

УДК 621.822:681.2:369.64

О. Л. Кайдик

Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТОЧНІСТЮ ШЛІФУВАННЯ КІЛЕЦЬ КАРДАНИХ ПІДШИПНИКІВ

Описано методику оптимізації процесу обробки деталей абразивним інструментом на основі запропонованої динамічної теоретико-ймовірнісної моделі. Встановлено, що для оптимізації окремих технологічних операцій необхідно враховувати увесь комплекс обмежень, який визначає можливі межі зміни режимів різання.

Вступ

Точність та продуктивність технологічного обладнання визначають ефективність машинобудівного виробництва та якість продукції. Тому, проблема підвищення точності завжди була пріоритетною у виробництві різноманітних деталей машин та механізмів.

Одними з найпоширеніших виробів, які застосовуються в конструкціях машин різних галузей машинобудівного виробництва є підшипники кочення. Точність їх виготовлення істотно впливає на експлуатаційні показники машин. Тому, з'ясування питань забезпечення та стабілізації точності виготовлення підшипників є актуальною задачею сучасного виробництва.

Постановка завдання

Технологічний процес обробки деталей абразивно-алмазним інструментом необхідно подавати у вигляді динамічної системи, яка дає змогу намітити послідовність оптимізації технологічних процесів, представити загальний алгоритм рішення задач. Великий вклад у розробку

методик оптимізації технологічного процесу з точки зору забезпечення оптимальної точності формоутворення поверхонь внесли наступні учені: Корчак С.М.; Новосолов Ю.К.; Якімов О.В.; Ящерицин П.І. та інші.

До основних періодів проектування технологічного процесу шліфування слід віднести:

- виділення із технологічного процесу операцій шліфування з визначенням вихідних і кінцевих значень параметрів точності;
- вибір оптимального числа операцій шліфування деталі та визначення оптимальних значень параметрів точності після кожної операції;
- призначення вхідних змінних: параметрів верстата, характеристики абразивного інструменту, методу його правки, обладнання, складу МОР тощо;
- визначення оптимальних режимів та високовиробничих циклів шліфування.

Перший етап – виділення із технологічного процесу операцій шліфування, виконується згідно загальних методик проектування технологічних процесів на основі співставлення операцій шліфування за собівартістю та трудомісткістю з собівартістю і трудомісткістю обробки деталей іншими прийнятними методами [5].

Оптимізацію технологічного процесу шліфування можна виконати одним із методів теорії оптимально управління дискретними системами. До таких методів відносять: метод динамічного програмування, метод математичного програмування та метод локального перерізу.

В процесі оптимізації окремих технологічних операцій, коли $u(t)=const$, а значення параметру точності на i -тому етапі процесу не залежить від значення точності на $(i-1)$ -тому етапі, необхідно застосовувати методи

лінійного, геометричного та криволінійного програмування.

Використання методу лінійного програмування для оптимізації режимів шліфування і визначення високовиробничих циклів найбільш повно розглянуто у роботах [6, 7], методу криволінійного програмування – [3], а метод динамічного програмування для оптимізації технологічного процесу – [4].

Основний принцип динамічного програмування полягає у наступному: розв'язок повинен визначати оптимальну стратегію відносно стану, яка була отримана в результаті першопочаткового рішення [1, 2].

Для розв'язку задач методом динамічного програмування керування критерієм ефективності перетворено:

$$z_{i-1}(x) = \min [f_i(y_{i-1}; u_i(t) + z_i(x))], \quad (1)$$

де $z_i(x)$, $z_{i-1}(x)$ – найменше значення критерію ефективності на заключній частині технологічного процесу після i -тої та $(i-1)$ -тої операції.

Для оптимізації процесів обробки деталей абразивними інструментами на основі запропонованої динамічної теоретико-ймовірнісної моделі представляється можливим застосування динамічного програмування для призначення маршруту технологічного процесу й умов виконання окремих операцій. В процесі вирішення поставленої задачі необхідно розробити оптимізаційну модель та алгоритм.

