

УДК 621.9.04:621.914-529



П. І. Літовченко



В. А. Сало



В. М. Нечипоренко



Л. П. Іванова

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ РОБОЧИХ КОЛІС ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Наведено результати аналізу умов формоутворення поверхонь газового каналу робочих коліс газотурбінних двигунів і створення на цій основі методики розрахунку параметрів корекції траєкторії ріжучого інструмента при обробці на верстаті з ЧПК.

Ключові слова: умови формоутворення, формоутворюючі рухи, інструментальна поверхня, дискретна математична модель формоутворення, кінцева фреза, траєкторія ріжучого інструмента.

Постановка проблеми. Лопатки робочих коліс газотурбінних двигунів (ГТД), компресорів та ін. утворюють сукупність газових каналів, які обмежені складними дискретно заданими поверхнями. Для їх формоутворення звичайно використовують різноманітні схеми обробки різанням на багатокординатних верстатах з ЧПК. Як правило, ефективному застосуванню верстатів з ЧПК для обробки складних криволінійних поверхонь перешкоджають труднощі математичного характеру. Такі труднощі обумовлені дискретністю завдання робочих поверхонь лопаток, малою жорсткістю кінцевих інструментів, які застосовуються, складністю траєкторії їхнього руху, високою ймовірністю пошкодження номінальних поверхонь лопаток при їх нерегламентованому контакті з інструментом – “підрізами”.

Отже, актуальною проблемою є підвищення ефективності процесу формоутворення складних криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК шляхом розробки і впровадження ефективних математичних моделей формоутворення, методів і алгоритмів розрахунку керуючої геометричної інформації, розширення номенклатури використовуваних інструментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати останніх досліджень [1, 2] показують, що для попередньої обробки як моноколів ГТД, так і знімних лопаток застосовується фрезерування міжлопаткових каналів кінцевими фрезами на верстатах з ЧПК. Також ведеться пошук нових технологічних схем обробки коліс. Наприклад, на підприємстві АО “Мотор Січ” для попередньої обробки моноколів впроваджено їх гідроабразивну обробку на п’ятикоординатному верстаті з ЧПК. За такої технології підвищується собівартість коліс, проте, її застосування для високоміцних коліс з титанових і інших жароміцних сплавів цілком виправдане.

Для більшості коліс ГТД розробляються нові ефективні схеми формоутворення кінцевою фрезою [3]. Одночасно удосконалюються системи геометричного моделювання, що використовуються при підготовці програм для верстатів з ЧПК.

Метою статті є розроблення ефективної методики розрахунку параметрів корекції траєкторії інструмента при обробці робочих коліс ГТД з метою забезпечення їх формоутворення різанням із заданими точністю і продуктивністю.

Виклад основного матеріалу. У даній статті вирішується задача розрахунку траєкторії та параметрів її корекції для схеми формоутворення кінцевою фрезою з конічною ріжучою частиною поверхні газового каналу робочого колеса ГТД. За основу побудови математичної моделі формоутворення прийнято теорію багатопараметричних відображень [4], відповідно до якої робочі поверхні лопаток описано як поверхні складної гвинтової структури зі змінною напрямною – гомогвинтові. При цьому автори використовували дискретну математичну модель поверхні деталі. Після розрахунку отримано дискретно задану траєкторію руху інструмента. З цієї причини для аналізу виконання умов формоутворення також застосовано ітераційні методи дослідження і розрахунку. Розглянемо один з варіантів реалізації вказаної методики.

Нехай кінцева фреза 4 (рис. 1) при формоутворенні поверхні 1 корита рухається по заздалегідь розрахованій траєкторії. Вважаємо, що попередньо габаритні розміри інструмента вибрані з урахуванням розмірів критичного перерізу газового каналу, тобто:

$$d \leq S_{н.мин}; D \leq S_{в.мин}; l_{max} \geq H, \quad (1)$$

де d, D, l_{max} – габаритні розміри ріжучої частини конічної пальцевої фрези; $S_{н.мин}, S_{в.мин}, H$ – розміри критичного перерізу газового каналу.

При русі по розрахунковій траєкторії можливі три випадки інтерференції інструментальної та формоутворюваної поверхонь:

1) у парі фреза 4 – корито 1 і (або) у парі фреза 4 – спинка 2, а також у парі фреза 4 – маточина 3 (рис. 2, а);

2) у парі фреза 4 – корито 1 і (або) фреза 4 – спинка 2 (рис. 2, б);

3) у парі фреза 4 – маточина 3 (рис. 2, в).

Наявність інтерференції, отже, “підрізів” зазначених елементів робочого колеса, визначимо так. Нехай інструментальна поверхня кінцевої фрези з конічною ріжучою частиною отримана перенесенням уздовж осі і одночасною зміною масштабу нижньої основи конуса – кола радіуса $R = d/2$, де d – діаметр малої підстави конуса (рис. 3).

