

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПЕРАЦІЇ ЗУБОШЛІФУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ТАРІЛЧАСТИМИ КРУГАМИ ПО МЕТОДУ ОБКАТКИ

Аїстов О.О.

Науковий керівник – проф. каф. «Технологія машинобудування»,

докт. техн. наук Ларшин В.П.

Зубошліфування є одним з основних способів фінішної обробки загартованих зубчастих коліс і проводиться або за методом обкату [1,2], або за методом копіювання [3]. Відомо, що особливістю верстатів, що працюють за методом обкату двома тарілчастими колами (верстати MAAG SD-32-X, HSS30BC, а також верстати MC3 5851, 5851M та ін.), є висока точність обробки. Наприклад, при обробці шестерень - сателітів високошвидкісних авіаційних редукторів отримують ступінь точності 6-5-5-X. Висока точність зубошліфування тут обумовлена тим, що конусно-увігнута ріжуча поверхня шліфувальних тарілчастих кругів займає при обробці незмінне осьове положення. Для цієї мети використовується спеціальний підналагоджувальний механізм, який автоматично компенсує знос шліфувальних кругів. Однак метод обкату, на відміну від інших методів обробки зубів, відрізняється низькою продуктивністю і, крім того, високою теплонапруженістю, що посилюється відсутністю охолодження (шліфування проводиться без мастильно-охолоджуючої рідини). Поява прижогов на робочій поверхні зубів різко знижує експлуатаційні властивості зубчастих коліс, а в ряді випадків (наприклад, в авіаційній промисловості) шліфувальні дефекти (прижоги і мікротріщини) взагалі неприпустимі. Тому підвищення ефективності бездефектного зубошліфування на верстатах типу MAAG є вельми актуальним завданням в технології машинобудування.

Запропонована стратегія управління зубошліфуванням складається з двох етапів. На першому етапі здійснюється оптимізація розподілу припуску на проходи в припущенні, що припуск рівномірно розподілений по всіх зубах зубчастого колеса. Отримана програма оптимального розподілу припуску на проходи, яка задається в систему ЧПУ верстата. На другому етапі система зворотного зв'язку по потужності зубошліфування враховує нерівномірний розподіл припуску по зубах зубчастого колеса і автоматично змінює поздовжню подачу верстата при зміні глибини різання в порівнянні з розрахунковою.

Потужність зубошліфування може бути отримана експериментально у вигляді наступної емпіричної залежності [2]:

$$P = ct^x V^y n_0^z k_M k_{II} k_p, \quad (1)$$

де c, x, y, z - коефіцієнти, що залежать від кута установки тарілчастих кругів ($0, 15$ або 20°);

t, V, n_0 - глибина різання, поздовжня подача і частота хитань, відповідно;

k_M, k_{II}, k_p - коефіцієнти, що враховують вплив характеристик оброблюваного матеріалу, абразивного інструменту, радіуса кривизни профілю зуба, відповідно.

Наприклад, при вугіллі установки кругів 0° чисельні значення коефіцієнтів наступні:
 $c = 0,022$; $x = 0,75$; $y = 0,95$; $z = 0,25$; $k_M = 1$ (сталь 12Х2Н4А); $k_{II}=1$ (твердість кругів МЗ, зернистість 25); $k_p=1$ (радіус кривизни профілю зуба 34,7 мм) [1].

Використовуючи вираз (1), можна визначити час, витрачений на k -й ($1 \leq k \leq n$) прохід,

$$\tau_k = \frac{L}{V} = \frac{L(ct_k^x n_0^z k_M k_{II} k_p)^{1/y}}{P_k^{1/y}}, \quad (2)$$

де L - довжина подовжнього ходу столу верстата, мм;

P_k - потужність зубошліфування на k -м проході, Вт;

t_k - глибина різання на k -м проході, мм.

Позначивши; $\alpha = \frac{x}{y}$; $\varepsilon = \frac{1}{y}$; $M = L(cn_0^z k_M k_{II} k_p)^{1/y}$, тоді вираз (2) набуває вигляду

$$\tau_k = M \frac{t_k^\alpha}{P_k^\varepsilon}. \quad (3)$$

Наприклад, для кута установки кругів 0° при $n_0=150 \text{ хв}^{-1}$ отримані наступні значення параметрів: $\alpha = 0,79$; $\varepsilon = 1,05$ і $M=3,04$.

Сумарний машинний час зубошліфування, що витрачається на n проходів,

$$\tau_M = M \sum_{k=1}^n \frac{t_k^\alpha}{P_k^\varepsilon}. \quad (4)$$

Одним з основних факторів, що обмежують продуктивність шліфування, є теплонапруженість процесу.

Для будь-якого k -го проходу глибина утвореного при зубошліфуванні дефектного шару h_{dk} може бути представлена як [3]

$$h_{dk} = a(P_k - P_0), \quad (5)$$

де a - коефіцієнт;

P_0 - бездефектний рівень потужності зубошліфування, Вт.

