

**ПРО ОПТИМІЗАЦІЮ РЕЖИМІВ КРУГЛОГО ВРІЗНОГО ШЛІФУВАННЯ КАНАВОК
КАРДАННИХ ПІДШИПНИКІВ**

З метою оптимізації процесів обробки абразивними інструментами у роботі запропоновано модель динамічного програмування для призначення маршруту технологічного процесу та наведено шляхи для оптимізації режимів круглого врізного шліфування канавок карданних роликотішипників на автоматі моделі ME280CO за розрахунком оптимального циклу шліфування.

Ключові слова: оптимізація, режим, шліфування, цикл, алгоритм, технологічний процес, динамічне програмування, математична модель.

С целью оптимизации процессов обработки абразивными инструментами в работе предложена модель динамического программирования для маршрута технологического процесса и приведены пути для оптимизации режимов круглого врезного шлифования канавок карданных роликотішипников на автомате модели ME280CO по расчету оптимального цикла шлифования.

Ключевые слова: оптимизация, режим, шлифовка, цикл, алгоритм, технологический процесс, динамическое программирование, математическая модель.

In order to optimize the processing of abrasive tools in the proposed dynamic programming model for routing purpose of the process and are avenues for optimization round mortise grinding grooves cardan roller on the machine model ME280CO the calculation of optimal grinding cycle.

Keywords: optimization, treatment, grinding, cycle, algorithm, process, dynamic programming, mathematical model.

Визначення оптимальних режимів і високовиробничих циклів є одним із найскладніших та трудомістких етапів проектування технологічних процесів обробки деталей абразивними інструментами. Із розглянутих методів для оптимізації режимів шліфування найбільш перспективним є використання методу динамічного програмування [1]. Його застосування обмежується тільки об'ємом обчислювальних робіт, який в значній мірі визначається числом можливих поєднань, які регламентуються параметрами якості. Якщо якість деталі задається двома параметрами, то можливий фазовий стан буде визначатись множиною поєднань значень координат внутрішніх та граничних областей прямокутника (рис. 1).

| | $\Pi_{заг}$ | Π_1 | Π_2 | ... | Π_j | ... | Π_{i-1} | Π_i |
|--------------|-------------|---------|---------------------------------|-----|---------|-----|-------------|---------|
| $\rho_{заг}$ | заготовка | | | | | | | |
| ρ_1 | | | | | | | | |
| ρ_2 | | | область можливих фазових станів | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| ρ_j | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| ρ_{i-1} | | | | | | | | деталь |
| ρ_i | | | | | | | | |

Рис.1. Множина фазових станів об'єкта для двох контрольованих параметрів

Під час застосування методу динамічного програмування математична модель набуде вигляду системи, яку доцільно подати у вигляді таблиці (див. табл. 1). Фазові координати визначено рівняннями довжини контакту інструменту з деталлю, просторових відхилень, параметрів шорсткості та глибини дефектного шару. В якості критерію ефективності слід прийняти час виконання операції, який визначено як сума часів окремих проходів (обертів). За основні обмеження слід взяти: максимально-допустиму трудомісткість; якість поверхневого шару; допустиму інтенсивності радіальної сили різання та зміну елементів сил різання $[\sigma_y]$.

Алгоритм обчислення високовиробничих циклів шліфування методом динамічного проектування полягає у послідовному визначенні можливого фазового стану деталі після $(N-1)$ -го оберту, оцінці отриманих фазових траєкторій за критерієм ефективності з виділенням оптимального

варіанту [2]. На першому етапі встановлюються усі можливі фазові стани об'єкту після останнього проходу.

