

УДК 621.8



П. І. Літовченко



В. А. Сало



В. М. Нечипоренко

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЧПУ ПРИ ОБРОБЦІ КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ВІЙСЬКОВИХ МАШИН І БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

На основі геометричного аналізу складних криволінійних поверхонь деталей запропоновані математична модель та методика автоматизованого розрахунку управляючої геометричної інформації для верстата з ЧПУ при формоутворенні дисковою фасонною фрезою з точковим контактом. Методика рекомендується для використання у системах САМ при підготовці управляючих програм для верстатів з ЧПУ у виробництві військових машин і будівельних конструкцій.

Ключові слова: поверхні матриць штампів і прес-форм, формоутворення і формоутворюючі елементи, схема формоутворення, координати точок траєкторії, дискова фасонна фреза, точки дотику інструмента і деталі.

Постановка проблеми. Найбільш масовими представниками класу деталей, що мають складну просторову форму, є деталі штампів і прес-форм. Так, до 40 % деталей легкового автомобіля виготовляється методом холодного штампування, а для виробництва автомобілів і військової техніки одного найменування потрібно понад три тисячі штампів [1]. При їх виготовленні на формоутворення складних криволінійних робочих поверхонь кінцевими фрезами припадає до 40 % загальної трудомісткості обробки. Високі вимоги до точності таких виробів спричинюють необхідність автоматизації процесів їх обробки. Одним з найбільш трудомістких процесів у машинобудуванні є виготовлення штампів, прес-форм та інших деталей зі складними криволінійними функціональними поверхнями. Такі вироби виготовляють на машинобудівних підприємствах, а також деяких підприємствах виробництва будівельних конструкцій, найчастіше в умовах одиничного, рідше дрібносерійного виробництва. Цим обумовлена висока трудомісткість виготовлення і висока собівартість готових виробів.

Основним засобом автоматизації механічної обробки деталей складної просторової форми є фрезерні верстати з ЧПУ. Але трудомісткість підготовки і налагодження управляючих програм обробки деталей значно обмежують застосування верстатів з ЧПУ. Управляючі програми містять інформацію про траєкторію руху ріжучого інструмента, режими різання т. і. ін. Вона необхідна для автоматичного виконання операції без втручання оператора-наладника. При цьому використання зазначених верстатів для формоутворення складних криволінійних поверхонь штампів і прес-форм стримується, в основному, труднощами математичного характеру. Це насамперед відсутність універсальних, узагальнених методів розрахунку управляючої геометричної інформації для верстатів з ЧПУ. Отже, стає актуальною задача розробки математичних моделей і створення окремих методик підготовки геометричної інформації для верстатів з ЧПУ в умовах одиничного і дрібносерійного виробництв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із шляхів вирішення вказаної задачі є застосування спеціалізованих модулів підготовки геометричних даних і програм для верстатів з ЧПУ у сучасних САПР важкого класу [2] ведучих світових компаній, таких як Dassault Systemes, що пропонує користувачам САПР CATIA; PTC, що випускає САПР Pro/Engineer (CREO Parametric) та ін.

У цих системах на основі методу скінченних елементів вирішуються задачі розрахунку траєкторії руху кінцевої фрези при обробленні складних, зокрема дискретно заданих поверхонь. Зазначені САПР важкого класу застосовуються на великих підприємствах з достатнім фінансовим ресурсом і передовим комп'ютерним і технологічним оснащенням. Застосування таких САПР у малих виробничих фірмах машинобудівної та будівельної галузей нерентабельне з причини їх високої початкової вартості, а також вартості обслуговування автоматизованих робочих місць на їх базі, вимог до кваліфікації адміністраторів, програмістів і операторів.