Оскільки для будь-якого k -го ($1 \leq k \leq n$) проходу глибина утвореного при зубошліфуванні дефектного шару не повинна перевищувати припуск, що залишається на обробку, то

$$h_{dk} = \sum_{i=k+1}^n t_i = Z - \sum_{i=1}^k t_i. \quad (6)$$

З огляду на вираження (5) і (6), отримаємо

$$P_k = \frac{Z - \sum_{i=1}^k t_i}{a} + P_0. \quad (7)$$

Після установки цього виразу в формулу (4), маємо

$$\tau_M = M \left[\frac{1}{P_0^\varepsilon} \left(Z - \sum_{i=1}^{n-1} t_i \right)^\alpha + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{t_k^\alpha}{\left[\frac{1}{a} \left(Z - \sum_{i=1}^k t_i \right) + P_0 \right]^\varepsilon} \right]. \quad (8)$$

Наприклад, машинний час зубошліфування, необхідний для видалення припуску Z за два і за три проходи, можна визначити за формулами

$$\tau_2 = M \left\{ \frac{(Z - t_1)^\alpha}{P_0^\varepsilon} + \frac{t_1^\alpha}{\left[\frac{Z - t_1}{a} + P_0 \right]^\varepsilon} \right\}, \quad (9)$$

$$\tau_3 = M \left\{ \frac{(Z - t_1 - t_2)^\alpha}{P_0^\varepsilon} + \frac{t_1^\alpha}{\left[\frac{Z - t_1}{a} + P_0 \right]^\varepsilon} + \frac{t_2^\alpha}{\left[\frac{Z - t_1 - t_2}{a} + P_0 \right]^\varepsilon} \right\}. \quad (10)$$

З цих прикладів, а так само з узагальненої рекурентної формули (8) випливає, що кількість змінних у формулі машинного часу на одиницю менше числа проходів, за які видаляється припуск (при двох проходах – одна змінна t_1 ; при трьох – дві t_1 і t_2 і т.д.).

З аналізу формули (9) видно, що залежність машинного часу τ_2 від глибини шліфування t_1 має екстремальний характер, тому що зі збільшенням t_1 перша компонента формули (9) зменшується, а друга – різко збільшується (чисельник другого компоненти зростає, а знаменник падає). Отже, існує така глибина різання t_1 , при якій для даного припуску Z машинний час на обробку τ_2 буде мінімальне. Причому, як випливає з виразу (2), мінімального машинного часу відповідає максимальна поздовжня подача стола.

За формулою (9) можуть бути побудовані графіки для різних значень припуску Z (рисунок). Видно, що при $Z = 400$ мкм оптимальна глибина шліфування на першому проході становить $t_{1\text{опт}} = 300$ мкм (абсциса, що характеризує стан оптимуму). При $Z = 350$ мкм і $Z = 325$ мкм відповідні оптимальні глибини шліфування $t_{1\text{опт}}$ складають 260 мкм і 240 мкм. Машинний час зубошліфування мінімальний $\tau_{2\text{мін}}$ для трьох зазначених випадків відповідно становить 38,0; 35,5 і 34,4 хв, тобто

Z , мкм	400	350	325
$t_{1\text{опт}}$, мкм	300	260	240
$\tau_{2\text{мін}}$, мин	38,0	35,5	34,4

При $n > 2$ наявність екстремуму цільової функції (8) також, як при $n = 2$ за формулою (9), дозволяє конкретизувати оптимальні глибини зубошліфування $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. При цьому один і той же припуск Z можна видалити за два, три, чотири і т.д. проходів.

Наведена методика оптимізації режимів зубошліфування дозволяє розрахувати програму розподілу припуску на проходи зубошліфування і відповідну програму максимально можливих поздовжніх подач стола зубошліфувального верстату.

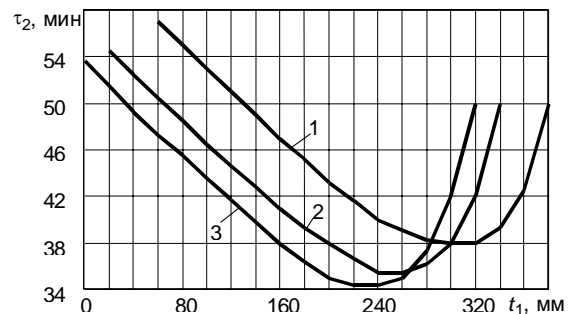


Рисунок. Залежність машинного часу зубошліфування τ_2 від глибини різання на першому проході t_1 при $n = 2$: $Z = 400$ (1), 350 (2), 325 (3) мкм

Список літератури

1. Ларшин В.П. Оптимизация процесса зубошлифования на станках, работающих по методу обката / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Тр. ученых Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2003. – Вып.2(20). – С.57-61.
2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 8. “Оптимизация технологических процессов в машиностроении”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 509 с.
3. Лищенко Н.В. Оптимизация профильного зубошлифования на станке с ЧПУ и системой измерения припуска / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, В.В. Нежебовский // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – Вип.1 (26). – С. 50-61.