

О.О. Якимов, д-р техн. наук, Одеса, Україна

РОЗРАХУНОК ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ПРИ ЗУБОШЛІФУВАННІ ДВОМА ТАРІЛЧАСТИМИ АБРАЗИВНИМИ КРУГАМИ ПО НУЛЬОВІЙ СХЕМІ

У статті наведена методика розрахунку інтенсивності теплового потоку при зубошліфуванні тарілчастими по методу огинання за нульовою схемою. Розрахунки показали, що з режимних параметрів найбільший вплив на інтенсивність теплового потоку надає подовжня подача. З цього випливає, що при розробці систем автоматичного і адаптивного управління шліфуванням на верстатах, які працюють тарілчастими кругами, за параметр, який керує теплонапруженістю процесу, необхідно вибирати подовжню подачу.

В статье приводится методика расчета интенсивности теплового потока при зубошлифовании тарельчатыми кругами по методу огибания по нулевой схеме. Расчеты показали, что из режимных параметров наибольшее влияние на интенсивность теплового потока оказывает продольная подача. Из этого вытекает, что при разработке систем автоматического и адаптивного управления шлифованием на станках, работающих тарельчатыми кругами, в качестве параметра, управляющего теплонапряженностью процесса, необходимо выбирать продольную подачу.

The article provides a method of calculating the intensity of the heat flux in the gear grinding mop disc by the method of rounding zero scheme. Calculations showed that the regime parameters of the greatest influence on the intensity of the heat flux has a longitudinal feed. This implies that the development of automatic and adaptive control for grinding machines working mop disc, as a parameter controlling thermal stress process, you must vibiraem traverse.

Виявлення проблеми. Явища, що супроводжують процес зубошліфування, пред-ставляють собою комплекс механічних і теплових впливів на поверхневий шар оброблюваного виробу. В результаті цих впливів змінюється фізико-механічний стан поверхневого шару, що може знизити довговічність роботи зубчастих коліс. Тепловий ефект при шліфуванні досить значний і особливість його полягає в короткочасному впливу. Однак, незважаючи на короткочасність нагріву, високі температури, що розвиваються при зубошліфуванні, призводять до виникнення структурних змін. Для свідомого управління якістю поверхневого шару зубів необхідно знати допустиму безпечну величину тимператури в зоні різання і мати розрахункові формули, що відображають зв'язок цієї температури із змінними параметрами процесу зубошліфування (режимами різання, характеристикою абразивного круга і т.п.). Для розрахунку температур необхідно знати інтенсивність теплового потоку.

Для розрахунку інтенсивності теплового потоку необхідно знати площу плями контакту інструмента з деталлю Φ й тангенціальну складову сили

$$\text{різання } P_z, q = \frac{P_z \cdot V_{kp}}{\Phi}.$$

Аналіз останніх досліджень і літератури. Питання забезпечення якості поверхневого шару зубів при зубошліфуванні за нульовою схемою тарілчастими кругами з надтвердих матеріалів розглянуті в роботах [1-4]. Але в цих роботах не розглядається зубошліфування тарілчастими абразивними кругами.

Виклад основного матеріалу. Робоча поверхня тарілчастого круга складається з торообразної і конічної частин. При обкатному русі інструмента в напрямку западини знімання оброблюваного матеріалу здійснюється ріжучими зернами, розташованими на торообразній поверхні (на закругленій кромці круга), а при обкатному русі у зворотному напрямку працюють зерна, розташовані на конічній ділянці робочої поверхні круга. На рис.1 показана лінія перетину АСБЕ конічної ділянки круга із циліндром, що імітує фрагмент бічної поверхні зуба, розташований поблизу лінії перетину цієї поверхні з ділільним циліндром оброблюваного колеса. З урахуванням руху інструмента уздовж зуба границя плями контакту набуває форму криволінійного чотирикутника БКМЕ. На рис. 2 показані плями контакту зуба з конічною і торообразною ділянками тарілчастого круга. Розрахунки площ плям контакту визначали за формулами

$$\theta = \sqrt{2 \cdot \rho \cdot t - t^2}, \quad (1)$$

$$\rho = r_o \cdot \operatorname{tg} 20^\circ$$

$$X = \sqrt{2 \cdot (R_{kp} - r) \cdot \theta - \theta^2}, \quad (2)$$

$$\theta_i = \frac{2 \cdot (R_{kp} - r) - \sqrt{[2 \cdot (R_{kp} - r)]^2 - 4 \cdot (X - i \cdot S)^2}}{2}, \text{ для } 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

$$\Delta_i = \sqrt{(\rho - t + r)^2 + \theta^2}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (4)$$

