

УДК 621.924

НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ РІЗАННІ АБРАЗИВНИМ АРМОВАНИМ КРУГОМ

Наведена методика розрахунку навантаження абразивних армованих кругів та визначення потужності з урахуванням впливу конструктивних та режимних параметрів шліфувальних машин.

The method of calculating the load on abrasive reinforced circles and determination of power taking into account the influence of structural and regime parameters of grinding machines is considered.

Ключові слова: різання, навантаження, абразивний армований круг.

Дослідження процесу різання різноманітних матеріалів абразивними армованими кругами, механізму спрацювання, параметрів міцності та теплових процесів із метою підвищення ефективності використання потребує вивчення їх навантаження. Особливістю роботи таких робочих органів є зміна величини діаметра круга у процесі роботи (зношення круга при руйнуванні робочого середовища), що впливає на зміну параметрів контактної поверхні круга з робочим середовищем.

Для розгляду навантаження абразивного армованого круга (рис. 1) необхідно обумовити наступні допущення:

- режим роботи абразивного армованого круга усталений;
- стан робочого середовища та його поверхні незмінний;
- сили, що діють на робочу поверхню круга, прикладені до площадок робочої поверхні круга, а не до окремих абразивних зерен;
- вплив шламу, що утворюється в процесі різання, не враховується;
- руйнування робочого середовища відбувається тільки за рахунок дії тангенціальних сил;
- траєкторія руху точки абразивного армованого круга – окружність, внаслідок малої величини співвідношення швидкості подачі до коллової швидкості.

Згідно з прийнятими допущеннями, тангенціальна (P^0) та нормальна (P_n^0) сили прикладені до площадки робочої поверхні круга (рис. 1, б) з розмірами

$$f \quad b \quad l,$$

де b – ширина круга; l – довжина площадки по дузі контакту, на якій з необхідною точністю можна вирахувати глибину різання в межах площадки постійною ($a = const$), тому і сили P^0 та P_n^0 рівномірно розподілені по всій площадці контакту f .



Ю.Д. Абрашкевич
професор кафедри
«Будівельні машини ім. Ю.О. Ветрова»
Київського національного університету
будівництва і архітектури,
заслужений діяч науки і техніки України,
д.т.н., професор



Г.М. Мачишин
доцент кафедри
«Будівельні машини ім. Ю.О. Ветрова»
Київського національного університету
будівництва і архітектури,
к.т.н., доцент



О.А. Марченко
інженер Київського національного
університету будівництва
і архітектури

Сили P^0 та P_n^0 пов'язані співвідношенням

$$\frac{P^0}{P_n^0} = \dots \quad (1)$$

Коефіцієнт визначається з експерименту, з урахуванням прийнятих допущень у подальшому вважаємо $const$. Тоді елементарна робота, що йде на руйнування робочого середовища, при дії сили P^0 на елементарному шляху dl по дузі контакту буде:

$$dA \quad P^0 \quad dl; \quad (2)$$

$$\text{або} \quad dA \quad q \quad dV, \quad (3)$$

де q – енергоємність процесу різання; dV – елементарний об'єм зруйнованого робочого середовища.

