

Т.О. Танцура, О.М. Коробочка, О.І. Білоус

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В МАТЕРІАЛІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА

Анотація. Статтю присвячено висвітленню питань дослідження розподілу напружень в матеріалі шліфувального круга при дії на нього нормальної та дотичної сили. Встановлено, що напружений стан шліфувального круга зумовлений сумісною дією нормального та дотичного навантажень може визначатися складанням напружень.

Ключові слова: напруження, шліфування, нормальна та дотична сила.

Вступ

Шліфування займає значне місце в металообробці. Знос шліфувального круга відбувається в наслідок циклічного механічного, теплового навантаження шліфувальних кристалів. Періодичне навантаження кристалів призводить до циклічно змінного напруженого стану самих кристалів та матеріалу, що їх оточує. Термін руйнування (кількість циклів навантажень) з'єднання кристалів з матеріалом залежить від ряду причин, серед яких і величини сил навантаження кристалів, характер циклів зміни навантажень. Руйнування поверхневого шару шліфувального круга забезпечує появу на ній нових різальних кромок замість зношених. Системне дослідження напружень в матеріалі шліфувального круга та встановлення оптимальних умов руйнування робочого шару шліфувального круга та зносу різальних кромок – актуальна науково-технічна задача.

Найбільш повну класифікацію видів зносу абразивних матеріалів розробили Т. Н. Лоладзе і Р. В. Бокучава [1]. Вони запропонували класифікацію видів зносу абразивних матеріалів і розробили методи експериментальних досліджень властивостей абразивів, показали, що для раціональних умов роботи, абразивний матеріал повинен бути достатньою міцним та зносостійким. При недостатній міцності різальної частини вона руйнується. Відбуваються сколювання і викришування поверхневих шарів матеріалу абразиву. Доцент Д.Г. Му-

зичка [2] досліджувала ефективність шліфування твердих сплавів спрямованими обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів з урахуванням їх навантажень. Питання встановлення напруженого стану матеріалу шліфувального круга, зумовленого прикладеними силами не вивчалось. В роботі [3] розроблена просторова модель напружено-деформованого стану в якій кристал абразивного матеріалу утримується системою дискретних елементів циліндричної форми. В статті [4] досліджено вплив величин передніх кутів шліфувальних зерен на напружений стан окремо взятого кристалу. При дослідженні враховували його форму та орієнтацію в тілі інструмента. Взаємодію кристалу абразивного матеріалу з матеріалом, що з'єднує окремі зерна поміж собою не враховували.

Постановка задачі дослідження

Розглянемо розподіл напружень в матеріалі шліфувального круга при дії на нього нормальної та дотичної сили. Відцентрові сили враховувати не будемо. Їх вплив, на нашу думку, достатньо вивчено. Прийнемо наступну фізичну модель шліфувального круга та його навантаження. Круг уявляє собою пружний циліндр виготовлений з ізотропного матеріалу. Внутрішній діаметр циліндра нерухомо приєднаний до оправки. На зовнішню циліндричну поверхню круга діють рівномірно розподілені по ширині та дузі нормальна сила тиску та дотичне навантаження. Напружений стан круга – плоский. Зовнішній та внутрішній радіуси круга позначимо літерами r_0 та R . Віднесемо круг до полярної система координат. Відповідно до прийнятої фізичної моделі, маємо наступні граничні умови:

$$\begin{aligned} \text{а) по поверхні } r &= r_0 \\ r_r &= r_\beta = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \text{б) по поверхні } r &= R \\ R_r &= \begin{cases} 1 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} \leq \beta \leq \frac{\delta}{2} \\ 0 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} > \beta > \frac{\delta}{2} \end{cases} \end{aligned} \tag{2}$$

для випадку нормального навантаження,

$$R_\beta = \begin{cases} 1 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} \leq \beta \leq \frac{\delta}{2} \\ 0 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} > \beta > \frac{\delta}{2} \end{cases} \text{ для випадку дотичного навантажен-$$

ня (3)

де δ – кут дуги контакту шліфувального круга з матеріалом.