З урахуванням найбільш важливих параметрів якості, таких як точність розмірів, просторові відхилення, глибина дефектного шару, шорсткість поверхні, система рівнянь набуде наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_i = r_{i-1} - \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij}; \\ \rho_i = \rho_{i-1} - \Delta \rho_i + \rho_{np}; \\ R_{\max_i} = \left\{ \begin{array}{l} R_{\max_{i-1}} - \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij}, \\ npi \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij} < R_{\max_{i-1}} - R_{\max_{fi}}; \\ f_R(V_k, V_u, S_y, S_x), \\ npi \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij} \geq R_{\max_{i-1}} - R_{\max_{fi}}; \end{array} \right. \\ T_i = \left\{ \begin{array}{l} T_{i-1} + R_{\max_{i-1}} - \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij} - R_{\max_{fi}}, \\ npi \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij} + R_{\max_{fi}} + T_{fi} < R_{\max_{i-1}} + T_i; \\ f_T(V_k, V_u, S_y, S_x), \\ npi \sum_{j=1}^N \Delta r_{ij} + R_{\max_{fi}} + T_{fi} \geq R_{\max_{i-1}} + T_i, \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

де Δr_{ij} – радіальне зняття металу на j -тому проході під час виконанні i -тої операції; $\Delta \rho_{npi}$ – зміна вихідних просторових відхилень на i -тій операції; ρ_{npi} – просторове відхилення, яке вноситься i -тою операцією внаслідок наявності вібрацій і поперечної подачі; T_{fi} , $R_{\max_{fi}}$ – глибина дефектного шару та шорсткості поверхні, які виникають на i -тій операції.

Величина радіус-вектора та просторові відхилення залежать від умов виконання операції, від значень радіус-вектора і просторових відхилень після попередньої операції. Величина заданого розміру та точність його

отримання у невідповідності заданого припуску визначаються з умов виконання операції. Вплив параметрів якості на забезпечення точності вихідного розміру може спостерігатися в наслідок зміни стану робочої поверхні інструменту та стану технологічної системи.

Глибина дефектного шару на i -тій операції може бути визначена аналітично на основі аналізу теплових явищ або згідно нормативних таблиць. Швидкість зміни просторових відхилень, у даному випадку буде рівною:

$$\dot{\rho} = AS_y^m \rho, \quad (3)$$

де A і m – коефіцієнти та показники степеня, які залежать від умов виконання операції.

В процесі оптимізації за швидкодією критерій ефективності – штучний час виконання i -тої операції – обчислюється за об'ємом матеріалу, який необхідно видалити з поверхні Q_{Ni} та хвилинному знятті матеріалу Q_{Mi} :

$$t_{umi} = \frac{Q_{Ni}}{Q_{Mi}} (1 + K_n + T_\delta) = \frac{\pi d L \Pi_i}{Q_{Mi}} (1 + K_n + T_\delta), \quad (4)$$

де K_n – коефіцієнт, який враховує вплив шляху врізання та відскок інструменту; T_δ – сума додаткових витрат часу; L – довжина оброблювальної поверхні; Π_i – припуск на шліфування, який визначається за загальноприйнятими методиками (за величиною вихідної шорсткості поверхні, глибиною дефектного шару, просторовими відхиленнями та похибками встановлення на операції, яка виконується).

Зняття матеріалу за одиницю часу Q_M залежить від умов виконання операції та обмежується технічними можливостями верстата, інструментом, вимогами, які висуваються до забезпечення заданих параметрів точності. Для процесу шліфування його необхідно розрахувати за наближеними рівняннями:

$$Q_M = 0,00439 K_6 K_c V_k n_3 R_{\max}^2 \sqrt{D_3 \rho_3}, \quad (5)$$

В якості основних технічних обмежень для оптимізації технологічного процесу було прийнято:

- трудомісткість обробки: $\sum_{i=1}^n t_{um} \leq T_{нор}$;
- число операцій технологічного процесу: $n \leq n_{max}$,
 $n \geq 0$;
- максимально допустиму величину сумарного припуску: $\sum_{i=1}^n \Pi_i \leq \Pi_{max}$.