В одну і ту ж точку фазового стану після $(N-i)$ -го оберту деталі ($i > 1$) можна потрапити як для різного поєднання елементів режиму, так і для різної кількості числа проходів (обертів) завершальної частини процесу. Тому на i -тому етапі необхідно виділити наступні, загальні, точки $M_{N-i}^k = M_{N-(i+1)}^k + \dots + M_N^k$ та вибрати траєкторію з мінімальним значенням критерію ефективності заключної частини процесу. На наступних етапах слід виконати аналіз можливих станів об'єкту після $(N-i)$ -го оберту деталі ($i=3, 4, \dots, N$). Процес обчислення закінчується після отримання результату, який засвідчує, що усі можливі фазові стани об'єкту, які визначаються за значеннями керуючих впливів, виходять за межі, які допускаються математичною моделлю, або ж після отримання результату, який показує, що усі варіанти які залишились мають $\sum_{j=0}^{i+1} \tau_j > \sum_{k=0}^i \tau_k$ одного із варіантів $\Pi = \Pi_{заг}$ та $y_{N-1}^k \geq y_{дет}^k$, де y_{N-1}^k –

значення K -го параметру якості. Шляхом співставлення отриманих варіантів, які задовольняють початковим умовам, визначається варіант, який забезпечує мінімальне значення критерію ефективності (у даному випадку його приймають за оптимальний, так як забезпечується формування заданих параметрів якості деталей за найменшого значення критерію ефективності).

Таблиця 1

| Математична модель процесу круглого шліфування | |
|--|---|
| Вид залежності | Залежності математичної моделі |
| Зміна вихідних координат об'єкту та системи | $\Delta A_{стj} = \Delta t_{фj} + \Delta r_{j-1} + \Delta R_j + \Delta r_{унj} + \Delta R_{унj} - \Delta r_{Tj} - \Delta R_{Tj} + \Delta A_{оунj} + \Delta A_{отj}; \Pi_j = \Pi_{j-1} - \Delta r_j; r_j = r_{j-1} - \Delta r_j;$ $\rho_j = \rho_{j-1} - \Delta \rho_{остj} + \Delta \rho_{тпj}; R_j = R_{j-1} - \Delta R_j; t_{пj} = \exp(-a_0 - a_1 - a_2 - \dots - a_j); H_j = \max(H_{j-1} - \Delta r_j; H_{гj});$ $T_j = \max(T_{j-1} + H_{j-1} - \Delta r_j - H_j; T_{гj});$ $l_{kj} = \int_0^B Q_{kj} dx$ |
| Критерій ефективності | $t_0 = \sum_{i=1}^j \tau_i$ |
| Технічні обмеження | $t_0 \leq t_{0max}; H_j \leq \Pi_j + H_g; T_j + H_j \leq \Pi_j + H_g + T_g; \rho_g / l_k \leq [\sigma_p]; P_y \geq 0; P_y \leq P_{удло};$ $S_y \geq S_{ymin}; S_y \leq S_{ymax}; S_x \geq S_{xmin}; S_x \leq S_{xmax};$ $V_K \geq V_{Kmin}; V_K \leq V_{Kmax}; V_U \geq V_{Umin}; V_U \leq V_{Umax}; V_K P_g \leq N_{дв} \eta$ |
| Початковий стан об'єкту | $\delta_{min} + \delta_{i-1} - \delta \geq \Pi_0 \geq z_{min}; d_{i-1min} + d_{i-1} \geq d_{io} \geq d_{i-1min}; \rho_{i-1max} \geq \rho_{io} \geq \rho_{i-1min};$ $t_{pi-1max} \geq t_{pio} \geq t_{pi-1min}; H_{i-1max} \geq H_{io} \geq H_{i-1min}; T_{i-1max} \geq T_{io} \geq T_{i-1min}$ |
| Кінцевий стан об'єкту | $d_{imin} + \delta \geq d_{in} \geq d_{imin}; \rho_{inmax} \geq \rho_{in} \geq \rho_{imin}; t_{pinmax} \geq t_{pin} \geq t_{pinmin};$ $H_{imax} \geq H_{in} \geq H_{imin}; T_{imax} \geq T_{in} \geq T_{imin}$ |