Крім того, матеріали, що застосовуються для виготовлення штампів, є важкооброблюваними, чим обумовлена низька продуктивність механічної обробки робочих поверхонь штампів і прес-форм кінцевим інструментом на верстатах з програмним управлінням [3]. У результаті досліджень робочих частин штампів, проведених у виробничих умовах, отримана порівняльна оцінка зносостійкості штампового інструмента, виготовленого зі сталей малого (У8А, У10А), підвищеного (ХВГ, 9ХС) і високого (Х12М) гартів. Проведені випробування показали, що є значний сумарний знос сталевих пуансонів і матриць у процесі їх експлуатації. Обробка різанням складних криволінійних поверхонь таких деталей частіш за все здійснюється на верстатах з ЧПУ за 3-5 координатними схемами [4]–[8]. Однак кінцеві фрези мають малу жорсткість, що при обробці важкооброблюваних матеріалів призводить до зниження точності виробів, низької продуктивності обробки через невисокі режими різання, високі витрати на інструменти. Також обробка в'язких високовуглецевих штампових сталей супроводжується виділенням значної кількості теплоти [9], що прискорює вихід з ладу інструмента. У таких умовах найбільш раціонально використовувати для формоутворення поверхонь штампів складної форми дискову фасонну фрезу, що має точковий дотик з поверхнею деталі. Така фреза має більш високу жорсткість, порівнюючи з кінцевими, дозволяє значно підвищити продуктивність обробки внаслідок збільшення гранично допустимих режимів різання. Однак на сьогодні відсутні достатньо універсальні методи розрахунку траєкторії дискових фасонних інструментів для обробки деталей складної форми на верстатах з ЧПУ. Дисковий фасонний інструмент (фреза або шліфувальний круг) може бути застосований для формоутворення значної номенклатури штампів і прес-форм криволінійної форми. Це передусім штампи і прес-форми (або їх знімні матриці) з опуклими і опукло-увігнутими криволінійними робочими поверхнями, у яких точки перегину має або тільки твірна, або тільки напрямна. До них можна віднести гладкі увігнуті, відкриті з трьох боків для входу і виходу інструментів поверхні при виконанні умов формоутворення. Застосування дискових фасонних фрез з точковим контактом стало можливим після оприлюднення праці [10], у якій розроблені математичний апарат для побудови загальних моделей формоутворення криволінійних поверхонь і структурний (матричний) метод їх реалізації.

Мета статті полягає у розробленні математичної моделі і створенні методики отримання геометричної інформації для ЧПУ при обробці складних функціональних криволінійних поверхонь деталей військових машин і технологічного обладнання будівельних споруд високопродуктивним ріжучим інструментом – дисковою фасонною фрезою.

Виклад основного матеріалу. В даній статті для побудови математичної моделі формоутворення використано математичний апарат багатопараметричних відображень, запропонованих у працях [10]–[19]. Відповідно до цього апарату значна частина складних криволінійних поверхонь може бути описана рівнянням гомогвинтової поверхні, утвореної переміщенням уздовж криволінійної прямої твірної, яка в процесі переміщення змінює форму. Кінематична схема формоутворення за 4-координатною схемою ЧПУ такої поверхні показана на рис. 1.

За цією схемою інструмент здійснює три прямолінійних переміщення (переноси) l_x, l_y, l_z вздовж координатних осей X, Y, Z відповідно, а також обертання φ навколо осі Y системи координат деталі XYZ . Структура такого руху отримується підстановкою в уніфіковану структуру [10] часткових значень матриць, в результаті чого отримаємо рівняння формоутворюючого руху інструмента у структурному вигляді:

$$m_{r_d} = m_{\varphi l_d} \cdot m_{e_{i0}} \cdot m_{r_1}, \quad (1)$$

де m_{r_d} – матриця прообразу (твірної) поверхні деталі, отриманого як геометричне місце точок контакту інструмента з номінальною формоутворюваною поверхнею:

$$m_{r_i} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$m_{\varphi l_n}$ – матриця комбінованого оператора повороту і переносу.

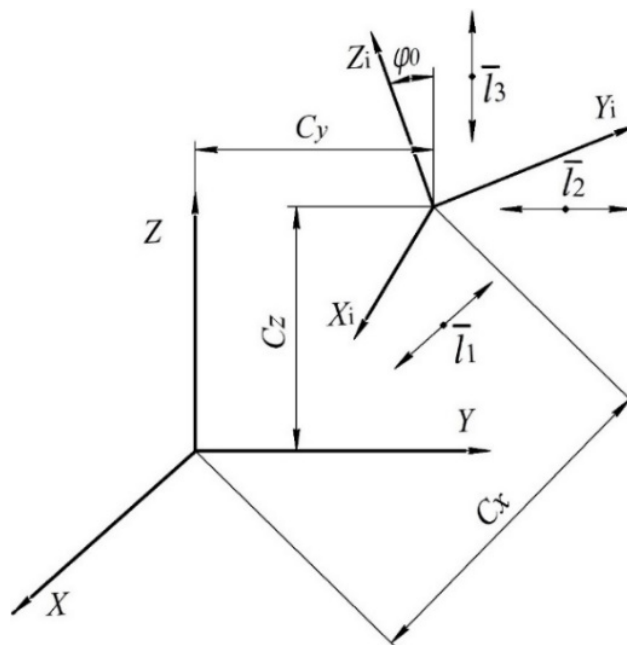


Рисунок 1 – Кінематична схема формоутворення складної криволінійної поверхні за 4-координатною схемою ЧПУ