Для оптимізації окремих технологічних операцій необхідно враховувати також весь комплекс обмежень, який визначає можливі межі зміни режимів шліфування (різання).

Початковий стан об'єкту характеризується наступною системою нерівностей:

$$\begin{aligned} r_{z_{max}} &\geq r_o \geq r_{z_{min}} ; & T_{z_{max}} &\geq T_o \geq T_{z_{min}} ; \\ R_{max z_{max}} &\geq R_{max o} \geq R_{max z_{min}} ; & & \\ \rho_{z_{max}} &\geq \rho_o \geq \rho_{z_{min}} , & & \end{aligned} \quad (6)$$

де індексами z_{max} та z_{min} – позначено допустимі верхні та нижні межі зміни параметрів точності заготовки.

Кінцевий стан об'єкта визначається:

$$\begin{aligned} r_{\partial_{max}} &\geq r_n \geq r_{\partial_{min}} ; & T_{\partial_{max}} &\geq T_n \geq T_{\partial_{min}} ; \\ R_{max \partial_{max}} &\geq R_{max n} \geq R_{max \partial_{min}} ; & & \\ \rho_{\partial_{max}} &\geq \rho_n , & & \end{aligned} \quad (7)$$

де індексами ∂_{max} та ∂_{min} – позначено допустимі верхні та нижні межі зміни параметрів точності деталі.

Аналіз отриманих залежностей для обчислення фазових координат, критерію ефективності та технічних

меж вказує на їх повну відповідність прийнятій узагальненій моделі технологічного процесу.

Дана модель може бути спрощеною для випадку обробки деталей з одним із лімітуючих параметрів точності.

В табл. 1 наведено дані трудоемкості обробки канавки карданного підшипника із сталі 15Г1 на бортикошліфувальному автоматі ME280CO кругами 24A16-NC16K5+S. Трудоемкість обробки розраховано згідно рівнянь (4) і (5) в залежності від початкового та післяопераційного припуску базової поверхні. Коефіцієнти стружкоутворення та використання висоти круга прийнято рівним $K_b=0,7$; $K_c=1$. Число абразивних зерен на робочій поверхні інструменту розраховано за рівнянням

$$n_z = \frac{1}{(1,75 \cdot l_o)^2}, \text{ де } l_o - \text{розмір абразивного зерна (на основі}$$

експериментальних даних $l_o = 0,102 \cdot R_z^{0,75}$). Припуск на шліфування визначено за рівницею вихідної та післяопераційної точності поверхні Rz_{i-1} та Rz_i ($\Pi_i=C_R[Rz_{i-1}-Rz_i]$), де C_R – коефіцієнт, який показує у скільки разів шар, на якому розподілена шорсткість, є більшим за висоту нерівностей профіля ($C_R \approx 2$).

Таблиця 1

Трудоемкість обробки карданних підшипників

Вихідна шорсткість поверхні R_a , мкм	Час обробки деталі t_{um} (хв) під час забезпечення шорсткості R_a , мкм		
	0,63	1,25	2,5
4	0,54	0,32	0,24
2,5	0,37	0,22	–
1,25	0,18	–	–

На основі рекурентного співвідношення (1) та загального принципу динамічного програмування

рекомендованою є загальна послідовність обробки маршруту технологічного процесу обробки деталей абразивними інструментами.