$$t_1 = (\rho + r) - \Delta_1, \quad (5)$$

$$t_i = (\rho_{i-1} + r) - \Delta_i, \text{ для } 2 \leq i \leq n \quad (6)$$

$$\rho_k = \rho - \sum_{i=1}^k t_i, \text{ для } 1 \leq k \leq n \quad (7)$$

$$L_i = \sqrt{2 \cdot r \cdot t_i - t_i^2}, \text{ для } 1 \leq i \leq n \quad (8)$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{(L_i + L_{i-1}) \cdot S}{2}, \quad (9)$$

$$n = \frac{X - S}{S}. \quad (10)$$

де r – радіус закруглення кромки круга $r=0,4 \cdot m$; m – модуль оброблюваного колеса; $R_{кр}$ – радіус круга; r_o – радіус основного круга; ρ – радіус кривизни евольвенти в точці перетину з ділільним кругом; X – довжина зони контакту круга із зубом; t – глибина різання; t_i – глибини проникнення шліфувального зерна в оброблюваний матеріал у різних поперечних перерізах зони контакту, вилучених друг від друга на відстані, рівній величині поздовжньої подачі S ; L_i – ширини зони контакту в різних поперечних перерізах; Φ – площа плями контакту круга із зубом шестірни; n – число обкатних рухів, здійснюваних у межах довжини зони контакту.

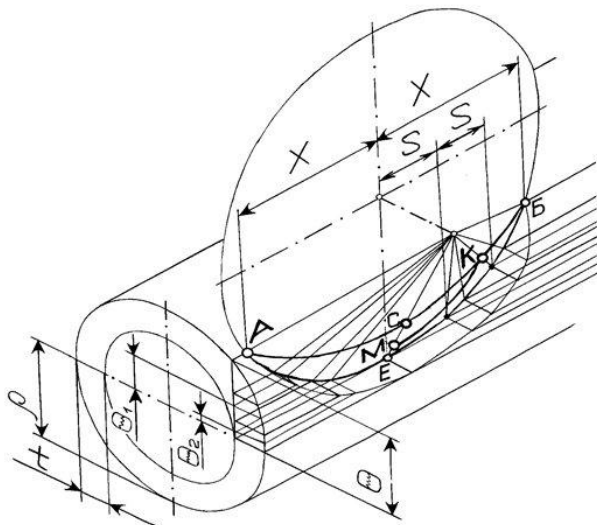


Рисунок 1 – Лінія перетину конічної частини тарілчастого круга із циліндром, ділянка якого імітує фрагмент бічної поверхні зуба в зоні ділільного круга

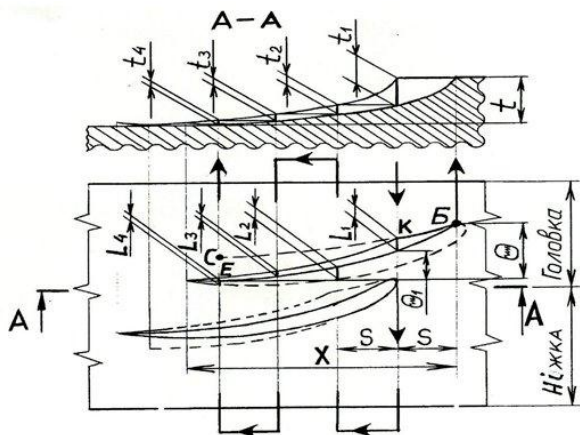


Рисунок 2 – Обкатні рухи, здійснювані в межах довжини зони контакту

На рис. 3 зображена пляма контакту торообразної частини тарілчастого круга із зубом колеса.

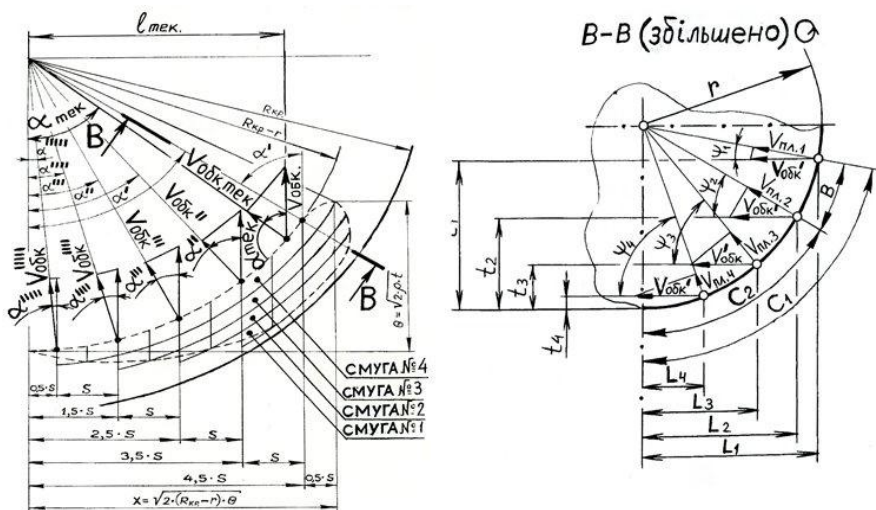


Рисунок 3 – Розбіжність швидкостей і кутів впровадження

нормальних складових елементарних шарів оброблюваного матеріалу по довжині й по ширині зони контакту