Елементи цієї матриці є функціями параметрів руху і початкового положення інструмента. Для даного випадку вона має такий вигляд:

$$m_{\varphi l_n} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + c_x \\ 0 & \cos(\varphi + \varphi_0) & -\sin(\varphi + \varphi_0) & l_2 + c_y \\ 0 & \sin(\varphi + \varphi_0) & \cos(\varphi + \varphi_0) & l_3 + c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де l_1, l_2, l_3 – довжини векторів паралельного переносу повздовж координатних осей X, Y, Z відповідно;

φ – величина кута повороту відносно осі Y ;

c_x, c_y, c_z, φ_0 – параметри початкового положення інструмента відносно осей координат X, Y, Z

і кута повороту навколо осі Y .

Матриця образу поверхні інструмента

$$m_{r_i} = \begin{pmatrix} \rho_i \cdot \cos \mu_i \cdot \cos \nu_i \\ \rho_i \cdot \cos \mu_i \cdot \sin \nu_i \\ R_s - \rho_i \cdot \sin \mu_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де ρ_i – радіус-вектор точок вихідного профілю інструмента;

μ_i – кутовий параметр точок профілю (кут нахилу радіуса-вектора до осі Y_i);

ν_i – кут повороту профілю навколо осі Y_i при утворенні інструмента.

Матриця повороту прообразу інструмента при його утворенні (див. рис. 2):

$$m_{\theta\varphi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega \cdot t_2) & -\sin(\omega \cdot t_2) & 0 \\ 0 & \sin(\omega \cdot t_2) & \cos(\omega \cdot t_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де ω і t_2 – кутова швидкість і незалежний параметр повороту профілю.

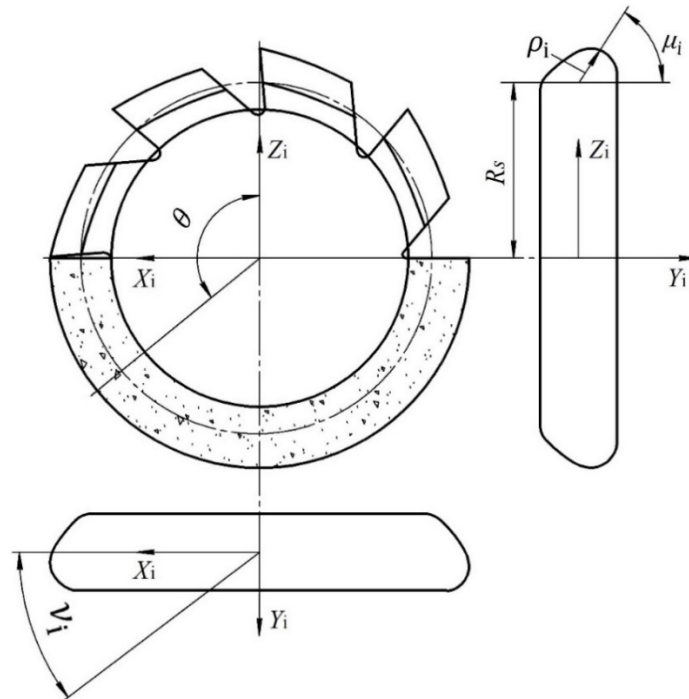


Рисунок 2 – Система координат і параметри дискового фасонного інструмента

Рівняння інструментальної поверхні у параметричному вигляді мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} x_1 &= (R_s - R \cdot \sin \mu_1) \sin \theta_1, \\ y_1 &= R \cdot \cos \mu_1, \\ z_1 &= (R_s - R \cdot \sin \mu_1) \cos \theta_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Після виконання дій над матрицями в структурному рівнянні (1) отримано параметри формоутворюючого руху дискового фасонного інструмента, які визначають у просторі точки дотику інструмента і деталі, отже, дискретна множина вказаних точок описує формоутворювану поверхню:

$$\theta = \arcsin \frac{k_4}{\sin \mu_1}, \quad (7)$$

$$\mu_1 = \arccos(-k_5 \cdot \cos \varphi - k_6 \cdot \sin \varphi), \quad (8)$$

$$l_1 = m_{r_1} - (R_s - R \cdot \sin \mu) \sin \theta_1, \quad (9)$$

$$l_2 = m_{r_2} - R \cdot \cos \mu_1 \cdot \cos \varphi + (R_s - R \cdot \sin \mu_1) \cos \theta_1 \cdot \sin \varphi, \quad (10)$$

$$l_3 = m_{r_3} - R \cdot \cos \mu_1 \cdot \sin \varphi - (R_s - R \cdot \sin \mu_1) \cos \theta_1 \cdot \cos \varphi, \quad (11)$$