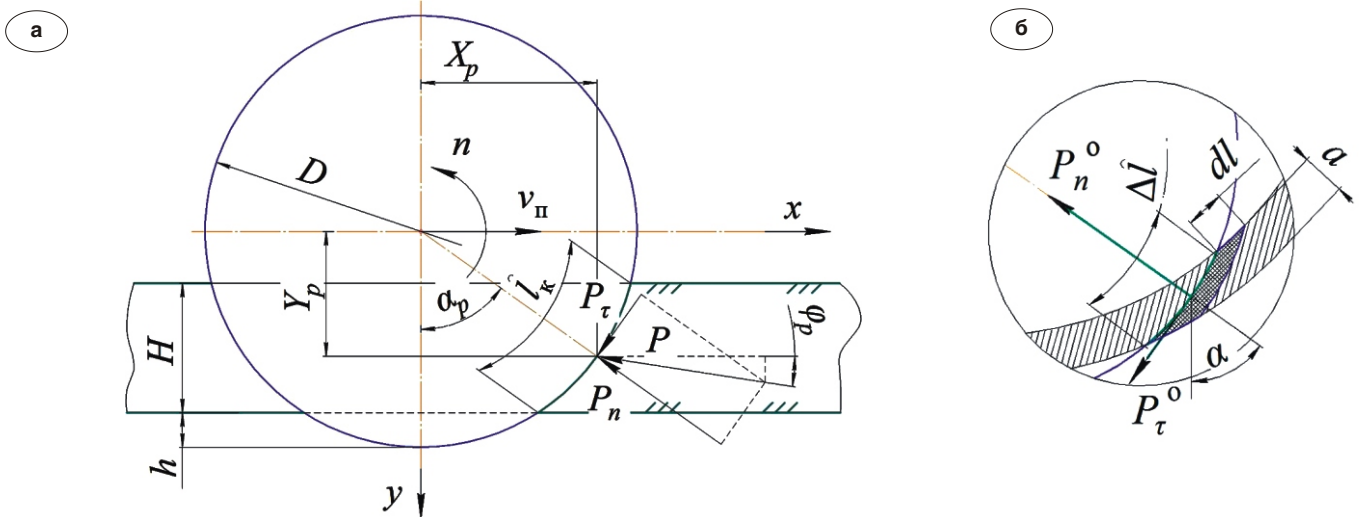


Рис. 1. Схема навантаження абразивного армованого круга:
а – загальний вигляд; б – вигляд роботи елементарною площадкою круга

Так як елементарний об'єм $dV = b \cdot a \cdot dl$, то, прирівнявши праві частини рівнянь (2) та (3), отримуємо:

$$P^0 = q \cdot b \cdot a, \quad (4)$$

з урахуванням співвідношення (1)

$$P_n^0 = \frac{q}{l} \cdot b \cdot a. \quad (5)$$

Глибину зрізу, що відповідає площадці f , можна записати так [1]:

$$a = \frac{v_n}{n \cdot z} \sin \alpha, \quad (6)$$

де $z = \frac{D}{l}$ – кількість площадок f на колі круга; v_n, n – відповідно швидкість подачі та число обертів круга на одиницю часу; D – діаметр круга; α – поточний кут контакту для площадки f .

Вираз (6) можна представити у виді

$$a = \frac{v_n}{D \cdot n} \cdot l \cdot \sin \alpha = \frac{v_n}{v_0} \cdot l \cdot \sin \alpha,$$

де $v_0 = D \cdot n$ – колова швидкість круга. Підставляючи цей вираз у рівняння (4) та (5), можна записати:

$$\begin{aligned} P^0 &= q \cdot b \cdot \frac{v_n}{v_0} \cdot l \cdot \sin \alpha; \\ P_n^0 &= \frac{q}{l} \cdot b \cdot \frac{v_n}{v_0} \cdot l \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

Для проведення наступних досліджень доцільним є визначення погонної інтенсивності тангенціальних і нормальних сил. Так як довжина площадки робочої поверхні круга, що відповідає

силам P^0 та P_n^0 , дорівнює l , то погонна інтенсивність цих сил буде такою, що дорівнює:

$$\begin{aligned} P &= \frac{P^0}{l} = q \cdot b \cdot \frac{v_n}{v_0} \sin \alpha; \\ P_n &= \frac{P_n^0}{l} = \frac{q}{l} \cdot b \cdot \frac{v_n}{v_0} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

Отримані вирази є законами розподілу нормальних і тангенціальних сил по дузі контакту. Знання законів розподілу сил по дузі контакту необхідне для вивчення як процесу різання робочого середовища, так і механізму зношення абразивного армованого круга. Також це є необхідним для дослідження теплофізичних процесів, що супроводжують процес різання.

Для дослідження міцнісних параметрів абразивних армованих кругів і розрахунків на стійкість необхідно визначити рівнодіючі усіх сил, що впливають на круг (P), що визначається як результат геометричного складання сумарних проєкцій тангенціальних і нормальних сил (P, P_n) на прямокутні осі координат x та y (див. рис. 1, а):

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}. \quad (9)$$

Тоді отримуємо:

$$\begin{aligned} P_x &= P \cdot \cos \alpha; \\ P_y &= P \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (10)$$

де P_x, P_y – відповідно сума проєкцій тангенціальних сил на осі x та y ; P_{nx}, P_{ny} – аналогічно для суми проєкцій нормальних сил.

Вважаючи, що різання відбувається способом «проти подачі» визначаємо значення суми проекцій сил P_x, P_y, P_{nx}, P_{ny} .