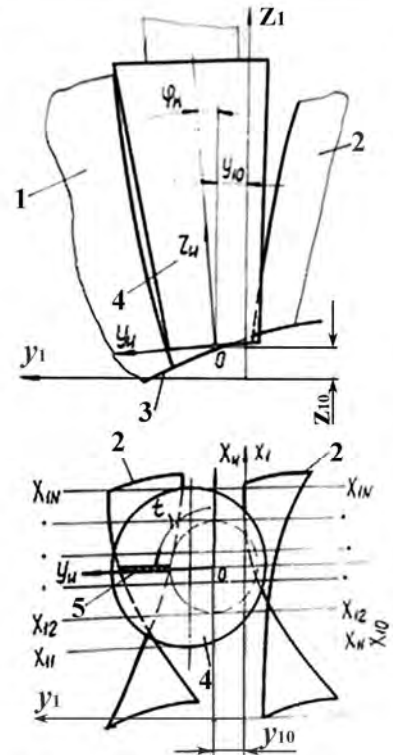


Рис. 1. До аналізу умов формоутворення каналової поверхні

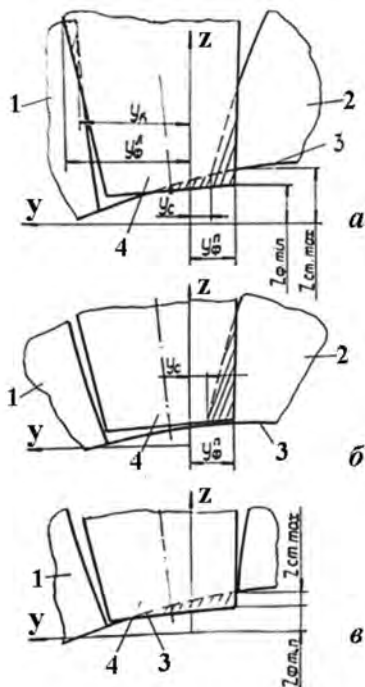


Рис. 2. Три випадки інтерференції інструментальної та формоутворюваної поверхонь

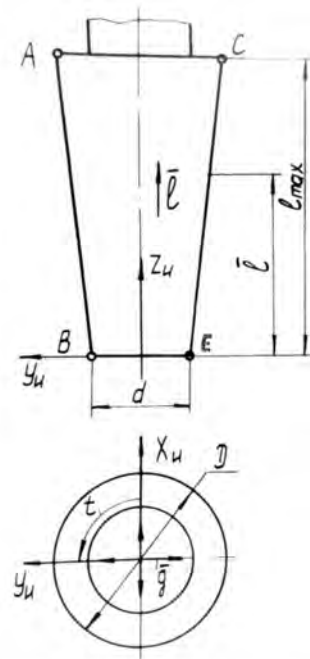


Рис. 3. Параметри кінцевої фрези з конічною ріжучою частиною

Структурне рівняння [4] інструментальної поверхні в системі координат деталі має такий вигляд:

$$m_{r\phi} = m_{\phi C} m_{gl} m_{rOB}, \quad (2)$$

де $m_{\phi C}$ – матриця координатного оператора, що задає положення фрези в системі координат деталі; m_{gl} – матриця комбінованого оператора гомотетії і переносу; m_{rOB} – матриця-стовпець твірної конуса.

Як $m_{\varphi C}$ використано матрицю уніфікованого оператора повороту [4], елементи котрого є функціями кута φ_K для корита або кута φ_C для спинки при $l_x = 0; l_y = y_{1O}; l_z = z_{1O}$, де $\varphi_K, \varphi_C, y_{1O}, z_{1O}$ – параметри траєкторії інструмента.

Матриця m_{gl} – уніфікований оператор гомотетії-переносу при $g_x = g_y = g; l_x = l_y = 0; l_z = l$, де g – значення функції зміни масштабу \bar{g} ; l – довжина вектора переносу \bar{l} .

Матриця прообразу (окружності нижньої підстави конуса) має такий вигляд:

$$m_{rOB} = \begin{pmatrix} R \cos t \\ R \sin t \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де t – параметр окружності; R – радіус окружності-прообразу.