де
$$k_4 = \frac{m_{t_2}^{t_1} m_{t_3}^{t_2} - m_{t_2}^{t_3} m_{t_3}^{t_1}}{N}; k_5 = \frac{m_{t_3}^{t_1} m_{t_2}^{t_3} - m_{t_3}^{t_2} m_{t_2}^{t_1}}{N}; k_6 = \frac{m_{t_1}^{t_2} m_{t_2}^{t_3} - m_{t_1}^{t_3} m_{t_3}^{t_2}}{N}. \quad (12)$$

У цих виразах m_{t_i} ($i = 1, 2, 3$) – елементи матриці поверхні деталі m_{t_i} , $m_{t_i}^{t_1}$, $m_{t_i}^{t_2}$ ($i = 1, 2, 3$) – елементи матриць похідних поверхні деталі за параметрами t_1 і t_2 , отриманих диференціюванням структурного рівняння (1); N – модуль нормалі \vec{N} до поверхні деталі у точці, що розглядається.

Наступною задачею є встановлення функціональних зв'язків вказаних параметрів з параметрами кінематичних рухів елементів верстата з ЧПУ, тобто задання швидкості лінійних переміщень інструмента за керованими координатами залежно від заданої хвилинної подачі уздовж траєкторії. Час, що відповідає формоутворенню заданої точки поверхні деталі при русі інструмента уздовж направляючої

$$t = \frac{l_1}{S_M \cdot \cos \varphi}. \quad (13)$$

Враховуючи, що

$$l_1 = S_1 \cdot t; l_2 = S_2 \cdot t; l_3 = S_3 \cdot t, \quad (14)$$

остаточно маємо:

$$S_1 = S_M \cdot \cos \psi; S_2 = \frac{l_2}{t} S_M \cdot \cos \psi; S_3 = \frac{l_3}{t} S_M \cdot \cos \psi. \quad (15)$$

Аналогічно визначена швидкість лінійних переміщень під час руху інструмента вздовж твірної:

$$t = \frac{l_2}{S_M \cdot \cos \omega}, \quad (16)$$

$$S_1 = \frac{l_1}{t} S_M \cdot \cos \omega; S_2 = S_M \cdot \cos \omega; S_3 = \frac{l_3}{t} S_M \cdot \cos \omega. \quad (17)$$

У наведених виразах S_1, S_2, S_3 – швидкості лінійних переміщень інструмента вздовж координатних осей X, Y, Z відповідно; ψ, ω – кути нахилу вектора сумарної хвилинної подачі до осей X і Y відповідно. Для випадку дискретного задання поверхні деталі більш точним буде визначення значень за такою методикою.

У кожен момент часу сумарне переміщення інструмента в просторі визначатиметься за формулою

$$l = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}. \quad (18)$$

Оскільки довжина вектора сумарного переміщення дорівнює добутку хвилинної подачі на час, то

$$t = \frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}}{S_M}. \quad (19)$$

Потім, використовуючи залежності (17), знаходимо величини швидкості лінійних переміщень:

$$S_1 = \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}} S_M; S_2 = \frac{l_2}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}} S_M; S_3 = \frac{l_3}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}} S_M. \quad (20)$$

На основі наведених міркувань визначена послідовність розрахунку геометричної інформації при обробці за 4-координатною схемою ЧПУ складної криволінійної поверхні гомогвинтової структури. Методика і математичні моделі апробовані на розрахунках геометричної інформації для формоутворення деталі складної форми – матриці штамп (див. рис. 3).

