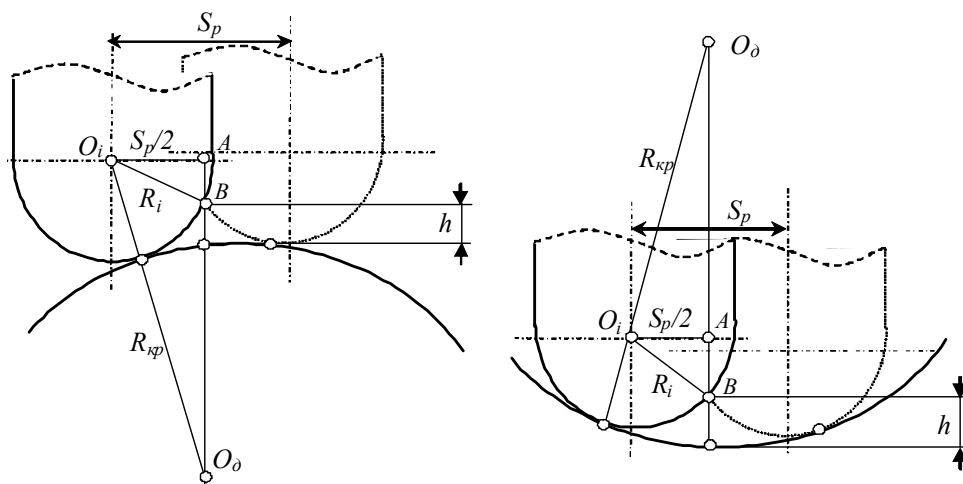


Рис. 5. Схема геометричної взаємодії інструмента та оброблюваної поверхні

З геометричних співвідношень трикутників O_iO_dA та O_iAB маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{S_{\delta}^2}{4} = R_i^2 - AB^2 \\ \frac{S_{\delta}^2}{4} = (R_i + R_{\text{ед}})^2 - (AB + h + R_{\text{ед}})^2 \end{cases} \quad (8)$$

Після нескладних алгебраїчних перетворювань отримаємо вираз для знаходження подачі S_p на рядок, що забезпечує допустиму величину висоти h гребінця:

$$S_{\delta} = \frac{\sqrt{-h \cdot (2 \cdot R_{\text{ед}} + h) \cdot (h - 2 \cdot R_i) \cdot (2 \cdot R_{\text{ед}} + h + 2 \cdot R_i)}}{R_{\text{ед}} + h}, \quad (9)$$

де $R_{\text{кр}}$ – радіус кривизни поверхні (береться з відповідним знаком).

