

ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ВІДРІЗНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Юрій Абрашкевич, Андрій Поліщук

Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Повітрофлотський пр-кт 31, Київ, Україна, email: AndPolishchuk@mail.ru

INFLUENCE OF THERMAL PROCESSES ON THE FUNCTIONALITY OF CUTTING OFF TOOLS

Yuriy Abrashkevich, Andrey Polishchuk

Kyiv National University of Construction and Architecture,
03680, Povitroflotskyi avenue 31, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. В статті розглянуто та проаналізовано комплекс досліджень по визначенню головних факторів, що впливають на зносостійкість абразивних кругів. Визначено, що найбільший вплив на зносостійкість абразивних кругів здійснює тепло, яке проникає в глибину круга під час різання матеріалів. Наслідком цих досліджень є визначення методу зменшення кількості тепла за рахунок виготовлення інструменту з шорховатими поверхнями. Розроблено рекомендації щодо створення приводних машин для використання абразивних армованих кругів.

Ключові слова: абразив, теплопровідність, міцність, бокові поверхні, зв'язка.

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрен и проанализирован комплекс исследований по определению главных факторов, влияющих на износостойкость абразивных кругов. Определено, что наибольшее влияние на износостойкость абразивных кругов осуществляет тепло, которое проникает в глубину круга при резке материалов. Следствием этих исследований является определение метода уменьшения количества тепла за счет изготовления инструмента с шероховатой поверхностью. Разработаны рекомендации по созданию приводных машин для использования абразивных армированных кругов.

Ключевые слова: абразив, теплопроводность, прочность, боковые поверхности, связка.

SUMMARY. Purpose. In the fulfilled work the complex of studies on defining the main factors that affect the wear resistance of abrasive wheels was analyzed. **Methodology/approach.** It was determined that the greatest influence on the wear resistance of abrasive wheels provides heat that penetrates into the depth of wheel while cutting material. **Findings.** As a result methods to reduce the amount of heat by making tool with rough surfaces were defined. **Research limitation/implications.** Thermal processes have decisive impact on operational indicators of the reinforced abrasive circles and quality of a surface. **Originality/value.** It is defined that with increase in rigidity of shpindelny knot of the actuating unit, wear resistance of the abrasive reinforced circles increases. In this regard it is necessary to create cars with the greatest possible rigidity of a spindle.

Key words: abrasive, thermal conductivity, strength, lateral surface, binding.

Подано 04.06.2013; прийнято 25.06.2013

ВСТУП

Собівартість абразивного різання, в основному, визначається зносостійкістю інструменту. Абразивні армовані круги, складаються із абразивного зерна, закріпленого між собою фенольною зв'язкою, наповнювача і армуючої склосітки. Фенольна зв'язка має порівняно низьку теплостійкість і при температурі 520⁰...570⁰К втрачає міцність. Водночас, теплові процеси, що протікають під час різання, залежать від режимів роботи, довжини дуги контакту між кругом і виробом, конструкції бокових поверхонь круга, а також від його висоти та інших параметрів, що багато в чому визначають ефективність застосування абразивного інструменту.

Відомо, що зносостійкість абразивних

кругів залежить від площі контакту, яка дорівнює відношенню висоти круга до довжини дуги контакту. Кількість ріжучих зерен, які визначають число теплових імпульсів, пропорційна площі контакту і визначає тепловий режим в зоні різання. Враховуючи, що висота абразивного круга стабільна, вплив теплових процесів на практиці може бути знижений шляхом зменшення довжини дуги контакту.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

В процесі різання виконується зняття стружки та її деформація, внаслідок чого в зоні контакту виникають високі температури. Визначення цих контактних температур – складна задача завдяки нестационарному процесу, а метод використання термопари – не досить точний. Абразивне зерно викри-

шується з круга під впливом відцентрової сили разом зі стружкою при виході із зони контакту у разі, якщо виконується термічне руйнування бакелітової зв'язки, тобто температура $520^0 \dots 570^0\text{K}$ розповсюджується в круг на глибину, яка перевищує розмір самого зерна.