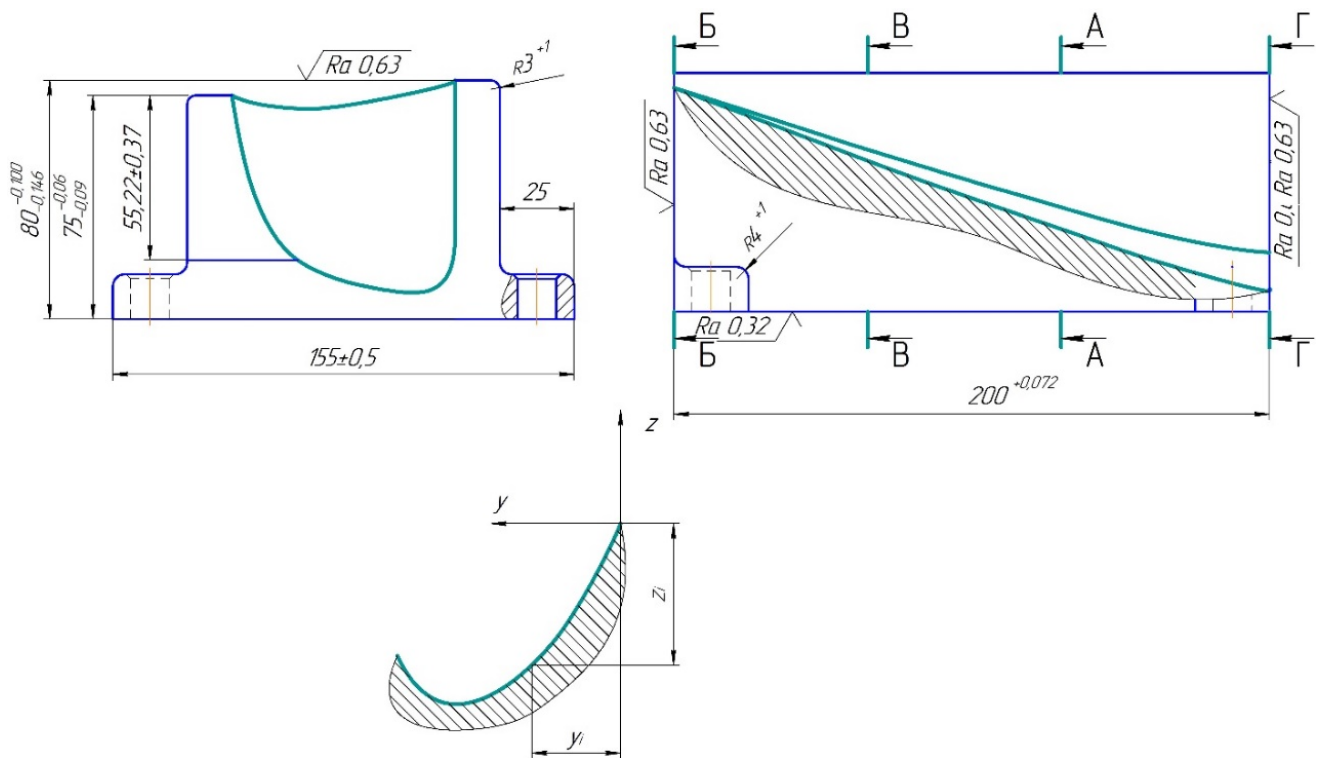


Рисунок 3 – Задання формоутворюваної поверхні струмка матриці

Поверхня струмка матриці штампа, що підлягає формоутворенню, задана дискретно перерізами А-А, Б-Б, В-В, Г-Г і координатами їх точок (див. табл. 1). За результатами аналізу геометричної структури поверхні встановлено, що вона утворена переносом уздовж осі X і обертанням навколо тієї ж осі плоскої твірної, яка змінює свій масштаб уздовж осі Z .

Отже, поверхня деталі віднесена до досліджуваного класу поверхонь гомогвинтової структури. Для переходу від дискретного до наближеного аналітичного задання поверхні використовуємо методику, що запропонована у праці [10]. Рівняння поверхні в параметричному вигляді:

$$\begin{aligned}
 x &= t_2 ; \\
 y &= B_1 \cdot t_1 \cos(\omega \cdot t_2) - B_2(1 + V_g \cdot t_2) \sin t_1 \cdot \sin(\omega \cdot t_2) ; \\
 z &= B_1 \cdot t_1 \sin(\omega \cdot t_2) - B_2(1 + V_g \cdot t_2) \sin t_1 \cdot \cos(\omega \cdot t_2),
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

де t_1, t_2 – незалежні параметри поверхні деталі;

B_1, B_2 – коефіцієнти при параметрах t_1, t_2 , відповідно;

V_g – коефіцієнт трансформації профілю деталі.

