

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС НА ОПЕРАЦІЇ ЗУБОШЛІФУВАННЯ

Гершиков І.В. (ЗАТ “Азовський машинобудівний завод”, м. Бердянськ)

Новіков Ф.В., докт. техн. наук

(Харьковский национальный экономический университет им. Семена Кузнецца)

Нежебовський В.В., канд. техн. наук

(ПАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря”)

В останні роки у зв'язку з освоєнням виробництва високопористих абразивних кругів усе ширше застосовується високопродуктивний процес зубошліфування за методом профільного копіювання [1]. Однак, як відомо, даний метод характеризується відносно низкою точністю обробки у зв'язку з виникненням значних сил різання, підвищенням зношування круга й порушенням профілю його робочої поверхні. Істотним фактором утворення похибок обробки слід також розглядати нерівномірність припуску, що знімається, через виникнення термопружних деформацій зубів колеса при його термічній або хіміко-термічній обробці й неправильній установці круга в оброблюваній западині зубчастого колеса. Дані закономірності в меншій мірі проявляються при зубошліфуванні за методом обкатування, коли обробка виконується за схемою багатопрохідного шліфування з відносно невеликою глибиною шліфування [2]. Тому ціллю роботи є теоретичний аналіз закономірностей формування погрішностей обробки на операції зубошліфування за методом профільного копіювання з використанням високопористих абразивних кругів.

При зубошліфуванні за методом профільного копіювання на обох сторонах робочих поверхонь конусного круга (з кутом α при вершині) будуть діяти дві різні по величині радіальні складові сили різання P_{y1} й P_{y2} (рис. 1). У загальному вигляді кожен із цих сил можна розкласти на дві складові – горизонтальну й вертикальну. Тоді горизонтальні складові сили $P_{y.e1}$ й $P_{y.e2}$ будуть згинати конусний круг, що приведе до деформації елементів технологічної системи в горизонтальному напрямку за умови нерівності сил $P_{y.e1}$ і $P_{y.e2}$.

Очевидно, чим більше буде різниця сил $P_{y.e1}$ і $P_{y.e2}$, тим значніше будуть пружні переміщення, що виникають у технологічній системі в горизонтальному

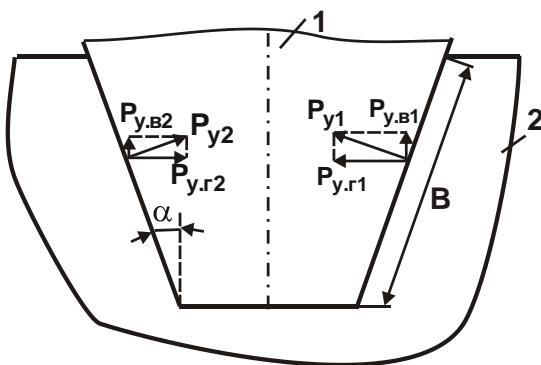


Рис. 1. Розрахункова схема параметрів зубошліфування за методом профільного копіювання: 1 – круг; 2 – оброблюваний матеріал

напрямку. Властиво, різниця сил $P_{y.z1}$ і $P_{y.z2}$ й буде визначати основну похибку обробки зубів колеса у зв'язку з нерівномірністю припуску, що знімається.

Вертикальні складові сили $P_{y.e1}$ й $P_{y.e2}$ будуть виштовхувати шліфувальний круг із западини зубчастого колеса й формувати похибку обробки у вертикальному напрямку. Однак, дана похибка обробки буде проявлятися в меншій мірі в порівнянні з похибкою обробки в горизонтальному напрямку, тому що горизонтальні складові сили $P_{y.z1}$ й $P_{y.z2}$ будуть значно більше вертикальних складових сил $P_{y.e1}$ і $P_{y.e2}$ у зв'язку з відносно невеликим кутом α . Тим більше, що похибки обробки у вертикальному напрямку, викликані дією сил $P_{y.e1}$ і $P_{y.e2}$, будуть вісесиметричними відносно западини зубчастого колеса, тоді як похибки обробки в горизонтальному напрямку, викликані дією сил $P_{y.z1}$ і $P_{y.z2}$, будуть несиметричними, усунути які, очевидно, значно складніше.