Для процесу шліфування визначення оптимального циклу виконується в прямій послідовності, починаючи з першого проходу або оберту деталі та закінчуючи останнім проходом або обортом. Загальна структура алгоритму, який обчислюється, для цього зберігається. На основі аналізу технічних обмежень слід встановити усі можливі поєднання елементів режиму різання на першому проході. За відомими фазовими координатами заготовки та можливим поєднанням елемента режиму визначають усі можливі фазові стани об'єкту після першого оберту, на основі співставлення критерію ефективності для кожного такого стану вибирають оптимальне поєднання елементів режиму. Надалі, послідовно здійснюється аналіз другого та третього проходів. На кожному етапі для наступних обчислень формується множина M^i станів, для яких не досягнуто параметри якості деталі, а значення критерію ефективності є меншим, в порівнянні, з його значенням для закінчених варіантів виконання операції. Процес обчислення закінчується коли $M^i=0$, із отриманих варіантів високовиробничих циклів визначається оптимальний за критерієм ефективності.

Основною перевагою розглянутого алгоритму визначення оптимальних циклів шліфування в порівнянні з іншими є можливість встановлення оптимальних поєднань та елементів режиму шліфування на кожному із етапів процесу.

Структура алгоритму визначення оптимальних циклів не залежить від числа керуючих впливів. Число керуючих впливів, число етапів процесу (проходів, обертів деталі, етапів циклу тощо) та число можливих фазових станів об'єкту в значній мірі визначає об'єм обчислювальних робіт. Із збільшенням числа керуючих впливів, етапів процесу та фазових станів об'єкту об'єм таких робіт збільшується в геометричній прогресії. Тому метод динамічного програмування слід найбільш цілеспрямовано використовувати для оптимізації процесу шліфування з поперечною подачею, коли число етапів процесу є невеликим, а принцип дискретності процесу найбільш виражений. Метод

динамічного програмування доцільно використовувати і тоді коли керуючі впливи змінюються не неперервно а дискретно та число можливих переключень наперед задано.

Для оптимізації процесів шліфування, яке характеризується великою кількістю контактів поверхні, яка оброблюється, з абразивним інструментом та неперервною зміною елементів режиму, задачу оптимального керування дискретним процесом слід замінити на аналогічну задачу керування неперервним процесом. У даному випадку дискретний процес перетворення параметрів якості замінюється неперервним. Графічно дійсна крива зміни параметрів якості змінюється на криву яка огинає та перетинає максимуми і мінімуми дійсної кривої.

Високовиробничі цикли шліфування обчислюються на основі принципу максимуму Понтрягіна [3].

В якості прикладу у табл. 2 наведено, розрахований методом динамічного програмування, цикл чистового шліфування зразків із сталі 15Г1 кругами 24А16-НС16К5+S. Для розрахунку припуск на шліфування прийнято рівним 0,1 мкм, попередня шорсткість поверхні $Ra=1,25$ мкм, шорсткість поверхні після шліфування за технічними умовами на деталь повинна бути не більше 0,1 мкм. Шліфування проходить з поперечною подачею $P_y=0,4$ мм/хв, допустима інтенсивність радіальної сили шліфування $[\sigma_y]=15$ Н/мм ($[\sigma_y]$ – для кругів 24А16-НС16К5+S визначено експериментально за величиною сили, під час якої спостерігалось висипання круга).

Таблиця 2

| Цикл врізного шліфування | |
|--------------------------|---|
| Прохід | Вертикальна складова сили різання P_r , Н |
| 1 | 158 |
| 2 | 300 |
| 3 | 300 |
| 4 | 97 |

У першій половині циклу внаслідок наявності вихідної шорсткості поверхні величина радіальної сили шліфування є меншою у порівнянні з другою, так як $l_k < b$. У третій половині циклу радіальна сила знижується до значення у процесі якого забезпечується задана шорсткість поверхні.