Розглядаючи окремо поза зв'язком з корпусом матриці поверхню струмка, вибрали як вихідний профіль твірної профіль перетину А-А. Рівняння твірної при $t_2 = 0$ має такий вигляд:

$$x = 0; y = B_1 \cdot t_1; z = B_2 \cdot \sin t_1.
 \tag{22}$$

Таблиця 1 – Дискретне задання поверхні струмка

Точки	Координати	Перерізи			
		А-А	Б-Б	В-В	Г-Г
1	x	0.00	-65.00	-130.00	-200.00
	y	0.00	0.00	0.00	0.00
	z	0.00	0.00	0.00	0.00
2	x	0.00	-65	-130	-200
	y	22.45	19.40	12.45	1.05
	z	-7.10	-21.10	-34.10	-45.93
3	x	0.00	-65.00	-130.00	-200.00
	y	45	40.44	30.15	13.13
	z	-10	51	-51.95	71.13
4	x	0.00	-65.00	-130.00	-200.00
	y	67.45	63.81	55.22	40.78
	z	-7.10	-28.40	-48.16	-57.05
5	x	0.00	-65.00	-130.00	-200.00
	y	75	72.05	54.92	52.92
	z	-5.00	-24.26	-42.57	-60.21

Оскільки апліката твірної має максимальне значення при $t_2 = 1,5708$ рад, то з виразу (20) отримано:

$$B_1 = \frac{y_{\max}}{1.5708} = 28,6475; B_2 = z_{\max} = -10, \quad (23)$$

де y_{\max}, z_{\max} – значення координат y і z в точці максимального прогину твірної.

За значенням B_1 для кожної точки твірної визначений параметр t_1 за формулою $t_1 = \frac{y}{B_1}$. Використовуючи вирази для y і x з рівнянь (19), знаходимо залежності для визначення сталої ω і коефіцієнтів зміни масштабу V_g для кожної із заданих точок поверхні:

$$\omega = \frac{\arcsin\left(-\frac{B_1 \cdot t_1 \cdot z_1}{y^2 - z^2}\right) + \sqrt{\frac{B_1^2 \cdot t_1^2}{(y^2 - z^2)^2} - \frac{y^2 - B_1^2 \cdot t_1^2}{y^2 - z^2}}}{t_2}, \quad (24)$$

$$V_g = \frac{y \cdot \sin \omega \cdot t_2 - z \cos \omega \cdot t_2 - 1}{-B_2 \cdot \sin t_1}. \quad (25)$$

Надалі розраховано значення ω для одного з перерізів, наприклад, В-В: $\omega_{В-В} = 0,00243$, яке взято й для інших перерізів. Для компенсації похибки наближення, яка може виникнути через це припущення ($\omega = \text{const}$), обчислено значення V_g у кожній точці поверхні й проаналізовано їх значення. Як показав аналіз, коефіцієнти зміни масштабу V_g не залежать від параметрів t_1 і t_2 , їх значення розрізняються лише у п'ятому знаку після коми ($V_{g\min} = -0,023333$, $V_{g\max} = -0,02333382$), тому з достатньою точністю прийнято $V_g = -0,023333 = \text{const}$. Таким чином, визначено, що твірна змінює свій масштаб вздовж осі X за лінійною залежністю $g = 1 - 0,023333t_2$.

Остаточно значення всіх сталих величин у рівняннях (7)–(11), (19)–(21) дорівнюють

$$B_1 = 28,64775; B_2 = -10; \omega = 0,002443; V_g = -0,023333. \quad (26)$$

Отже, отримано дві моделі поверхні деталі: структурне рівняння (1) в сукупності з матрицями (2)–(5) і значеннями сталих (26) є наближеною структурною моделлю, а параметричні рівняння (21) разом зі значеннями сталих (26) утворюють наближену аналітичну модель заданої поверхні. Ці моделі аналітично задають поверхню струмка матриці в системі координат XYZ .

Дослідження точності наближення, заданої креслеником, показали, що максимальна абсолютна похибка наближення $\Delta_{max} = 0,0312$ мм є прийнятною для допуску на обробку струмка $\Delta_{max} = 0,15$ мм. Як інструментальна була взята поверхня обертання з круговим профілем, окресленим дугою кола з радіусом R . Досліджувалася область, найбільш небезпечна з погляду на наявність «підрізів». Встановлено, що є точки перерізів струмка з параметром $t_1 = 1,5708$ рад, тобто точки найбільшого прогину твірної, в яких велика ймовірність появи «підрізів». Для всіх точок профілю розраховувалися радіуси кривизни, найменший з яких $\rho_{min} = 14,1448$ мм, на підставі чого вибраний радіус профілю інструмента $R = 11$ мм. За аналогією визначалось допустиме значення параметра R_s , для чого розраховано мінімальний радіус кривизни прямої струмка матриці штампа, мінімальне значення якого $R_{smin} = 2557,73$ мм, тому з конструктивних міркувань вибраний радіус $R_s = 79$ мм.