Торообразна частина робочої поверхні абразивного інструмента розбита на кільцеві смуги однакової ширини. Кількість смуг n , що уміщуються в межах найбільшої ширини зони контакту, було прийнято рівним числу обкатних рухів, у межах довжини плями контакту інструмента із заготівкою. Припуск, що знімається, представлений декількома пакетами нескінченно тонких елементарних шарів матеріалу, що обробляється. Кількість пакетів дорівнює числу смуг n .

З рис.3 видно, що нормальні складові швидкості обкатування $V'_{обк}$, $V''_{обк}$, $V'''_{обк}$, $V''''_{обк}$, $V'''''_{обк}$ у межах довжини зони контакту не однакові й залежать від кутів входу елементарних шарів оброблюваного матеріалу α' , α'' , α''' , α'''' , α''''' у робочу поверхню шліфувального круга

$$V_{обк.mek} = V_{обк} \cdot \sin(90^\circ - \alpha_{mek}) = V_{обк} \cdot \frac{l_{mek}}{(R_{kp} - r)}, \quad (11)$$

де l_{mek} – координата входу поточного елементарного шару оброблюваного матеріалу в робочу поверхню абразивного інструмента.

Швидкості $V_{нл.1}$, $V_{нл.2}$, $V_{нл.3}$, $V_{нл.4}$ проникнення нормальних складових елементарних шарів оброблюваного матеріалу в робочу поверхню круга неоднакові в межах ширини зони контакту й залежать від кутів $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$

$$V_{нл.mek_i} = V_{обк.mek} \cdot \cos \psi_i = V_{обк.mek} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{r}}. \quad (12)$$

Підставляючи (11) в (12), одержимо:

$$V_{нл.mek_i} = V_{обк} \cdot \frac{l_{mek}}{(R_{kp} - r)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{r}}. \quad (13)$$

Розбіжність кутів α_{mek} і ψ_i проникнення елементарних шарів у робочу поверхню абразивного інструмента обумовлює розбіжність умов знімання матеріалу. Розподіл знімання матеріалу й завантаженість ріжучих зерен на різних ділянках зони контакту неоднакові. Запропоновано розрахунок тангенціальної складової P_z сили різання, що виникає від впровадження нормального складового елементарного шару матеріалу в робочу поверхню круга, визначати за формулою

$$P_{z, mek, i} = \frac{0,44 \cdot A \cdot B}{2,25} \cdot \left[\frac{t g \gamma \cdot k'}{b} \right]^{0,25} \cdot \left(\frac{6,75 \cdot V_{обк} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{r}} \cdot \frac{l_{mek}}{(R_{kp} - r)}}{V_{kp}} \right)^{0,75} dl_{mek}, \quad (14)$$

де k' – поверхнева концентрація зерен на робочій поверхні круга, шт/м².

Тангенціальні складові $P_{z, mek, i}$ сил різання відрізняються між собою через різні умови знімання оброблюваного матеріалу на різних ділянках зони контакту. Отримано формулу для розрахунку тангенціальної складової $P_{z, i}$ сили різання, що виникає від одночасного проникнення в одну зі смуг круга всіх нормальних складових елементарних шарів матеріалу

$$P_{z, i} = 0,469 \cdot A \cdot \left[\frac{t g \gamma \cdot k'}{b} \right]^{0,25} \cdot \left(\frac{\frac{V_{обк}}{(R_{kp} - r)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{r}}}{V_{kp}} \right)^{0,75} \cdot B \cdot \left[(X - 0,5 \cdot S)^{1,75} - [(X - 0,5 \cdot S) - i \cdot S]^{1,75} \right] \quad (15)$$

де γ – половина кута при вершині зерна; b – максимальна висота виступання ріжучих зерен над рівнем зв'язування круга $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{x}$; \bar{x} – зернистість круга; $(1 - \varepsilon)$ – коефіцієнт, що враховує висоту виступання зерен над зв'язуванням; $k' = \frac{3 \cdot m' \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{x}^2}$; m' – об'ємна концентрація зерен круга, %; $m' = (60 - 2 \cdot N)$; N – номер структури шліфувального круга; B – ширина смуги

$$B = \frac{C_1}{n} = C_1 \cdot \frac{S}{(X - S)}; C_1 = r \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \psi_1 \right);$$

$$t_i = \frac{r}{2} \cdot \sin^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} - \psi_1 \right) \cdot \left(1 - (i - 1) \cdot \frac{S}{(X - S)} \right) \right], \text{ де } 1 < i \leq n \quad (16)$$

$$\psi_1 = \arccos \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{r}}, \quad (t_1 \text{ визначається за формулою (5)}).$$