Враховуючи вираз (8), елементарні тангенціальні та нормальні сили, що діють на елемент робочої кромки круга довжиною dl , запишемо так:

$$\begin{aligned} dP &= P \, dl \, q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \sin \, dl; \\ dP_n &= P_n \, dl \, q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \sin \, dl. \end{aligned} \quad (11)$$

Тоді

$$\begin{aligned} P_x &= q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} l_k (\sin \cos \, dl); \\ P_y &= q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} l_0 (\sin^2 \, dl); \\ P_{nx} &= q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} l_k (\sin^2 \, dl); \\ P_{ny} &= q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} l_0 (\sin \cos \, dl). \end{aligned} \quad (12)$$

Тут l_k, l_0 – відповідно довжини дуг по висоті H та h (див. рис. 1, а).

Величини довжин дуг визначаються наступним чином:

$$l_k = \frac{D}{2} \arccos 1 - \frac{2(H-h)}{D} \arccos 1 - \frac{2h}{D}; \quad (13)$$

$$l_0 = \frac{D}{2} \arccos 1 - \frac{2h}{D}.$$

Підставляючи у вираз (12) $\frac{l}{R}$ за умови, що $h = 0$, після інтегрування та перетворень отримуємо:

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \sin^2 \frac{2l_k}{D}; \\ P_y &= \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D}; \\ P_{nx} &= \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D}; \\ P_{ny} &= \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \sin^2 \frac{2l_k}{D}. \end{aligned} \quad (14)$$

Підставляючи вираз (14) у (10), отримуємо значення проекцій рівнодіючих усіх сил на осі координат

$$P_x = \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D} \sin^2 \frac{2l_k}{D} \frac{2l_k}{D}; \quad (15)$$

$$P_y = \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D} \frac{1}{2} \sin^2 \frac{2l_k}{D}. \quad (16)$$

Проекція рівнодіючої усіх сил на вісь x (15) є також виразом для визначення зусилля подачі, але з протилежним знаком. Враховуючи це, вираз (15) можна записати:

$$P_{\pi} = P_x \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \frac{2l_k}{D} \sin^2 \frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D}.$$

На основі отриманих виразів (15) та (16), після перетворень, формула для рівнодіючої усіх сил (9) набуває виду

$$P = \frac{D}{4} q \, b \frac{v_{\pi}}{v_0} \sqrt{1 - \frac{1}{2} \frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D} \sin^4 \frac{2l_k}{D}}. \quad (17)$$

Кут між лінією напрямку дії рівнодіючої P з позитивним напрямком осі x визначається як

$$\rho = \arctg \frac{P_y}{P_x} = \arctg \frac{\frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D} \frac{1}{2} \sin^2 \frac{2l_k}{D}}{\frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D} \sin^2 \frac{2l_k}{D} \frac{2l_k}{D}}. \quad (18)$$

Координати точки прикладення рівнодіючої усіх сил X_p та Y_p визначаємо через вирази

$$X_p = \frac{D}{2} \sin \rho; \quad Y_p = \frac{D}{2} \cos \rho, \quad (19)$$

де ρ – кут між вертикальною віссю y та лінією дії нормальної складової рівнодіючої усіх сил P_n . Значення кута ρ визначається через співвідношення проекцій тангенціальних і нормальних сил (P, P_n) на прямокутні осі координат і після перетворень набуває виду

$$\rho = \arctg \frac{\frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D}}{\sqrt{\sin^4 \frac{2l_k}{D} \frac{2l_k}{D} \frac{2l_k}{D} \frac{1}{2} \sin \frac{4l_k}{D}}}. \quad (20)$$

Визначаємо потужність різання абразивними армованими кругами (N_p). Згідно з прийнятими раніше допущеннями,

$$N_p = M_0, \quad (21)$$

де $M_0 = P \frac{D}{2}$ – момент від тангенціальних сил відносно початку координат (осі приводу круга);
 $\frac{n}{30}$ – кутова швидкість круга; n – частота обертання круга.

На рис. 2 показані графіки зміни сил різання та потужності від зміни діаметра абразивного армованого круга при постійному значенні частоти обертання $n = const = 6500$ об/хв та різних значеннях швидкості подачі v_n . Дані, отримані при наступних розрахункових показниках: $H = 20$ см; $h = 0$; $b = 2$ мм; робоче середовище – сталь; $\mu = 0,4$; $q = 36 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

Аналіз графіків показує, що в прийнятному діапазоні значень діаметра абразивного круга (який характерний для роботи відрізними кругами з приводом від ручних шліфувальних машин) існує пропорційна залежність силових (P, P_n, P_τ) та енергетичних (N_p) показників від швидкості подачі круга (v_n), який характеризує продуктивність проведення робіт. Також з графіків видно, що зменшення діаметра круга (D), його зношення призводить до пропорційного збільшення навантаження на відрізнюму крузі. Що пояснюється зниженням колдової швидкості круга за рахунок зменшення діаметра при постійній частоті обертання. Зниження колдової швидкості призво-