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

Розглянемо розподіл температури в крузі, враховуючи переривчастий характер нагріву і охолодження його профілю. Введемо його в циліндричну систему координат. В цій системі координат обертається не круг, а деталь з кутовою швидкістю ω навколо нерухомого круга. Рівняння температуропровідності для деталі дорівнює:

$$c\rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \nabla^2 T = \lambda \left[\frac{1}{z^2} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot z^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{z^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right], \quad (1)$$

де φ - кут подачі деталі відносно круга; T - температура в зоні контакту; t - час різання; z - товщина стружки; v - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря; λ - коефіцієнт теплопровідності; $\nabla^2 T$ - оператор Лапласа; c - питома теплоємність; ρ - густина.

Оскільки за реальним процесом різання, розмір круга значно більше розмірів деталі, а розподіл тепла у деталі не залежать від кута φ рівняння (1) може бути змінене на більш просте:

$$c\rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Відносно круга, рівняння теплопровідності в ньому буде:

$$c^e \rho^e \cdot \frac{\partial T^e}{\partial t} = \lambda^e \left[\frac{1}{z^2} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot z^2 \cdot \frac{\partial T^e}{\partial z} + \frac{1}{z^2} \cdot \frac{\partial^2 T^e}{\partial \varphi^2} \right]. \quad (3)$$

Враховуючи, що основні теплові процеси здійснюються поблизу ріжучої кромки, тоді замість (3) можна записати:

$$c' \rho' \cdot \frac{\partial T'}{\partial t} = \lambda' \cdot \frac{\partial^2 T'}{\partial \varphi^2}. \quad (4)$$

Граничні умови рівності теплових потоків по різному записуються залежно від кута φ . У місці контакту деталі з кругом $\varphi \in [0; \varphi_0]$, граничні умови визначаються відповідно:

$$0 = \lambda' \frac{\partial T'}{\partial z} \Big|_{r=R} + \alpha \cdot T \cdot (r=R). \quad (5)$$

За межами зони контакту круг охолоджується повітрям, і тому граничні умови відповідно дорівнюють:

$$q = \lambda' \frac{\partial T'}{\partial z} \Big|_{r=R} - \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} + (mc + m'c') \cdot T \cdot (r=R), \quad (6)$$

де q - миттєве виділення тепла в точці; α - коефіцієнт тепловіддачі; $(mc + m'c') \cdot T \cdot (r=R)$ - теплота, що видаляється разом зі стружкою; $(r=R)$ - температура в зоні різання.

Ці дві граничні умови можна об'єднати в одну для всіх кругів, якщо ввести функцію $\Phi(\varphi; \varphi_0) = \Phi$, тобто,

$$\Phi(\varphi; \varphi_0) = \begin{cases} 1; & \varphi \in [0; \varphi_0] \\ 0; & \varphi \in [\varphi_0; 2\pi] \end{cases}. \quad (7)$$

Використовуючи цю функцію, можна записати граничні умови для всієї ріжучої кромки круга:

$$q\Phi = -\lambda' \frac{\partial T'}{\partial z} \Big|_{r=R} + \lambda^e \frac{\partial T^e}{\partial r} \Big|_{r=R} + (mc + m'c') \times T \cdot (r=R) \cdot \Phi + [1 - \Phi] \cdot \alpha T (r=R). \quad (8)$$

Очевидно, що залежність температури зв'язки круга (T^e) від часу буде подвійною. З однієї сторони T^e буде змінюватись з подачею круга у виріб, що обробляється («повільна» залежність від часу), з другої сторони, T^e буде змінювати своє значення на протязі одного оберту круга («швидка» залежність). Короткочасний вплив високої температури не руйнує бакелітову зв'язку. Тому визначальна залежність, яка вимірюється на практиці, є «повільна» залежність. Введемо середню за періодом обертання температуру, тобто:

$$\tilde{T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} T d\varphi. \quad (9)$$

Очевидно, що для виробу, $\tilde{T} = T$ бо кутової залежності для T немає, граничні умови для T' можуть бути визначено із (8) інтегруванням за $d\varphi$:

$$Q \cdot l = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_l + \lambda' \cdot 2\pi R \cdot \frac{\partial \tilde{T}'}{\partial z} \Big|_{r=R} + (mc + m'c') \cdot T \cdot (r=R) \cdot 2\pi R + \alpha 2\pi r \cdot \tilde{T}'(r=R) \cdot (1-l). \quad (10)$$

Рівняння (4) переходить в:

$$c' \rho' \cdot \frac{\partial \tilde{T}'}{\partial z} = \lambda' \cdot \frac{\partial^2 \tilde{T}'}{\partial z^2}. \quad (11)$$