Виконуючи дії над матрицями у виразі (2), отримано координатні рівняння інструментальної поверхні в системі координат $X_1Y_1Z_1$ деталі:

$$\begin{aligned} x_{\varphi} &= (1 + gl)R \cos t; \\ y_{\varphi} &= (1 + gl)R \sin t \cos \varphi - l \sin \varphi + y_{1O}; \\ z_{\varphi} &= (1 + gl)R \sin t \sin \varphi + l \cos \varphi + z_{1O}. \end{aligned} \quad (4)$$

Якщо вважати, що фреза 4 дотикається до поверхні корита 1 по лінії 5 (див. рис. 1), то її положення у системі координат XYZ деталі визначається координатами x_{1O}, y_{1O}, z_{1O} та кутом нахилу осі φ_K . Для визначення зон інтерференції інструментальної та формоутворюваної поверхонь скористаємося методом перетинів. Задамо ряд січних площин x_{1i} ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), перпендикулярних осі x_1 . Оскільки “підріз” будь-якого з елементів газового каналу робочого колеса (корита, спинки або маточини) можливий лише на ділянці, обмеженій габаритами інструмента, січні площини вибираємо у такому діапазоні:

$$x_{1Oj} - \frac{D}{2} \leq x_{1i} \leq x_{1Oj} + \frac{D}{2}, \quad (5)$$

де x_{1Oj} – абсциса j -ї ($j = 1, 2, 3, \dots$) опорної точки траєкторії інструмента.

“Підріз” елементів поверхні газового каналу буде відсутній у разі виконання в кожній із заданих січних площин таких умов:

$$y_{\varphi ji}^L < y_{Kji}; \quad y_{\varphi ji}^P > y_{Cji}; \quad z_{\varphi i \min} > z_{MTi \max}, \quad (6)$$

де $y_{\varphi ji}^L, y_{\varphi ji}^P$ – ординати j -ї точки перетину інструментальної поверхні i -ю площиною (верхні індекси L і P позначають ліву і праву твірні фрези на рис. 1); y_{Kji}, y_{Cji} – координати j -х точок корита та спинки, відповідно, у i -му перерізі; $z_{\varphi i \min}$ – мінімальне значення аплікати фрези у i -му перерізі; $z_{MTi \max}$ – максимальне значення аплікати маточини у i -му перерізі.

Для визначення значень $y_{\varphi ji}^L, y_{\varphi ji}^P, y_{Kji}, y_{Cji}, z_{\varphi i \min}, z_{MTi \max}$ у кожній січній площині треба розв’язувати спільно рівняння зазначеної січної поверхні, поверхні деталі та інструментальної поверхні. Так як всі елементи поверхні газового каналу задані дискретно, то для знаходження його перетинів використано інтерполювання за методом Ейткена. Перерізи інструментальної поверхні знаходять аналітично точно, оскільки зазначена поверхня задана безперервно рівняннями (4). Маючи значення всіх величин, що входять в умови (6), можна проаналізувати всі варіанти невиконання цих умов, починаючи з найбільш простих.

Нехай не виконуються перша і (або) друга умови (6), тобто: $y_{\varphi ji}^L > y_{Kji}; \quad y_{\varphi ji}^P < y_{Cji}$. Це відповідає другому випадку інтерференції інструментальної та формоутворюваної поверхонь (див. рис. 2, б). Для усунення “підрізів” корита і спинки, що виникають у цьому випадку внаслідок інтерференції, необхідне введення в кінематичну схему додаткових керованих за програмою координат. Оскільки прийняте число керованих координат дорівнює чотирьом, тобто є незмінним, то усунути “підрізи”

можна тільки коригуванням габаритних розмірів інструмента за такими залежностями:

$$d' = d - \Delta d; \quad D' = D - \frac{D}{d} \Delta d, \quad (7)$$

де d', D' – скориговані значення діаметрів підстав конічної ріжучої частини фрези; Δd – величина корекції малого діаметра d .

Величина корекції Δd може бути визначена з умов відсутності “підрізу” за такою формулою:

$$\Delta d = 2 \cdot \max \left(\left[y_{\Phi ji}^{\prime\prime} - y_{Kji} \right], \left[y_{\Phi ji}^{\prime\prime} - y_{Cji} \right] \right). \quad (8)$$

Невиконання третьої умови (6) веде до інтерференції у парі фреза 4 – маточина 3 (див. рис. 2, в). “Підріз” маточини 3 у даному випадку можна усунути зміщенням фрези 4 уздовж твірної. При цьому рівняння для розрахунку координат скоригованої траєкторії матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} x'_{10} &= x_{10}; & y'_{10} &= y_{10} - \Delta z \cdot \operatorname{tg} \left(\varphi_K + \operatorname{arctg} \frac{D-d}{2l} \right); \\ z'_{10} &= z_{10} + \Delta z; & \varphi'_K &= \varphi_K, \end{aligned} \quad (9)$$

де $x'_{10}, y'_{10}, z'_{10}$ – координати опорних точок скоригованої траєкторії; Δz – величина корекції траєкторії фрези по осі Z .