Розрахунок параметрів траєкторії інструмента виконано за залежностями (6)–(10) двічі: при $\varphi = 0$ для трикоординатної схеми формоутворення; при $\varphi \neq const$ для чотирикоординатної схеми. Аналіз результатів показав, що при обробці з управлінням за трьома координатами перша умова формоутворення виконується у всіх перерізах. Разом з тим, враховуючи гвинтовий характер поверхні струмка, можна припустити наявність «підрізу» вертикальної ділянки оброблюваного контуру. Така можливість повністю усувається після введення четвертої управляємої координати – повороту інструмента навколо осі X (див. рис. 1). У цьому випадку виконуються всі три умови формоутворення і відсутні «підрізи» номінальної поверхні деталі як у зоні локалізації точки дотику, так і поза нею.

Таким чином, запропонована методика розрахунку геометричної інформації при формоутворенні складної криволінійної поверхні гомогвинтової структури на верстаті з ЧПУ, яка включає такі етапи:

- перехід від дискретного до наближеного аналітичного задання поверхні деталі;
- побудова структурної і аналітичної моделей формоутворення з використанням апарату багатопараметричних відображень;
- розрахунок траєкторії формоутворюючого руху дискової фасонної фрези для три- та чотирикоординатної схем обробки на верстатах з ЧПУ;
- аналіз траєкторії на наявність зон інтерференції формоутворюваної і інструментальної поверхонь та корекція її за наявності таких зон.

Висновки

У результаті виконаного дослідження на основі геометричного аналізу складних криволінійних поверхонь деталей запропоновані математична модель та методика розрахунку управляючої геометричної інформації для верстата з ЧПУ при формоутворенні дисковою фасонною фрезою з точковим контактом. В основу методики покладено теорію багатопараметричних відображень і методи її використання для побудови моделей формоутворення складних криволінійних поверхонь.

Перевагою розробленої методики є можливість застосування більш жорстких і високопродуктивних дискових фрез замість кінцевих для оброблення складних криволінійних поверхонь.

Запропоновану методику рекомендується використовувати у системах САМ при підготовці управляючих програм для верстатів з ЧПУ у виробництві військових машин і будівельних конструкцій.

Перспективою розвитку досліджень є адаптація методики до використання в існуючих засобах підготовки геометричної інформації для верстатів з ЧПУ.

Перелік джерел посилання

1. Tomas Dodok, Nadegda Cubonova, Miroslav Cisar, Vitalii Ivanov. Influence of CNC milling strategies on complex surface machining. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 776 (2020) 012002IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/776/1/012002. URL: <https://www.researchgate.net/publication/340387473>.
2. Tracy Woo. Computer-Aided Design (CAD) data management. *Increasing productivity through a single solution* (2016). URL: <https://www.solidworks.com/sw/docs/CAD-DataMgmt-Productive-Single-Solution.pdf/>.
3. Path, feedrate and trajectory planning for free-form surface machining: A state-of-the-art review / Yuwen SUN et al. *Chinese Journal of Aeronautics*. Available online 3 July 2021. In Press, Uncorrected Proof. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936121002156#!>.
4. Witty M., Bergs T., Schafer A., Cabral G. Cutting tool geometry for plunge milling-process optimization for a stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. Vol. 213, Is. 8. P. 1378–1386.
5. Ming T., Dinghua Z., Ming L., Baohai W. Tool Path Generation for Clean-up Machining of Impeller. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2012. Is. 25. P. 131–136.
6. Курьлев Д. В. Основы формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07. Казань, 2016. 134 с. URL: <http://www.ulstu.ru/main?cmd=file&object=13888>.
7. Yigit I. E., Ehsan S., Layegh K., Lazoglu I. A solid modeler based engagement model for 5-axis ball end milling. *Procedia CIRP*. 2015. 31. P. 179–184.
8. Літовченко П. І., Сало В. А., Нечипоренко В. М., Іванова Л. П. Забезпечення умов формоутворення поверхонь робочих коліс газотурбінних двигунів. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2017, Вип. 2 (30). С. 83–87.
9. Study of Heat Transfer Conditions in the Cutting Zone When Grinding. DSMIE 2021 / M. Stepanov et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. P. 173–181.
10. Перепелица Б. А., Литовченко П. И. Математическое и программное обеспечение структурного метода моделирования формообразования. *Теория и методы автоматизации проектирования*. Минск, 1985. С. 112–122.
11. Літовченко П. І. Забезпечення геометричних умов формоутворення при обробці поверхонь деталей інструментом з точковим контактом. *Збірник наукових праць*. Харків : Військ. ін-т ВВ МВС України, 2004. Вип. 1–2 (3–4). С. 44–47.
12. Літовченко П. І., Нечипоренко В. М., Сало В. А., Іванова Л. П. Новий науково обґрунтований метод автоматизованого проектування посадок з натягом. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2013. Вип. 1. С. 74–79.
13. Сало В. А., Литовченко П. И., Чижиков И. В. Напряженно-деформированное состояние упругой цилиндрической панели с отверстием. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. Харьков, 2011. Вып. 1 (65). С. 63–70.
14. Сало В. А. Доказательство достаточного признака сходимости метода Ритца для смешанного вариационного принципа Рейсснера. *Вестник ХГПУ*. Харьков, 2000. Вып. 95. С. 70–75.
15. Calculation of stress concentrations in orthotropic cylindrical shells with holes on the basis of a variational method / V. Salo et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, Issue 7 (99). P. 11–17. DOI: [10.15587/1729-4061.2019.169631](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169631).
16. Сало В. А., Горбунов А. П., Нечипоренко В. М. Дослідження вірогідної зони придатних посадок з натягом при автоматизованому проектуванні. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Серія: Технічні науки. № 2 (80) Т. 1. Житомир, 2017. С. 73–77.
17. Використання теорії R-функцій для створення раціональних посадок з натягом / В. М. Нечипоренко та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2016. Вип. 2 (28). С. 72–76.
18. Літовченко П. І., Сало В. А., Іванова Л. П. Автоматизований синтез і розрахунок параметрів механічних приводів на основі нового підходу до їхньої систематизації. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. Харків, 2011. Вип. 2 (18). С. 11–14.