Рішення поставленої задачі

Розподіл напружень в крузі визначимо з використанням функції напружень (функції Ері) $\phi(r, \beta)$ [5].

$$\phi(r, \beta) = B_0\beta + A \ln(r) + Br^2 \ln(r) + Cr^2 + (B_1r^3 + C_1r^{-1} + D_1r \ln(r)) \cos(\beta) - \frac{2D_1}{1-\mu} r\beta \sin(\beta) + (A_m r^m + B_m r^{m+2} + C_m r^{-m} + D_m r^{-m+2}) \cos(m\beta).$$
(4)

де $B_0, A, B, B_1, C_1, D_1, A_m, B_m, C_m, D_m$ - невідомі сталі; μ - коефіцієнт Пуассона; $m = 2, 3, \dots$ – ціле число.

Напруження для прийнятої функції.

$$Br(r, \beta) = B_0r^{-2} + (2B_1r + 2C_1r^{-3} + D_1r^{-1}) \sin(\beta) - (A_m r^{m-2} (1-m) - B_m r^m (1+m) + C_m r^{-m-2} (1+m) - D_m r^{-m} (1+m)) m \sin(m\beta).$$
(5)

$$Rr(r, \beta) = Ar^{-2} + B(2 \ln(r) + 1) + 2Cr + (2B_1r + 2C_1r^{-3} + D_1r^{-1}) \cos(\beta) + \left(A_m r^m (1-m) + B_m r^m (m+2-m^2) - C_m r^{-m-2} (m(1+m)) + D_m r^{-m} (-m+2-m^2) \right) \cos(m\beta).$$
(6)

$$B\beta(r, \beta) = Ar^{-2} + B(2 \ln(r) + 3) + 2Cr + (6B_1r + 2C_1r^{-3} + D_1r^{-1}) \cos(\beta) + \left(A_m r^{m-2} (m(m-1)) + B_m r^m (m+2)(m+1) + C_m r^{-m-2} m(m+1) + D_m r^{-m} (m-2)(m-1) \right) \cos(m\beta).$$
(7)

Відносні деформації за відомих значень напружень.

$$\varepsilon_{\beta\beta}(r, \beta) = \frac{1}{E} \left[\begin{aligned} & \left(Ar^{-2}(1 + \mu) + B((2 \ln(r) + 1)\mu - 2 \ln(r) + 3) - 2C(1 - \mu) \right) + \\ & \left(2B_1r(\mu - 3) - 2C_1r^{-3}(1 + \mu) - D_1r^{-1}(1 - \mu) \right) \cos(\beta) \end{aligned} \right]^+ + \\ & \left[\begin{aligned} & \left(A_m r^{m-2} m(1 - m)(1 + \mu) + \right. \\ & \left. + B_m r^m \left((m + 2 - m^2)\mu - ((m + 2)^2 - m - 2) \right) - \right. \\ & \left. - C_m r^{-m-2} m(1 + m)(1 + \mu) + \right. \\ & \left. + D_m r^{-m} \left((-m + 2 - m^2)\mu - ((2 - m)^2 + m - 2) \right) \right) \cos(m\beta) \end{aligned} \right] \cdot \quad (8)$$

$$\varepsilon_{rr}(r, \beta) = \frac{1}{E} \left[\begin{aligned} & \left(Ar^{-2}(1 + \mu) + B((2 \ln(r) + 1)\mu - 2 \ln(r) + 3) - 2C(1 - \mu) + \right) + \\ & \left(2B_1r(1 - 3\mu) - 2C_1r^{-3}(1 + \mu) + D_1r^{-1}(1 - \mu) \right) \cos(\beta) \end{aligned} \right]^+ + \\ & \left[\begin{aligned} & \left(A_m r^{m-2} m(1 - m)(1 + \mu) + \right. \\ & \left. + B_m r^m \left((m + 2 - m^2) - ((m + 2)^2 - m - 2)\mu \right) - \right. \\ & \left. - C_m r^{-m-2} m(1 + m)(1 + \mu) + \right. \\ & \left. + D_m r^{-m} \left((-m + 2 - m^2) - ((2 - m)^2 + m - 2)\mu \right) \right) \cos(m\beta) \end{aligned} \right] \cdot \quad (9)$$