Величину корекції Δz можна визначити за формулою

$$\Delta z = [z_{CT \max} - z_{\Phi \min}]. \quad (10)$$

При невиконанні трьох умов (6) спостерігається “підріз” всіх елементів поверхні газового каналу робочого колеса: корита, спинки і маточини (див. рис. 2, а). В цьому випадку коригуємо як габарити інструмента, так і траєкторію його руху, використовуючи для цього залежності (7) – (10). За аналогією з коритом здійснюється перевірка на відсутність “підрізів” траєкторії фрези при обробленні спинки.

Отже, алгоритм розрахунку габаритних розмірів кінцевої фрези і траєкторії її руху при формуванні поверхні газового каналу робочого колеса ГТД остаточно формулюється так:

1. Виконується геометричний аналіз поверхні деталі, за якого координати корита, спинки і маточини зводяться до єдиної системи координат деталі.

2. Визначаються перерізи газового каналу площинами, заданими з необхідною дискретністю. Вибирається критичний переріз, що має мінімальні розміри в нижній і верхній частинах газового каналу.

3. Визначаються попередні розміри інструмента з урахуванням розмірів критичного перерізу газового каналу і схема його формування.

4. Здійснюється попередній розрахунок координат опорних точок траєкторії інструмента за вибраною схемою обробки.

5. Знаходяться зони інтерференції інструмента та деталі, величини корекції розмірів інструмента і його траєкторія за залежностями (7) – (10). Як остаточні приймаються їхні максимальні значення для всіх перерізів.

6. Перехід до п. 4 даного алгоритму і розрахунок координат опорних точок скоригованої траєкторії, потім знов перевірка її на відсутність “підрізів” (п. 5). Перехід до п. 7 алгоритму здійснюється за відсутності інтерференції у всіх трьох парах сполучених поверхонь (див. рис. 2, а, б, в).

7. Виконується контроль правильності розрахунку, кодування інформації, налагодження, тестування і використання програми.

Висновки

Досліджено виконання умов формування при обробленні кінцевими фрезами каналових поверхонь робочих коліс ГТД та визначено ймовірні зони інтерференції інструментальної та формування поверхонь.

“Підріз” елементів каналових поверхонь усувається шляхом ітеративного вибору оптимальних габаритних розмірів інструмента і попередньої корекції його траєкторії. Величина корекції визначається параметрами формування поверхні і взаємного розташування інструмента і деталі.

Перспективою подальших досліджень є створення на основі методики корекції траєкторії ріжучого інструмента при формуванні криволінійних поверхонь газових каналів ГТС додатка

для використання у сполученні з системами підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК типу GeMMA-3D [1] та ін. Це дозволить використовувати її у системах автоматизованого проектування різних напрямків (CAD/CAM, SIM) для розрахунку геометричної інформації при обробленні робочих коліс на верстатах з ЧПК.

Список використаних джерел

1. Современные методы предварительной обработки моноколёс ГТД на станках с ЧПУ [Текст] / В. Ф. Мозговой, К. Б. Балущок, В. А. Панасенко, М. К. Бирук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8. – С. 5–10.
2. Крымов, В. В. Производство лопаток газотурбинных двигателей / В. В. Крымов. – Москва : Машиностроение : Машиностроение-Полёт, 2002. – 376 с.
3. Панасенко, В. А. Черновая обработка центробежных моноколёс ГТД с применением плунжерного фрезерования на обрабатывающих центрах с ЧПУ [Текст] / В. А. Панасенко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 48–51.
4. Перепелица, Б. А. Математическое и программное обеспечение структурного метода моделирования формообразования и поверхностей [Текст] / Б. А. Перепелица, П. И. Литовченко // *Теория и методы автоматизации проектирования*. – Минск : ИТК, 1985. – С. 112–122.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2017 р.

УДК 621.9.04: 621.914-529

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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАБОЧИХ КОЛЁС ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приведены результаты анализа условий формообразования поверхностей газового канала рабочих колёс газотурбинных двигателей и создание на этой основе методики расчёта параметров коррекции траектории режущего инструмента при обработке на станке с ЧПУ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: условия формообразования, формообразующие движения, инструментальная поверхность, дискретная математическая модель формообразования, концевая фреза, траектория режущего инструмента.

UDC 621.9.04: 621.914-529

P. I. Lytovchenko, V. A. Salo, V. M. Nechiporenko, L. P. Ivanova

PROVIDING THE CONDITIONS FOR FORMATION OF THE GAD WORKING COLLES SURFACE

The results of the analysis of the conditions of forming the surfaces of the gas channel of the working wheels of the GTE and the creation on this basis of the method for calculating the parameters of the correction of the trajectory of the cutting tool during machining on the CNC machine are given.

К e y w o r d s: conditions of forming, shaping movements, instrumental surface, discrete mathematical model of forming, final cutter, trajectory of cutting tool.

Літовченко Петро Іванович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

Сало Валентин Андрійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

Нечипоренко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

Іванова Лариса Петрівна – старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.