Для спрощення розрахунку величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, бічні робочі поверхні круга будемо розглядати не криволінійними, а прямолінійними. Оскільки при шліфуванні в роботі беруть участь одночасно дві сторони круга, то це не внесе принципових змін у виконувани розрахунки. Виходячи із цього, величину пружного переміщення y , що виникає в технологічній системі в горизонтальному напрямку, визначимо:

$$y_1 = \frac{(P_{y.z1} - P_{y.z2})}{c} = \frac{(P_{y1} - P_{y2}) \cdot \cos \alpha}{c} = \frac{(P_{z1} - P_{z2}) \cdot \cos \alpha}{c \cdot K_{uu}}, \quad (1)$$

де c – жорсткість технологічної системи в горизонтальному напрямку, Н/м; P_{z1} , P_{z2} – відповідно тангенціальні складові сили різання, що діють на обох сторонах круга, Н; $K_{uu} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2}$;

$$P_{z1} - P_{z2} = \sigma \cdot \frac{(Q_1 - Q_2)}{V_{кр}} = \sigma \cdot \frac{(V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_1 - V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_2)}{V_{кр}}; \quad (2)$$

σ – умовна напруга різання, Н/м²; $Q_1 = V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_1$, $Q_2 = V_{дет} \cdot B \cdot \Pi_2$ – значення продуктивності обробки, які досягаються умовно при зніманні припусків із двох суміжних зубів колеса шліфувальним кругом, м³/с; $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с; $V_{дет}$ – швидкість переміщення деталі уздовж оброблюваного зуба (швидкість деталі), м/с; B – довжина оброблюваної частини зуба, м; Π_1 , Π_2 – відповідно величини припусків, що знімаються з бічних поверхонь двох суміжних зубів колеса (утворюючих западину на зубчастому колесі), м.

Внаслідок виникаючих у технологічній системі пружних переміщень фактичні величини припусків, що знімаються, відрізняються від номінальних припусків Π_1 та Π_2 , і відповідно рівні $\Pi_1 - y_1$ та $\Pi_2 + y_1$. Тоді залежність (1) після перетворень виразиться:

$$y_1 = \frac{0,5 \cdot \Delta\Pi_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}\right)}, \quad (3)$$

де $\Delta\Pi_1 = \Pi_1 - \Pi_2$.

Аналогічно визначається величина пружного переміщення y_n після n -го проходу круга:

$$y_n = 0,5 \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}\right)^n \cdot \Delta\Pi_1. \quad (4)$$

Уточнення на n -му проході круга:

$$\varepsilon_n = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{0,5 \cdot C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}. \quad (5)$$

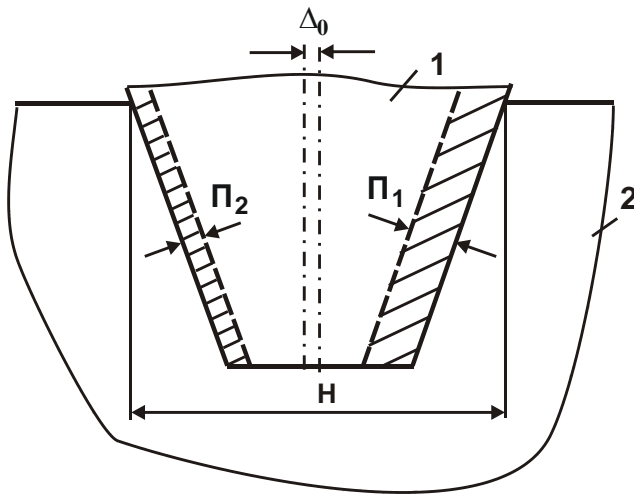


Рис. 2. Розрахункова схема величини відхилення осі конусного круга відносно осі западини Δ_0

Глибина шліфування не входить у розрахункові залежності. Тому вона може встановлюватися за різними законами з урахуванням того, що на кожному наступному проході круга вона повинна перевищувати величину пружного переміщення, що утворюється на попередньому проході круга.