Переміщення в крузі відповідно до (7) мають наступний вигляд.

$$u_r = \int \varepsilon_{rr} dr + f(\beta), \quad (10)$$

$$u_\beta = \int (r\varepsilon_{\beta\beta} - u_r) d\beta + f(r). \quad (11)$$

Аналіз залежностей (10, 11) показав, що для прийнятої функції (4) умова нерозривності деформацій виконується коли

$$f(\beta) = f(r) = 0.$$

Нормальне навантаження прикладене до поверхні круга симетричне. Напружено-деформований стан симетричний. Напружено-деформований стан, зумовлений дотичним навантаженням, антисиметричний. Для аналізу напружень в обох випадках достатньо визначити напруження для симетричної або антисиметричної частини. Для шліфувального круга із зовнішнім та внутрішнім радіусами 40мм та 20мм значення напружень в симетричній (антисиметричній) частинах наведені на рисунках 1 та 2. Графіки на рисунку 1 побудовані для

випадку прикладення нормальної розподіленої сили на дузі в 10 (гранична умова 2). В позначеннях напружень на це вказують індекси п.

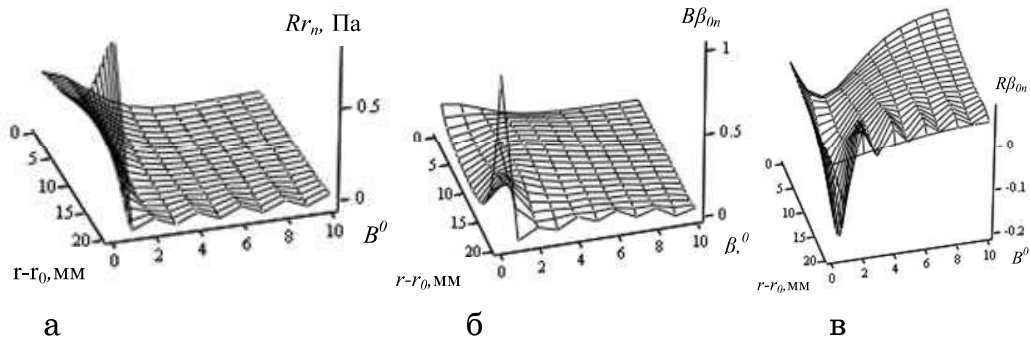


Рисунок 1 – Розподіли напружень в матеріалі шліфувального круга навантаженого розподіленою нормальною силою

Графіки б та в побудовані для напружень віднесених до максимальних напружень, зумовлених радіальним навантаженням (Rr_n). Рисунок 1 засвідчує локальність збурень напруженого стану, зумовленого згаданим навантаженням. В об'ємах матеріалу, що розташовані ближче до внутрішнього отвору в крузі, різниця напружень зменшується, але вони залишаються не рівномірно розподіленими. При цьому максимальні нормальні колові напруження близькі за значеннями до відповідних нормальних радіальних напружень, дотичні значно (в п'ять разів) менші. Інший характер розподіл напружень викликає дотичне навантаження (рис.2).

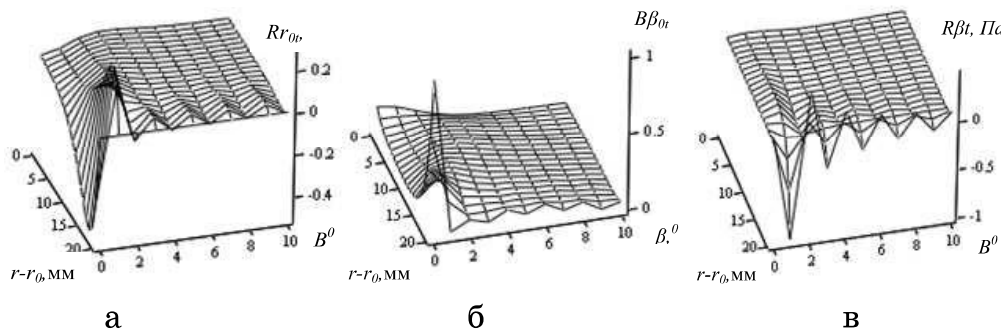


Рисунок 2 – Графіки розподілу напружень в матеріалі шліфувального круга навантаженого дотичною розподіленою силою