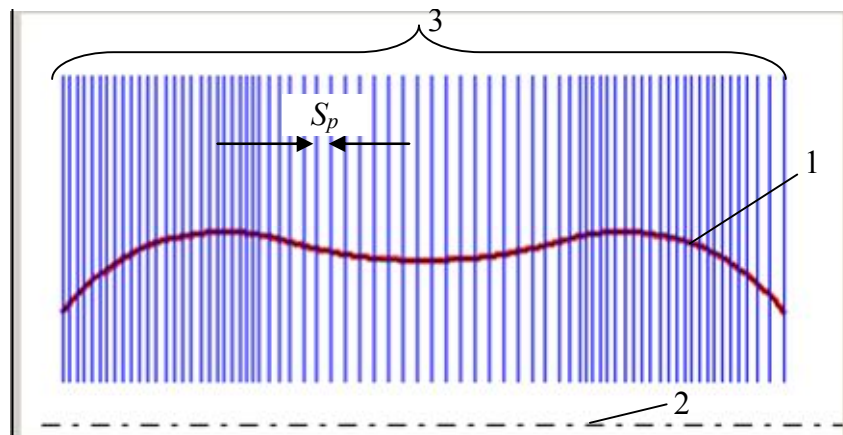


Рис. 6. Результати розрахунку подачі на рядок

Для виконання таких розрахунків була створена прикладна програма, що визначає масиви радіусів кривизни перетинів 3D за віссю Z (рис. 3) та величин подачі S_p на рядок залежно від заданої висоти h гребінця. Результати роботи програми при заданій висоті гребінця $h = 5$ мкм та радіусі округлення інструментальної поверхні $R_i = 30$ мм представлені на рис. 6, де лінією 1 позначений перетин поверхні протеза за віссю Z (лінія 2), а лініями 3 – відстань між проходами, тобто подача на рядок. Як і очікувалось, спостерігається зміна величини подачі S_p на рядок залежно від радіуса кривизни перетину та його знака (увігнута дільниця, опукла дільниця).

Висновки:

1. Обробку протезів колінних суглобів людини доцільно виконувати на трикоординатному верстаті з ЧПК та, залежно від матеріалу протеза, фрезеруванням сферичними фрезами або шліфуванням кругами, інструментальна поверхня яких має форму тора.
2. Для підготовки управляючих програм необхідно представити вихідну 3D модель у вигляді тривимірного цифрового масиву, розрахованого в полярній системі координат.
3. Для інтерполяції геометричної моделі доцільно застосовувати Ермітові кубічні сплайни, параметри яких визначаються за розробленою методикою.
4. При підготовці вихідних даних геометричної моделі їх формування необхідно виконувати з урахуванням оптимальної технологічної осі, що співпадає з віссю поворотної координати верстата з ЧПК, завдяки чому спрощується управління процесом формоутворення та зменшується похибка формоутворення при зміні діаметра шліфувального круга внаслідок його правок.
5. Для забезпечення моделювання процесу зрізування шару припуску у САМ системі попередньо (у САД системі) має бути визначений масив величин подачі на рядок, за умови забезпечення необхідної шорсткості обробленої поверхні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Петраков Ю.В. Пути развития интегрированных CAD/CAM систем в машиностроении / Ю.В. Петраков / Сучасні технології в машинобудуванні. – Вип. 3. – Харків : ХНТУ «ХПИ», 2009. – С. 160–167.
2. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю.В. Петраков / УкрНДІАТ. – К., 2004. – 384 с.

3. Кулик В.К. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей : монография / В.К. Кулик, Ю.В. Петраков, В.В. Готов. – К. : Техника, 1987. – 187 с.

ПЕТРАКОВ Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ», науковий керівник Галузевої лабораторії віртуальних засобів навчання.

Наукові інтереси:

– проектування верстатних пристроїв.

ПИСАРЕНКО В.В. – магістр Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– проектування 3D моделей;

– проектування програм управління верстатом з ЧПК.

РОЗЕНБЕРГ Олег Олександрович – доктор технічних наук, професор Інституту надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

– фізика і механіка процесу різання;

– холодне пластичне деформування металів і сплавів.

Подано 15.12.2009

Петраков Ю.В., Писаренко В.В., Розенберг О.О. Нова концепція проектування 3-Д моделі протеза колінного суглоба людини

Петраков Ю.В., Писаренко В.В., Розенберг О.О. Новая концепция проектирования 3-Д модели протеза коленного сустава человека

УДК 621.923

Новая концепция проектирования 3-Д модели протеза коленного сустава человека / Ю.В. Петраков, В.В. Писаренко, О.О. Розенберг

Представлена новая концепция проектирования 3-Д модели эндопротеза, которая учитывает кинематическую схему формосоздания станка с ЧПК, которая используется при его изготовлении. Предложенный метод позволяет получить геометрическую модель в виде упорядоченных цифровых массивов, которые есть входящими данными для САМ-системы проектирования программы управления станком с ЧПК. Кроме того, предлагается на этапе проектирования выполнить некоторые предварительные расчеты: определение оптимальных координат технологической оси, максимально возможного радиуса инструмента и шага между рядками при обработке в зависимости от заданной жесткости поверхности.