Слід розглянути випадок зубошліфування, коли оброблювана западина зубчастого колеса має симетричний вигляд (рис. 2). Тоді $\Delta\Pi_1 = 2 \cdot \Delta_0$, де t_0 – глибина шліфування, м; Δ_0 –

величина зсуву осі конусного круга відносно осі западини, м. Даний випадок обробки може мати місце після операції зубонарізування, коли утворюється досить точний профіль зубчастого колеса. Тоді

$$y_n = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}\right)^n \cdot \Delta_0. \quad (6)$$

Установлено, що уточнення на кожному проході круга однаково й визначається:

$$\varepsilon = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}. \quad (7)$$

Відповідно сумарне уточнення $\varepsilon_{сум}$ дорівнює:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta_0}{y_n} = \left(\frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{2 \cdot \sigma \cdot V_{дем} \cdot B \cdot \cos \alpha}\right)^n. \quad (8)$$

У цьому випадку величини Δ_0 й y_n задані, тому відомим є й сумарне уточнення $\varepsilon_{\text{сум}} > 1$. З урахуванням отриманих залежностей (7) і (8) величина пружного переміщення y_n , що виникає в технологічній системі й описується залежністю (6), аналітично виразиться:

$$y_n = \frac{\Delta_0}{\varepsilon^n}. \quad (9)$$

Зі збільшенням кількості проходів круга n величина пружного переміщення y_n безупинно зменшується (табл. 1, рис. 3).

Таблиця 1

Розрахункові значення відношення y_n/Δ_0

n	1	2	3	4	5	6
y_n/Δ_0	0,367	0,135	0,05	0,018	0,0067	0,0025

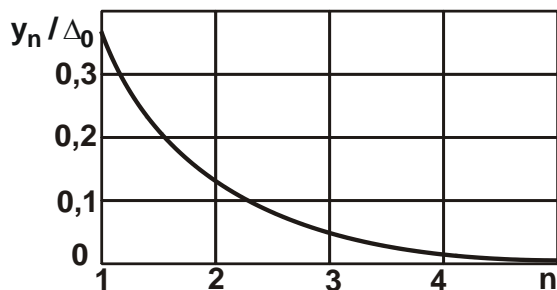


Рис. 3. Залежність відношення y_n/Δ_0 від кількості проходів круга n

Підставляючи залежність (7) в (8), маємо:

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon^n. \quad (10)$$

Із залежності (10) випливає, що чим більше уточнення на проході круга ε , тим за меншу кількість проходів круга n можна досягти заданого сумарного уточнення $\varepsilon_{\text{сум}}$. Основний час обробки τ в загальному вигляді описується залежністю:

$$\tau = \frac{2 \cdot n \cdot n \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}} \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}, \quad (11)$$

де L – довжина оброблюваного зуба колеса, м.

Очевидно, зі збільшенням кількості проходів круга n основний час обробки τ змінюється неоднозначно, тому що зі збільшенням n множник $n \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}}$ зменшується. Отже, існує екстремум основного часу обробки τ від кількості проходів круга n . Для його визначення слід скористатися необхідною умовою екстремуму $\tau'_n = 0$:

$$\tau'_n = \frac{2 \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \cdot n \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}} \cdot \left(1 - \frac{\ln \varepsilon_{\text{сум}}}{n} \right) = 0. \quad (12)$$

Рішення рівняння (12):

$$n = \ln \varepsilon_{\text{сум}} \quad (13)$$

або

$$\varepsilon_{\text{сум}} = e^n. \quad (14)$$

У підсумку отримано залежність, яка аналогічна залежності (10). Порівнюючи залежності (10) і (14), маємо:

$$\varepsilon = e. \quad (15)$$

Отже, у точці екстремуму основного часу обробки τ уточнення на проході круга ε дорівнює числу $e \approx 2,72$.

Розрахунками встановлено, що в точці екстремуму функції τ її друга похідна завжди позитивна. Тому має місце мінімум функції τ .