Рішення для нього буде:

$$T' = \sum_{\lambda} e^{-a\lambda^2 t} (A_{\lambda} \cos \lambda x + B_{\lambda} \sin \lambda x). \quad (12)$$

Існує декілька способів зменшення T і, відповідно, збільшення зносостійкості кругів. Перший спосіб полягає у зменшенні довжини дуги контакту, і, відповідно, збільшенні довжини контакту і часу охолодження периферії круга, тоді відбувається інтенсивне відведення тепла в середину круга за рахунок підвищення його теплопроводності. А також, температура може бути зменшена шляхом введення до складу круга наповнювача, або збільшенням щільності круга, так як наявність пор призводить до меншої деформації стружки і, відповідно, до меншої затрати енергії.

Порівняємо залежність (12) з експериментальною [1]. При рішенні (12) не враховувалась висота круга, що призводить до одночасності задачі, в квазістаціонарному випадку виходить лінійний спад температури в крузі з відстанню від ріжучої кромки. Експеримент [1] показує, що температура змінюється інтенсивніше. Пояснюється це тим, що круг віддає тепло навколишньому середовищу не тільки з ріжучої кромки, але і з бокових (не врахованих в даній, загальноприйнятій для опису кругів, моделі) поверхонь. Віддача бокових поверхонь буде більш суттєва за меншою висотою круга, тобто в більш тонкому крузі не тільки виділяється менше тепла на ріжучій поверхні, але воно і швидше відводиться через бокові поверхні [2].

Збільшення робочої швидкості круга не впливає на відношення довжини дуги кон-

такту і довжини дуги охолодження, або на коефіцієнт теплопроводності, а між тим зі збільшенням швидкості ($V_{роб}$) зносостійкість круга зростає приблизно лінійно. Це пояснюється тим, що з ростом ($V_{роб}$) збільшується тепловіддача з бокової поверхні, яка визначається коефіцієнтом теплопередачі Nu .

Як впливає із [4] коефіцієнт теплопередачі Nu з гладкими поверхнями дорівнює:

$$Nu = \frac{\frac{C_a}{2} \cdot Pz \cdot Re}{1 + 5 \sqrt{\frac{C_a}{2}} \left\{ Pz - 1 + \ln \left[1 + \frac{5}{6} \cdot (Pz - 1) \right] \right\}}, \quad (13)$$

де $C_a = 0,146 \cdot Re$ - коефіцієнт опору;

$Re = \frac{VR}{v}$ - число Рейнольда; V - колова швидкість круга, (м/с); R - радіус круга;

$v = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$ - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря; $Pz = 0,7$ - число Прандтля для повітря.

Як впливає з формули (13), з ростом Re , так як і швидкість обертання круга, зростає ефективність тепловіддачі повітря з бокових поверхонь круга, що призводить до зниження \tilde{T} і, відповідно, до підвищення зносостійкості кругів.

Зі збільшенням швидкості подачі окреме зерно знімає стружку більшої товщини. Деформація цієї стружки в процесі різання призводить до збільшення тепла, яке виділяється поблизу окремого зерна, і, як наслідок, до підвищення температури в зоні контакту. Це призводить до більш інтенсивного зношення круга, хоча і продуктивність роботи при цьому підвищується. Оскільки, в умовах будівельних площадок, де різання виконується епізодично, продуктивність різання немає великого значення, необхідно уникати швидкості подачі величиною більше ніж 0,5 м/хв., бо вона веде до інтенсивного зношення кругів. При подачах до 0,2 м/хв. тепловий фронт проникає на значну глибину в матеріал [3]. Внаслідок цього, зі стружкою видаляється лише незначна частина тепла, що виділяється під час різання. Це веде до накопичення тепла в системі, а також до росту темпера-

тури в області контакту і, як наслідок, до появи прожогів в матеріалі, який обробляємо.

На експлуатаційні показники абразивних армованих кругів значний вплив здійснює конструкція його бокових поверхонь. На сьогоднішній день промисловість випускає круги з гладкими боковими поверхнями. З ціллю зменшення впливу тертя бокових поверхонь виготовлялись круги з рифленими або шорсткими поверхнями. Для виготовлення кругів з рифленими боковими поверхнями використовувались пресформи з робочими плитами, що мають насічки у вигляді концентричних кіл, а з шорсткими боковими поверхнями - робочими плитами, на яких жорстко закріплені пружні прокладки (гума, поліуретан) [5].