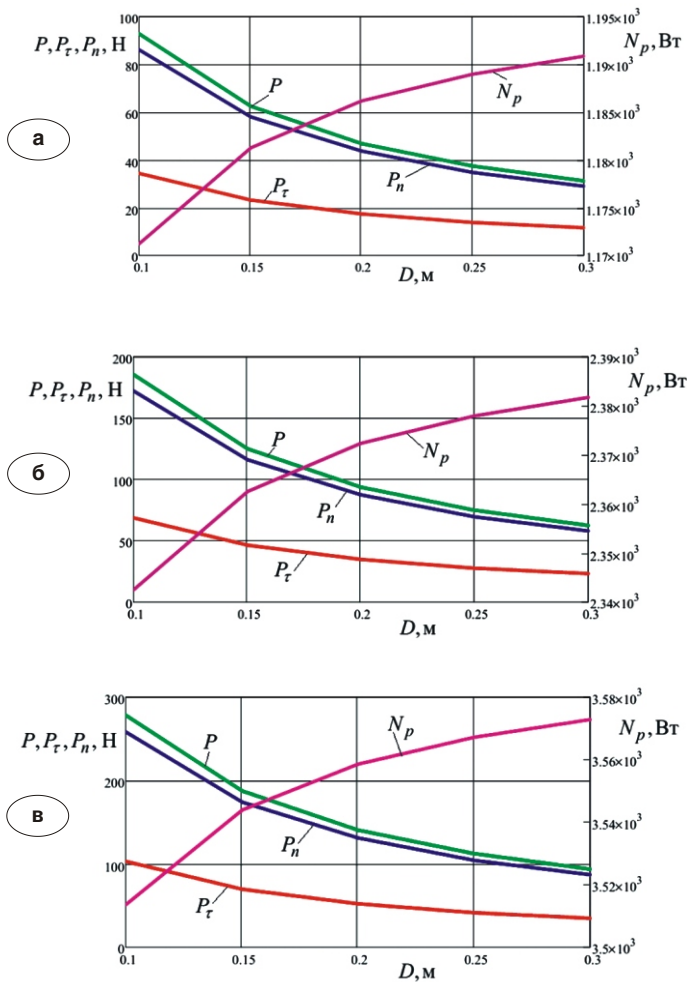


Рис. 2. Залежність сил та потужності різання від зміни діаметра круга при $n = const = 6500$ об/хв та швидкості подачі v_n :
 а – 0,5 м/хв; б – 1,0 м/хв; в – 1,5 м/хв