Експериментальна перевірка розрахованого циклу виконана на бортикошліфувальному автоматі ME280CO (зауважимо, що радіальна сила задавалась реєструючим приладом). Зміна радіальної сили шліфування за циклом для високої продуктивності процесу досягається заданою шорсткістю поверхні. В процесі шліфування з сталою радіальною силою $P_y=100$ Н машинний час шліфування деталі у 2,5 рази вищим у порівнянні із шліфуванням зі зміною радіальною силою за розрахунковим циклом.

Для піднесення теоретичних залежностей до степеневому виду та застосування емпіричних залежностей, поряд з методом динамічного програмування для розрахунку оптимального циклу доречно застосувати метод лінійного програмування. У даному випадку необхідно скласти математичну модель процесу шліфування у вигляді лінійних нерівностей та лінійної функції оптимізації. В якості прикладу в табл. 3 подано математичну модель для розрахунку оптимальної швидкості круга (V_k) та струму навантаження (I) електродвигуна приводу для шліфування деталей типу “карданний підшипник” кругами 24А16-НС16К5+S на бортикошліфувальному автоматі ME280CO з отриманням шорсткості $Ra=1,25$ мкм.

Для графічного подання в логарифмічних координатах кожна нерівність подано у вигляді прямої (див. рис. 2), яка обмежує можливі зміни елементів режиму шліфування. Перетинаючись 1, 2, 3, 4, 5 та 6 утворюють багатокутник ABCKOA можливих рішень системи нерівностей.

Таблиця 3

Математична модель розрахунку оптимальної швидкості шліфувального круга та струму навантаження електродвигуна приводу при шліфуванні карданних підшипників

| Пряма (див. рис. 1) | Обмеження та функція оптимізації | Нерівність |
|---------------------|---|--|
| 1 | Продуктивність верстата | $0,048V_k^{2,06}I^{1,06} \geq 220$ |
| 2; 2' | Шорсткість процесу ($i=N \rightarrow Ra=1,25$ мкм) | $2,46 \cdot 10^{-6} V_k^{2,43} I^{0,04} \leq Ra$ |
| 3 | Найбільший струм двигуна приводу шліфувального круга | $I \leq 130$ А |
| 4 | Найбільша швидкість шліфувального круга | $V_k \leq 27,6$ м/с |
| 5 | Найменша швидкість шліфувального круга | $V_k \geq 9,9$ м/с |
| 6; 6' | Струм двигуна, який допускається і залежить від закріплення в шліфувальному кругу | $I \leq I_{дв}$ |
| 7 | Найменший струм двигуна | $I \geq 5$ А |

Для визначення точки багатокутника, в якій хвилинне зняття буде максимальним, необхідно побудувати пряму f_0 інтенсивності зняття матеріалу, яка відповідає функції оптимізації за деякого значення Q_M . Для збільшення Q_M пряма f_0 буде зміщуватись паралельно собі самій, а деяке значення Q_M перетне багатокутник в точці 0. Дана точка відповідає найбільшому значенню Q_M оптимального режиму шліфування ($V_{K\text{виз}}=16,8$ м/с; $I_{\text{виз}}=27,6$ А).