В такому випадку зерна абразиву вдавлюються в прокладку.

Розглянемо вплив теплових процесів при роботі кругами з різними конструкціями бокових поверхонь. В таких кругах абразивне зерно знаходиться на одному рівні зі зв'язкою. При різанні якими, внаслідок тертя бокових поверхонь, виділяється значна кількість тепла, що негативно впливає на зносостійкість інструменту. Зі збільшенням глибини різання зростає потужність, яка використовується на бокове тертя, і, відповідно, навантаження на привідний пристрій. Крім того, в процесі роботи відбувається контакт бокових поверхонь круга з матеріалом, що розрізаємо через теплову деформацію деталі під дією температури, яка виникає під час різання, коливання висоти інструменту і нерівномірності зносу його торців. У зв'язку з цим, при різанні спостерігається заклинювання круга, а в деяких випадках – його поломка, що особливо небезпечно при роботі ручними шліфувальними машинами. Надійність і зносостійкість круга можуть бути підвищені у випадках зменшення площі контакту інструменту з матеріалом.

Як уже враховувалось, важливим фактором являється тепловіддача з бокових поверхонь круга, який обертається з робочою швидкістю до 80 м/с. Тепловіддача з поверхні рухомого тіла здійснюється через граничний шар, що складається із прилеглого

до поверхні ламінарного підшару, і зовнішньої турбулентної зони, в такому разі найбільш повільним є процес передачі тепла через ламінарний підшар. Тому тепловіддача з бокових поверхонь гладкого круга незначна.

Вплив бокового тертя можна зменшити, застосувавши круги з рифленими боковими поверхнями за рахунок зменшення площі контакту бокової поверхні круга з поверхнею різця. Це зменшує кількість виділеного з бокових поверхонь тепла і, відповідно, тепловий знос круга. Окрім того, наявність рифлення збільшує ефективну бокову поверхню для тепловіддачі і веде до більш інтенсивного охолодження бокових поверхонь круга. Додатковий ефект збільшення тепловіддачі зв'язаний з порушеннями ламінарного підшару в місцях рифлень і розвитком турбулентності в підграничному шарі.

Під час розгляду теплових процесів в кругах з шорсткими боковими поверхнями потрібно враховувати, що наявність шорсткості зменшує площу контакту бокових поверхонь з поверхнею різку і, відповідно, енергію, що затрачається на бокове тертя. Окрім цього, значно покращується тепловіддача з бокових поверхонь через те, що елементи шорсткості руйнують ламінарний підшар і, як наслідок, тепловіддача передається турбулентному підшару. Оцінку тепловіддачі з шорсткою боковою поверхнею можливо зробити, використовуючи наступну залежність [4]:

$$Nu^{\epsilon} = \frac{\frac{C_a^{\epsilon}}{2} \cdot P_z \cdot Re}{1 + \sqrt{\frac{C_a^{\epsilon}}{2} \cdot 0,52 \cdot \left(\frac{V_{жс} \cdot K}{\nu}\right)^{0,45}} \cdot P_z^{0,8}}, \quad (14)$$

де $V_{жс} = V \cdot \sqrt{\frac{C_a^{\epsilon}}{2}}$ - динамічна швидкість;

C_a^{ϵ} - коефіцієнт опору тертя для шорстких поверхонь; K - висота елемента шорсткості.

Збільшення тепловіддачі починає проявлятися в разі виконання наступної умови:

$$K > 12 \frac{\nu}{V_{жс}}. \quad (15)$$

У випадку абразивних армованих кругів з зернистістю 50 і 80 – ця умова виконується. Тому тепловіддача з шорсткою поверхнею більше, ніж у кругів з гладкими поверхнями.

Важливою перевагою шорстких кругів є і те, що вони не заклинюються. Абразивні зерна, виступаючи більш ніж на $1/4$ радіуса зерна, при дотиканні з поверхнею матеріалів, здійснюють різання з виникненням стружки. Оскільки стружка видаляється, то із системи видаляється частина тепла, тому сумарна частина тепла, яка попадає в круг з шорсткими поверхнями є меншою, а тепловіддача з такої поверхні – краще. Це і призводить до мінімального теплового зношення круга.