Залежність (15) дозволяє описати функціональний зв'язок тангенціальної складової сили різання з параметрами режиму шліфування (швидкістю обкатування $V_{обк}$, швидкістю круга V_{kp} , поздовжньою подачею S), характеристиками шліфувального круга (половиною кута при вершинах ріжучих зерен γ , поверхневою концентрацією зерен на робочій поверхні

круга k' , радіусом круга R_{kp} , радіусом закруглення ріжучої кромки круга r) і параметром A , що характеризує міцнісні характеристики оброблюваного матеріалу. Тангенціальна складова P_z результуючої сили, що виникає від одночасного проникнення оброблюваного матеріалу в усі смуги робочої поверхні абразивного інструмента, дорівнює сумі $P_{z,i}$

$$P_z = \sum_{i=1}^n P_{z,i} . \quad (17)$$

Використовуючи формули (9) і (17), були зроблені розрахунки інтенсивностей теплових потоків $q = \frac{P_z \cdot V_{kp}}{\Phi}$, при шліфуванні різних зубчастих коліс на різних режимах шліфування. Результати розрахунків представлені на рис. 4. Із даних видно, що з режимних параметрів найбільший вплив на інтенсивність теплового потоку q має поздовжня подача S .

Висновок. При розробці систем автоматичного й адаптивного керування шліфуванням на верстатах, що працюють тарілчастими кругами, в якості параметра, що управляє теплонапруженістю процесу, треба вибирати поздовжню подачу.

Список використаних джерел : 1. Рябченко С.В. Гл. 5.5. Процессы шлифования зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ, оптимизация режимов // Сверхтвердые материалы, получение и применение: Монография в 6 т. /под общ. ред. Н.В. Новикова. – Т.6 Алмазно-абразивный инструмент в технологиях мех. обработки / под ред. А.А. Шепелева. – К.: ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины, 2007. – С. 287-299. 2. Рябченко С.В. Обеспечение качества обработки зубчатых колес при зубошлифовании кругами из КНБ // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: 36. наук. праць. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2009. – С. 80-87. 3. Рябченко С.В. Состояние поверхностного слоя стали при прецизионном зубошлифовании кругами из КНБ //Инженерия поверхности и реновация изделий: мат. 7-ой Международ. науч.-техн. конф., 29-31 мая 2007г., г. Ялта. – К.: АТМ України, 2007. – С.162-164. 4. Рябченко С.В. Качество обработки зубчатых колес после шлифования из КНБ //Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: мат. 9-ой Международ. науч.-техн. конф., 2009г., г. Ялта. – К.: АТМ України, 2009. – С. 228.

Bibliography (transliterated): 1. Rjabchenko S.V. Gl. 5.5. Processy shlifovaniya zubchatykh koles tarel'chatymi krugami iz STM, optimizaciya rezhimov // Sverhtverdye materialy, poluchenie i primenenie: Monografiya v 6 t. /pod obshh. red. N.V. Novikova. – T.6 Almazno-abrazivnyy instrument v tehnologiyah meh. obrabotki / pod red. A.A. Shepeleva. – K.: ISM im. V.M. Bakulja NAN Ukrainy, 2007. – S. 287-299. 2. Rjabchenko S.V. Obespechenie kachestva obrabotki zubchatykh koles pri zuboshlifovanii krugami iz KNB // Suchasni procesi mekhanichnoi obrobki instrumentami z NTM ta yakist' poveryhni detalej mashhin: Zb. nauk. prac'. – K.: INM im. V.M. Bakulja NAN Ukraini, 2009. – S. 80-87. 3. Rjabchenko S.V. Sostojanie poverhnostnogo sloja stali pri precizionnom zuboshlifovanii krugami iz KNB //Inzhenerija poverhnosti i renovaciya izdelij: mat. 7-oj Mezhdunarod. nauch.-tehn. konf., 29-31 maja 2007g., g. Jalta. – K.: ATM Ukrainy, 2007. – S.162-164. 4. Rjabchenko S.V. Kachestvo obrabotki zubchatykh koles posle shlifovaniya iz KNB //Kachestvo, standartizacija, kontrol': teorija i praktika: mat. 9-oj Mezhdunarod. nauch.-tehn. konf., 2009g., g. Jalta. – K.: ATM Ukrainy, 2009. – S. 228.