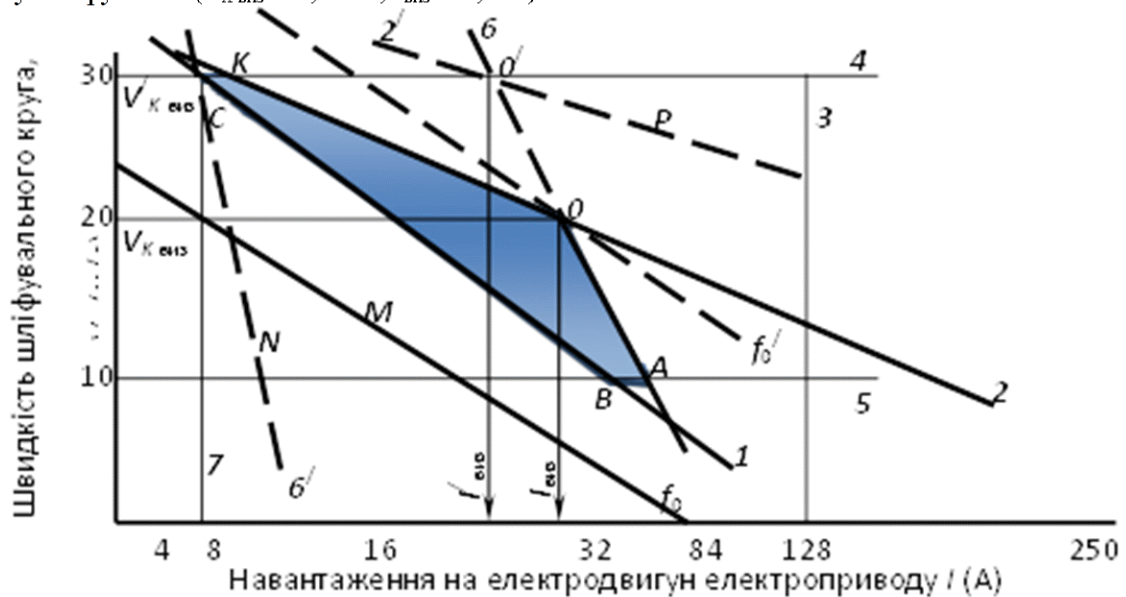


Рис.2. Розрахунок оптимального циклу шліфування карданних підшипників методом лінійного програмування

Для визначення циклу необхідно розглянути зміну технічних обмежень за час обробки деталі. Весь цикл чистового та тонкого шліфування можна розбити на три ділянки. На першій ділянці видаляється “шорсткий” шар металу (на початку круг контактує тільки з вершинами вихідної шорсткості). Слід зазначити, що в результаті зняття вершин довжина лінії круга з деталлю збільшується.

Пропорційно збільшуватись буде і допустима радіальна сила та допустимий струм навантаження електродвигуна приводу круга $I_{\text{дв}}$. Із зміною навантаження лінія 6 (у відповідності з нерівністю 6 див. табл. 3) буде зміщуватись паралельно собі від початкового положення $6'$ до положення 6. Високовиробничі режими визначають із графічної побудови без врахування обмеження за шорсткістю поверхні лінією CO' ($V_K \leq 27,6$ м/с; $I = \varphi(\tau)$).

На другій ділянці циклу довжина лінії контакту не змінюється. Високовиробничий режим шліфування визначається із багатокутника $ABCO'$ ($V_{K\text{виз}}=27,6$ м/с; $I_{\text{виз}}=20$ А).

На третій ділянці циклу режим шліфування змінено таким чином щоб шорсткість поверхні була меншою від величини, яка відповідає величині другої ділянки циклу, до величини яка передбачена технічними умовами.

Для зміни значення Ra в математичній моделі процесу пряма зміщується паралельно собі від початкового положення $2'$ до положення 2. Високовиробничі режими визначаються точками які лежать на прямій $O'O$. Експерименти, які виконано у виробничих умовах підтвердили оптимальність високовиробничого циклу. Зміна режиму згідно розрахованих циклів та час на обробку карданних підшипників в процесі врізного шліфування зменшується в 1,6-1,8 рази.

Інформаційні джерела

1. Кайдик О.Л., Терлецький Т.В. Розробка алгоритму керування точністю шліфування кілець карданних підшипників // Перспективні технології та прилади. Зб. наук. праць Вип. 4. – Луцьк: Вид-во Луцького НТУ, 2014. – С. 44-48.
2. Кайдик О.Л. Технологічне забезпечення точності виготовлення кілець карданних підшипників в адаптивних технологічних системах шліфування: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Луцьк., 2004. – 217 с.
3. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.