Умови експлуатації машин, робочим органом яких є абразивні круги, пред'являють жорсткі вимоги до їх маси. Жорсткість шпиндельного вузла в таких машинах зазвичай не велика тому, що її збільшення веде до збільшення маси машини. Як наслідок площа круга коливається відносно площі різання. Внаслідок цього крайні точки ріжучої кромки рухаються в матеріалі за синусоїдою, і, якби різання здійснювалось тільки ріжучою кромкою, поверхня різки була б хвилястою. Внаслідок того, що бокова поверхня круга стикається з цією хвилястою поверхнею, виконується її вирівнювання. Гладкі і рифлені круги видаляють цю хвилястість за рахунок зрізання її своєю боковою поверхнею, що призводить до значного виділення тепла. Шорсткі круги зрізують ці області з видаленням стружки, внаслідок чого виходить видалення частини тепла і менш інтенсивне зношення круга по боковим поверхням, ніж у випадках використання кругів з гладкими та рифленими частинами. Разом з тим зрізання цих виступів бокових поверхонь виходить в несприятливих умовах – довжина дуги контакту не змінюється, а довжина дуги охолодження зменшується, навіть наявність шорсткості не усуває небажані наслідки, зв'язані з недостатньою жорсткістю шпинделя. Тому на практиці необхідно прагнути максимальної жорсткості шпиндельного вузла. Те, що збільшення цієї жорсткості збільшує зносостій-

кість кругів, підтверджується шляхом вивчення зносостійкості одинарних кругів на ручних машинах і маятникових пилах. В останніх – зносостійкість вища.

ВИСНОВКИ

1. Визначено, що теплові процеси мають вирішальний вплив на експлуатаційні показники армованих абразивних кругів і якість поверхні різки, тому необхідно при різанні прагнути до мінімального відношення між довжиною дуги контакту і довжиною дуги охолодження.
2. Зносостійкість абразивних армованих кругів значною мірою залежать від конструкції бічної поверхні. Найбільш ефективно використовувати круги з шорсткими поверхнями, що дає змогу не лише підвищити експлуатаційні показники армованих кругів, але і значною мірою, надійність і безпеку при роботі з ними.
3. Визначено, що зі збільшенням жорсткості шпиндельного вузла привідного пристрою, зносостійкість абразивних армованих кругів збільшується. У зв'язку з цим необхідно створювати машини з максимально можливою жорсткістю шпинделя.
4. Для підвищення експлуатаційних показників круга необхідно провести комплекс робіт, який дозволить підвищити теплофізичні і механічні властивості інструменту, що призведе до зменшення небажаного впливу теплових процесів. Зокрема, одним із шляхів зменшення теплових процесів, окрім створення шорстких поверхонь, являється зменшення висоти інструменту.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Королев В.В.** Расчет температурных полей при абразивной резке металла Станки и инструменты, 1971, № 4, с. 30-32.
2. **Карман Т.** Математические методы в инженерном деле. М.-Л. Гостехиздат., 1948, 424 с.

3. **Сипайлов В.А.** Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М., «Машиностроение», 1978, 168 с.
4. **Эшги С.** Тепловые явления при абразивной резке Конструирование и технология машиностроения, изд. Мир – 1976, №2, с. 186-191.
5. **А.с. № 763077 (СССР).** Способ изготовления отрезных абразивных кругов с рифлеными боковыми поверхностями Ю.Д. Абрашкевич, В.А. Борисов, Б.А. Сотников и др. – Опубл. в БН, 1980, №34.

REFERENCES

1. **Korolev V.V., 1971.** Raschet temperaturnyh polej pri abrazivnoj rezke metala [Calculation of temperature fields with an abrasive cutting of metal]. Stanki i instrumenty [Machines and Tools], no. 4, 30-32.
2. **Karman T., 1948.** Matematicheskie metody v inzhenernom dele [Mathematical methods in engineering]. Moscow, Gostechpubl., 424.
3. **Sipailov V.A., 1978.** Teplovye processy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti [Thermal processes for grinding and control of surface quality]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 168.
4. **Eshgi S., 1976.** Thermal phenomena during abrasive cutting. Engineering and Engineering Technology, no. 2, 186-191.
5. **Abrashkevich Y.D., Borisov V.A., Sotnikov B.A., 1980.** Method of manufacturing cutting-off-abrasive wheel with ribbed side surfaces and others. Patent USSR, no. 76307.