На першому етапі необхідно провести аналіз можливих варіантів заключної операції технологічного процесу. Для цього встановлюють множину можливих поєднань показників точності після виконання $(n-1)$ -тої операції. Наприклад, $Ra_{n-1}=(1,25; 2,5; 4)$ (див. табл. 2). Для кожного варіанту можливих поєднань показників якості визначається оптимальна умова виконання заключної операції: вибирається метод обробки, вхідні змінні та керуючий вплив. Наприклад, $V_K=35$ м/с, $V_U=1$ м/с. За результатами першого етапу запам'ятовуються значення критерія I та умови виконання заключної операції для кожного варіанту.

Таблиця 2

Множина можливих поєднань показників точності

Кількість проаналізованих поверхонь	Можливі варіанти перетворення якості $Ra_{(n-1)} \rightarrow \dots \rightarrow Ra_n$	Штучний час заключної частини процесу $t_{шт},$ хв	Висновок
1	1,25 → 0,63	0,18	
	2,5 → 0,63	0,37	
	4 → 0,63	0,54	
2	2,5 → 1,25 → 0,63	0,4 > 0,37	
	4 → 1,25 → 0,63	0,5 < 0,54	оптимальний
	4 → 2,5 → 0,63	0,61 > 0,54	
3	4 → 2,5 → 1,25 → 0,63	0,64 > 0,54	

На другому етапі необхідно перейти до аналізу двох останніх операцій технологічного процесу, де встановлюють усі можливі поєднання показників точності після виконання $(n-2)$ -тої операції. Для кожного із поєднань задаються усі можливі набори вихідних змінних після $(n-1)$ -тої операції та на основі співставлення критерію ефективності вибирається найкращий варіант.

Отриманий варіант порівнюється за значенням критерію ефективності з варіантом перетворення точності в одну операцію, із останніх вибираються найкращі. Наприклад, $Ra_{n-2}=4$ мкм – Ra може приймати значення 2,5; 1,25; 0,63. Найменший час відповідає варіанту $Ra_{n-1}=1,25$ ($t_{um}=0,5$ хв).

На третьому етапі переходять до аналізу трьох-чотирьох операцій технологічного процесу. Для цього встановлюють усі можливі варіанти показників точності на $(n-j)$ -тій операції ($j=3, 4, \dots$), для кожного варіанту задаються усі можливі набори вихідних змінних після $(n-j+1)$ -тої операції і розраховується значення критерію ефективності, після чого вибирається оптимальний варіант заключної частини процесу. Розрахунки припиняються після отримання результату, який засвідчує, що подальше збільшення числа операцій призводить до збільшення значення критерію ефективності.

Для експериментальної перевірки запропонованої методики виконано шліфування канавки карданного підшипника за різними схемами (див. табл. 2).

Висновки

Як для шліфування в одну, так і в дві операції фактичне значення штучного часу обробки канавки карданного підшипника є більшим за розрахункове, що пояснює необхідність виконання в кінці кожної операції додаткових проходів вихожування з метою збільшення однорідності шліфувальної поверхні. Під час, двох,

чистових операцій штучний час обробки кільця карданного підшипника знижується у два рази, що відповідає проведенню розрахунком.

Таким чином, під час розробки технологічного маршруту доцільним є розгляд технологічного процесу як складної динамічної системи. Такий підхід дає змогу застосовувати для вирішення технологічних задач апарат теорії оптимального управління дискретними системами.

Література:

1. Бедлиан Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1977. – 326 с.
2. Болтнянский В.Г. Оптимальное управление дискретными процессами. – М.: Наука, 1973. – 244 с.
3. Глаговский Б.А., Кремень З.И., Акимов В.Л., Шелачева Е.Г., Линденен Л.И. Математическое описание параметров процесса шлифования // Труды ВНИИМАШ. Вып. 16. М.: Машиностроение, 1975. С. 32-39.
4. Доводка прецизионных деталей машин / Под ред. Г.М. Ипполитова. – М.: Машиностроение, 1978. – 245 с.
5. Капустин Н.М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
6. Новоселов Ю.К. Оптимизация процессов шлифования деталей // Технология и организация производства. Вып. 8. – К.: Вища школа, 1975. – С. 78-85.
7. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.