На графіках а та б (рис. 2) напруження показані віднесеними до максимального нормального напруження, зумовленого дотичним навантаженням. Останнє призводить до появи антисиметричних колових нормальних напружень (рис.2 б). Відповідно, і до напружень відриву кристалів абразиву від матеріалу, в якому кристали розташо-

вані. Максимальні значення таких напружень значно (понад ніж у три рази) перевищують значення максимальних дотичних напружень, обумовлених дією прикладених розподілених сил. Такі напруження, на нашу думку, більше за інші впливають на вирив кристалів з абразивного матеріалу.

На кристал, під час його взаємодії з матеріалом деталі діють обидві проаналізовані навантаження. Одночасність та періодичність їх дії в одному і тому самому обсязі матеріалу – по поверхні взаємодії матеріалу з кристалом зумовлює циклічну зміну напруженого стану матеріалу, що зв'язує кристали в шліфувальному крузі. Коефіцієнт асиметрії вказаного циклу залежить від значень нормальних колових напружень, що виникають в матеріалі шліфувального круга при одночасній дії на кристали радіального та дотичного навантаження. Він визначається відношенням

$$l = \frac{\max V\beta_n + \max V\beta_t}{\max V\beta_n + \min V\beta_t}.$$

Кількість циклів взаємодії кристалів з матеріалом до їхнього граничного зносу значно менша за 106.. Відповідно витривалість матеріалу, за такої кількості навантажень до руйнування, має розглядатися як витривалість з малою кількістю навантажень та з асиметричним циклом зміни напружень. Раціональна витривалість матеріалу, що утримує кристали в шліфувальному крузі при дії змінних колових нормальних напружень з асиметричним циклом навантажень, має дорівнювати кількості циклів взаємодії кристалів з матеріалом деталі до досягнення граничного зносу їх різальних кромки.

Розглянута нами задача лінійна. Напружений стан шліфувального круга, зумовлений сумісною дією нормально та дотичного навантажень, може визначатися складанням напружень. Отримані результати можуть бути поширені на шліфувальні круги інших діаметрів.

Висновки

Дотичне навантаження циліндричної поверхні шліфувального круга призводить до появи напружень стискання та відриву. Такі напруження більше за інші впливають на вирив кристалів з матеріалу, що їх зв'язує – на витривалість системи кристал – матеріал, що зв'язує кристали. Витривалість матеріалу за малої кількості циклів навантажень при дії симетрично змінних колових нормальних на-

пружень має перевищувати кількість циклів за яких відбувається допустимий знос різальних кромки кристалів. Подальшим напрямком системних досліджень напруженого стану матеріалу шліфувального круга доцільно вважати розподіл напружень в біля окремого кристалу в системі матеріал що зв'язує – кристал та дослідження показників витривалості матеріалу шліфувального круга, включно по поверхні адгезійного зв'язку кристала з матеріалом, при малій кількості циклів навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новоселов Ю.К. Знос абразивных зерен в круге при шлифовании заготовок / Ю.К. Новоселов, В.Б. Богуцкий, // «ВЕСТНИК СевНТУ серия «Машиноприладобудування та транспорт» – 2012. – Вып. 128. – С. 228 – 237.
2. Музичка Д.Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованими обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів [Текст] : автореф. дис. на здобуття канд. техн. наук.: спец. 050301 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Музичка Діана Геннадіївна; Чернігівський нац. технологічний університет. – Чернігов, 2015 – 20, [1] с., включ. обкл.: іл., табл. – Бібліограф.: с. 17–18.
3. Ушаков А.Н. Разработка модели напряженного-деформированного состояния «абразивное зерно – связка» /А.Н. Ушаков // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №42(1085). –С.59-65.
4. Коротков В.А. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зерен /В.А. Коротков// Обработка металлов. – 2014. – №2 (63). –С.62-77.
5. Рекач В.Г. Руководство к решению задач по теории упругости: учебное пособие для вузов. Изд. 2 / В.Г. Рекач – М.: Высшая школа, 1977. – 216 с.