19. Method of design of interference fit based on complex mathematical modeling / Nechiporenko V. M. et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020 Conference Proceedings, LNME. 2020. Vol. 1. Manufacturing and Materials Engineering. P. 45–54. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_5.*

Стаття надійшла до редакції 28.10.2021 р.

УДК 621.8

П. И. Литовченко, В. А. Сало, В. Н. Нечипоренко

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЧПУ ПРИ ОБРАБОТКЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВОЕННЫХ МАШИН И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На основе геометрического анализа сложных криволинейных поверхностей деталей предложены математическая модель и методика автоматизированного расчета управляющей геометрической информации для станка с ЧПУ при формообразовании дисковой фасонной фрезой с точечным контактом. Методика рекомендуется для использования в системах САМ при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ в производстве военных машин и строительных конструкций.

К л ю ч е в ы е с л о в а : поверхности матриц штампов и пресс-форм, формообразование и формообразующие элементы, схема формообразования, координаты точек траектории, дисковая фасонная фреза, точки касания инструмента и детали.

UDC 621.8

P. Litovchenko, V. Salo, V. Nechiporenko

MATHEMATICAL MODEL AND METHOD FOR CALCULATING GEOMETRIC INFORMATION FOR CNC WHEN PROCESSING CURVOLINIC SURFACES IN THE PRODUCTION OF MILITARY VEHICLES AND BUILDING CONSTRUCTIONS

On the basis of the geometrical analysis of difficult curvilinear surfaces of details the mathematical model and a technique of the automated calculation of the operating geometrical information for the machine with CNC at forming by a disk-shaped drem with a point contact is developed. The technique is recommended for use in CAM systems when preparing control programs for CNC machines. Methods and software tools for calculating geometric information in the formation of a complex curvilinear surface of a homoscrew structure on a CNC machine, which includes the following stages: the transition from a discrete to an approximate analytical task of the surface of the part; construction of structural and analytical models of formation with the use of the apparatus of multiparameter mappings; calculation of the trajectory of the form-forming motion of a disk shaped mill at three- and four-coordinate schemes of processing on CNC machines; - trajectory analysis for the presence of interference zones of the formed and tool surfaces with its correction in the presence of such zones.

At particular values of the parameters, the obtained analytical and structural dependences for calculating the parameters of the trajectory are invariant with respect to the type of tool used - disk and end mills. Thus, the described technique can be used to calculate the trajectory of both disk and end tools in the production of military vehicles and elements of construction equipment.

The advantage of this technique is the lack of a stage of building 3D models using expensive licensed heavy-duty software, which makes it available for small production forms of engineering and building construction industries.

К e y w o r d s : surfaces of dies and molds, forming and forming elements, forming scheme, coordinates of trajectory points, disk shaped mill, tool contact points and parts

Літовченко Петро Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>

Сало Валентин Андрійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0003-2533-0949>

Нечипоренко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0002-4727-7344>