Отримане теоретичне рішення (14) погодиться з відомим і широко застосовуваним на практиці рішенням, описуваним емпіричною залежністю [3]:

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{0j}}{a}, \quad (16)$$

де k_j – кількість операцій або переходів; a – коефіцієнт ($a = 0,45 - 0,5$); $j = d$; R_z , Δ – індекс, який позначає параметр геометричного розміру, параметр шорсткості й параметр взаємного розташування поверхонь.

Стосовно до розглянутого випадку залежність (16) зміниться:

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{d0}}{a}. \quad (17)$$

Величина ε_{d0} по суті визначає сумарне уточнення $\varepsilon_{\text{сум}}$.

Залежність (17) можна представити у вигляді:

$$\varepsilon_{d0} = 10^{a \cdot k_j} \approx 3,1^{k_j}. \quad (18)$$

Порівнюючи залежності (14) і (18), видно, що вони описуються степеневою функцією, але з різними основами. Однак, основи $e \approx 2,72$ й $3,1$ відрізняються незначно, що дозволяє розглядати залежності (14) і (18)

ідентичними. Отже, отримане теоретичне рішення відповідає відомому емпіричному рішення, що свідчить про його вірогідність.

На рис. 4 і в табл. 2 наведені розраховані за залежністю (13) значення сумарного уточнення $\varepsilon_{\text{сум}}$ (у точці екстремуму основного часу обробки τ) для різної кількості проходів круга n . Як видно, за 3–4 проходи круга можна забезпечити великі значення сумарного уточнення $\varepsilon_{\text{сум}}$, що погодиться із

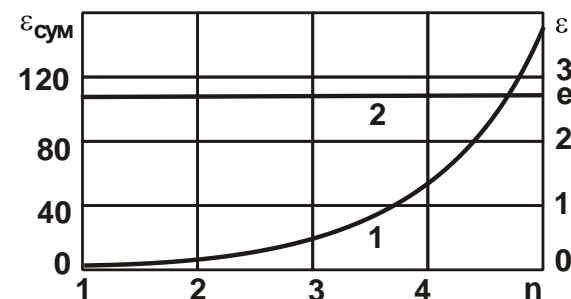


Рис. 4. Залежності сумарного уточнення $\varepsilon_{\text{сум}}$ (1) і уточнення на проході круга ε (2) від кількості проходів круга n

практикою.

Таблица 2

Розрахункові значення сумарного уточнення $\varepsilon_{\text{сум}}$

n	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{\text{сум}}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405

На рис. 4 також показаний характер зміни уточнення на проході круга ε (у точці екстремуму основного часу обробки τ) від кількості проходів круга n .

У цьому випадку уточнення на проході круга ε залишається постійним зі збільшенням кількості проходів круга n , рівним $\varepsilon = e \approx 2,72$.

Екстремальна швидкість деталі V_{dem} виражається:

$$V_{dem} = \frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{2 \cdot e \cdot \sigma \cdot B \cdot \cos \alpha} \quad (19)$$

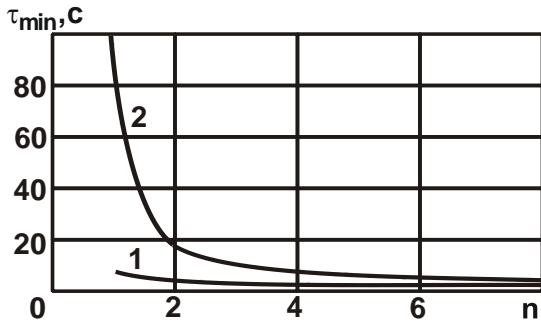


Рис. 5. Залежність основного часу обробки τ від кількості проходів круга n для різних значень сумарного уточнення:
1 – $\varepsilon_{сум} = 10$; 2 – $\varepsilon_{сум} = 100$

На рис. 5 і в табл. 3 наведені розраховані за залежністю (11) значення основного часу обробки τ для різної кількості проходів круга n за умови $\frac{2 \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = 1$ с. Як видно, у

широких межах зміни величини n основний час обробки τ , починаючи від $n=2$ (для $\varepsilon_{сум} = 100$), змінюється несуттєво. Тому, приймаючи кількість проходів круга n близькою до оптимального значення, завжди можна досягти приблизно однакового значення

основного часу обробки τ . Отже, кількість проходів круга n не настільки істотно впливає на основний час обробки τ за умови забезпечення необхідної точності обробки.