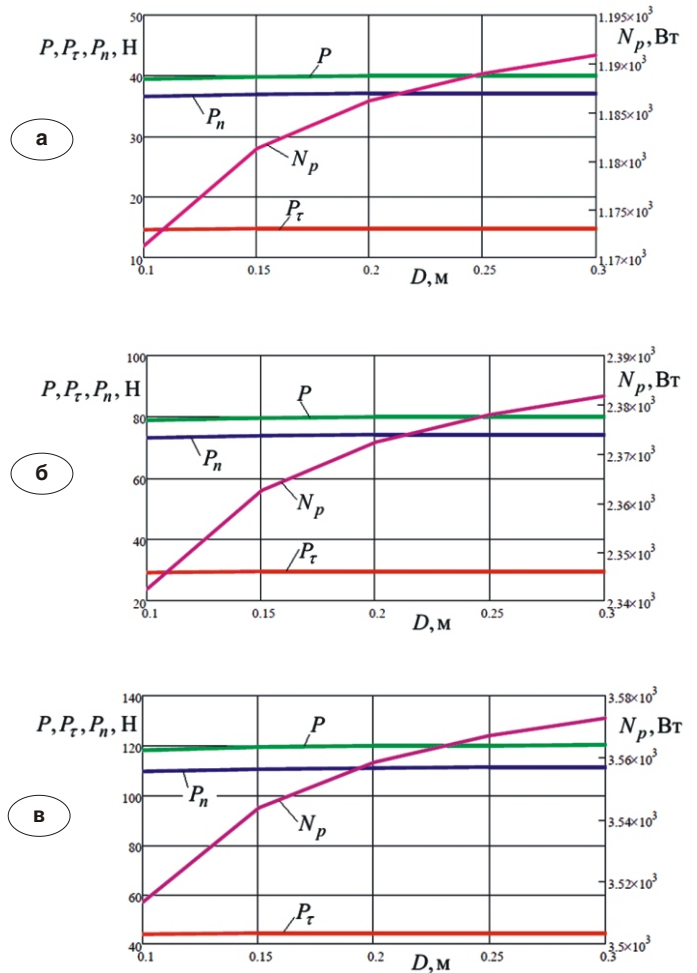


Рис. 3. Залежність сил та потужності різання від зміни діаметра круга при $v_n = const = 80$ об/хв та швидкості подачі v_n :
 а – 0,5 м/хв; б – 1,0 м/хв; в – 1,5 м/хв

дить не тільки до збільшення навантаження, але і до погіршення умов роботи круга, зниження його зносостійкості. За підвищеної швидкості кожне зерно за один оберт круга виконує меншу роботу і заглиблюється в розрізуваний матеріал на величину, меншу в стільки разів, у скільки збільшувалася робоча швидкість. За меншої робочої швидкості кожне зерно рідше контактує з розрізуваним матеріалом, тобто збільшується товщина стружки і зерно працює з більшим навантаженням, отже, умови для викришування зерен з круга стають вірогіднішими. Проте за швидкості понад 80 м/с навантаження стають такими великими [1, 2], що спричиняють передчасне викришування зерен із зв'язки, що призводить до інтенсивного зношення інструмента. З цих причин усі круги, що використовуються на будівельно-монтажних роботах, призначені для різання з робочою швидкістю 80 м/с.

На рис. 3 показано графіки залежності сил та потужності різання при змінному діаметрі круга при сталій колдовій швидкості $v_0 = \text{const} = 80$ м/с.

Очевидно, що встановлення круга в приводі з постійною колдовою швидкістю 80 м/с дає змогу стабілізувати навантаження для усього діапазону зміни діаметра круга, що свідчить про доцільність використання приводів із можливістю регулювання частоти обертання круга та переставлення зношених кругів (зі зменшеним діаметром) на приводи з більшою частотою обертання, що дає змогу надалі експлуатувати їх на робочій швидкості 80 м/с.

Потужність на обертання робочого органу для обох розглянутих випадків змінюється незначно у межах 3...5 % від максимального значення. Тому доцільним є також підбір потужності силового приводу круга згідно з технічними параметрами робіт, що виконуються.

Потужність, що витрачається на подачу, може бути обрахована за формулою

$$N_{\text{п}} = P_{\text{п}} v_{\text{п}} = \frac{D}{4} q b \frac{v_{\text{п}}^2}{v_0} \cdot \frac{2l_{\text{к}}}{D} \sin^2 \frac{2l_{\text{к}}}{D} = \frac{1}{2} \sin \frac{4l_{\text{к}}}{D} \quad (22)$$

Доволі невелика величина $\frac{v_{\text{п}}^2}{v_0}$ у виразі (22)

призводить до того, що потужність, яка витрачається на подачу при роботі з відрізними абразивними армованими кругами, є незначною.

Таким чином, отримані основні залежності для визначення величини навантаження та місця його прикладання при роботі відрізними абразивними армованими кругами з урахуванням особливостей та умов їх роботи.

Виведені співвідношення дають змогу більш детально досліджувати процеси різання робочих середовищ, механізм спрацювання інструменту, його міцнісні параметри та теплофізичні процеси, а також обґрунтовано підійти до вибору та проектування відрізними кругами та їх приводів.

[1] Обладнання для монтажних робіт: Підручник / Ю.Д. Абрашкевич, Л.Є. Пелевін, В.П. Рашківський . – К.: КНУБА, 2016. – 232 с.

[2] Абрашкевич Ю.Д., Пелевін Л.Є., Мачишин Г.М. Зменшення енергетичних витрат при різанні металопрокату на монтажних ділянках. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2017. – № 2. – С. 43–46.

[3] Дослідження теплових процесів в абразивному армованому крузі при різанні металопрокату / Ю. Абрашкевич, Г. Мачишин, О. Човнюк, Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини / Всеукр. зб. наук. праць. – К.: КНУБА, – 2017. – Вип. 90. – С. 59–66.

[4] Ю.Д. Абрашкевич, Г.М. Мачишин, В.П. Тишковець. Вплив зовнішніх факторів на ефективне використання абразивного інструмента // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 2. – С. 44–47.

Надійшла 15.07.2019 р.