Таблиця 3

Розрахункові значення основного часу обробки τ для $\varepsilon_{сум} = 100$

n	1	2	3	4	5	6
$\tau, \text{с}$	100,0	20,0	13,95	12,6	12,6	12,9

Для визначення мінімального значення основного часу обробки τ_{min} слід підставити в залежності (13) і (14) у залежність (11):

$$\tau_{min} = \frac{2 \cdot e \cdot \sigma \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \varepsilon_{сум} \quad (20)$$

Необхідно відзначити, що в наведені вище залежності не входить такий параметр як висота круга H . Забезпечення заданої погрішності обробки y_n досягається в результаті встановлення оптимальної кількості проходів круга n . Отже, як відзначалося вище, при зубошліфуванні за методом профільного копіювання можна за різними законами задавати глибини шліфування, по суті, на кожному із проходів круга. Це не внесе змін у закономірності формування похибок обробки. В остаточному підсумку буде отримана задана величина y_n .

Розрахунок швидкості деталі V_{dem} за залежністю (19) для вихідних даних: $C = 3 \cdot 10^4$ Н/мм; $K_{ш} = 0,4$; $V_{кр} = 40$ м/с; $\sigma = 10^5$ Н/мм²; $B = 20$ мм; $\alpha = 30^\circ$ показав, що $V_{dem} = 3,06$ м/хв. Для $\Delta I_1 = 0,4$ мм і $y_n = 0,005 \dots 0,01$ мм сумарне уточнення дорівнює $\varepsilon_{сум} = 20 \dots 50$. Виходячи з табл. 4, це припускає

здійснення 4-х проходів круга для забезпечення заданої точності обробки. З метою зниження основного часу обробки доцільно на першому проході круга здійснити попереднє шліфування за схемою однопрохідного глибинного шліфування зі зніманням основної частини припуску – 0,37 мм, а на трьох наступних проходах – остаточне шліфування за схемою багатопрохідного шліфування зі зніманням припуску на проході, рівного 0,01 мм. Такий маршрут обробки при зубошліфуванні дозволить забезпечити максимально можливу продуктивність обробки з урахуванням заданої точності оброблюваної поверхні.

Для оцінки вірогідності отриманого теоретичного рішення були проведені експериментальні дослідження технологічних параметрів зубошліфування за методом профільного копіювання на сучасному зубошліфувальному верстаті моделі *HOFLEER RAPID 1250* (тобто в умовах глибинного шліфування) із застосуванням високопористого профільного абразивного круга. Обробка здійснювалася зі швидкістю обертання круга 35 м/с з глибиною шліфування на першому проході 0,37 мм і на трьох наступних проходах – 0,01 мм, швидкістю переміщення круга (уздовж оброблюваного зуба зубчастого колеса) – 3 м/хв.

Таким чином, знімання припуску величиною 0,4 мм на сторону здійснювалося за 4 проходи круга. При цьому забезпечувалася необхідна точність обробки – у межах 0,01 мм, на оброблених поверхнях були відсутні припикання й інші температурні дефекти, що свідчить про відносно низьку температуру шліфування й високу ріжучу здатність круга в умовах глибинного шліфування. У порівнянні із традиційно застосовуваною схемою зубошліфування за методом обкату це дозволило до 5 разів збільшити продуктивність обробки.

Список літератури: 1. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М. : Машиностроение, 2007. – 688 с. 2. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии изготовления зубчатых колес редукторов приводов шахтных конвейеров / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский, И.В. Гершиков // Труды 18-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2012. – С. 59-68. 3. Технологія машинобудування: підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов и др. – Одеса : Астропринт, 2001. – 608 с.