

УДК 621.923

## ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ ПІД ЧАС ПРАВКИ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА АЛМАЗНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Я. О. ШАХБАЗОВ<sup>1</sup>, В. В. ШИРОКОВ<sup>1</sup>, Р. А. ЯЦЮК<sup>2</sup>,  
Т. В. ОЛЯНИШЕН<sup>3</sup>, О. В. МЕЛЬНИКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Українська академія друкарства, Львів;

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Національний лісотехнічний університет України, Львів;

<sup>4</sup> ІТ СТЕП Університет, Львів

На основі моделювання напружень розглянуто технологічні умови забезпечення різальних властивостей шліфувальних кругів за чорнового і чистового шліфування під час їх правки алмазним інструментом методом точіння. Теоретично проаналізовано силову взаємодію кристала алмаза з абразивним зерном зі встановленням напружень у контактній системі абразивне зерно–кристал алмаза. Створено моделі еквівалентних напружень за теорією максимальних нормальних напружень. Розглянуто теоретичні аспекти моделювання напружень в ударній системі абразивне зерно–кристал алмаза із врахуванням контактної міцності матеріалу зерна.

**Ключові слова:** моделювання, шліфування, шліфувальний круг, кристал алмаза, правка круга, напруження.

Technological conditions for ensuring cutting properties of grinding wheels in the operations of rough and finishing grinding during their dressing with a diamond tool by turning based on the stress modeling, are considered. Theoretical analysis of the force interaction of a diamond crystal with an abrasive grain was carried out. Models of equivalent stresses values were created according to the theory of maximum normal stresses. Theoretical aspects were considered for stress modeling in the impact system of abrasive grain–diamond crystal taking into account the contact strength of grain material.

**Keywords:** modeling, grinding, grinding wheel, diamond crystal, dressing of a wheel, stress.

**Формулювання завдання.** Одним з ефективних методів обробки деталей у машинобудуванні на чорнових і чистових операціях є шліфування за швидкості різання 40...110 м/с. Ефективність процесу забезпечують здебільшого станом робочої поверхні інструменту, а саме шліфувального круга [1–4]. Щоб забезпечити різальні властивості шліфувальних кругів, необхідно встановити напруження, які виникають у контактній системі кристал алмаза–абразивне зерно під час крихкого руйнування їх робочих поверхонь. Слід відзначити, що загальні закономірності стійкості та руйнування матеріалів розглянуті у фундаментальних наукових роботах, зокрема у працях [5, 6]. Там розглянули часткову задачу забезпечення різальних властивостей шліфувальних кругів на різних операціях шліфування, дослідивши механіку руйнування їх робочої поверхні під час правки алмазним інструментом.

Відомо, що для чорнового шліфування, де основною вимогою є продуктивне зрізання припуску з поверхні заготовки деталі, робоча поверхня шліфувального

круга має мати високі різальні властивості. Під час шліфування самозагострювання кругів є бажаним явищем та досягається збільшенням глибини шліфування або значним притисканням круга до заготовки, що призводить до руйнувань зерен і зв'язки круга та зростання відстані між зернами на робочій поверхні. За напівчистового та чистового шліфування у режимі самозагострювання шліфувального інструменту малу шорсткість обробленої поверхні отримати неможливо.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомо [1–3], що для чистового шліфування режим правки має передбачати мінімальне руйнування робочої поверхні шліфувального круга, що можна досягти неповним руйнуванням абразивних зерен, коли їх частина залишиться на робочій поверхні і різатиме матеріал. Тоді буде мінімальна відстань між зернами на робочій поверхні шліфувального круга, що сприятиме формуванню якісних параметрів обробленої поверхні. Оскільки мікроруйнування абразивних зерен під час формування рельєфу призводить до значного зменшення радіуса при вершині зерна, то можна очікувати полегшення стружкоутворення та поліпшення якості обробленої поверхні.

Залежно від характеру руйнування абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга визначають ступінь різальних властивостей його робочої поверхні та придатність до шліфування.

Під час ударного контактування абразивне зерно круга знаходиться в складному напруженому стані, оскільки в зоні контакту, крім нормальних навантажень, діють дотичні. Згідно з розрахунками [7], дотичні навантаження разом з нормальними, значно збільшують напруження в низці точок площі контакту. Показано [7] досить добру збіжність експерименту з розрахунком за теорією максимальних нормальних напружень.

Мета роботи – теоретично проаналізувати правку шліфувальних кругів на керамічній зв'язці однокристальним алмазним інструментом для моделювання закономірності утворення контактних напружень під час взаємодії абразивного зерна та кристала алмаза.

Для цього моделювали в ударній системі абразивне зерно–кристал алмаза із врахуванням контактної міцності матеріалу абразивного зерна; встановили механізм крихкого руйнування абразивного зерна однокристальним алмазним інструментом за правки шліфувального круга методом точіння.

**Обґрунтування та опис обраної методики.** Визначено напруження за спільної дії нормальних і дотичних навантажень на підставі положень, одержаних у праці [7]. Найнебезпечнішою за напруженнями є точка на межі площі контакту. Побудовано рівняння напружень, які викликані нормальними і дотичними зусиллями. Зокрема, для колової площі контакту компоненти напружень, спричинених нормальними зусиллями, визначаємо так:

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(0)} &= \left( -(1-y^2)^{1/2} + \frac{1-2\mu}{3y^2} \left( 1 - (1-y^2)^{3/2} \right) \right) \sigma_k; \\ \sigma_y^{(0)} &= \left( -2\mu(1-y^2)^{1/2} - \frac{1-2\mu}{3y^2} \left( 1 - (1-y^2)^{3/2} \right) \right) \sigma_k.\end{aligned}\quad (1)$$

де  $y$  – координата дії максимальних напружень по осі  $OY$ ;  $\mu$ ,  $\sigma_k$  – коефіцієнт Пуассона та контактна міцність матеріалу абразивного зерна, відповідно.

Компоненти напружень, які викликані дотичними зусиллями, визначаємо залежностями:

$$\sigma_x^{\text{II}} = k \frac{3\pi}{8} \mu Y \sigma_k; \quad \sigma_y^{\text{II}} = k \frac{\pi}{8} (4 + \mu) Y \sigma_k, \quad (2)$$

де  $k = P_t / P_n$ ,  $P_t$  – тангенціальні зусилля,  $P_n$  – нормальне зусилля.

Сумарні напруження розтягу досягають максимуму при  $Y = -1$  [4].

Для напружень за осями  $OX$  і  $OY$ :

$$\sigma_1 = \sigma_X = \sigma_x^{(0)} + \sigma_x''; \quad \sigma_3 = \sigma_Y = \sigma_y^{(0)} + \sigma_y''. \quad (3)$$

Інші компоненти напруження дорівнюють нулю. Знаючи значення компонентів напружень  $\sigma$  для заданих умов, визначаємо еквівалентні за теорією максимальних нормальних напружень  $\sigma_{EV} = \sigma$  для крихкого матеріалу абразивного зерна круга. Для даного (колоподібного) типу контакту формули (3) при  $\mu = 0,15$  мають вигляд

$$\sigma_X = \left( 0,2333 + 0,1766 \frac{P_t}{P_n} \right) \sigma_k; \quad \sigma_Y = \left( -0,2333 + 0,16290 \frac{P_t}{P_n} \right) \sigma_k. \quad (4)$$

Значення сил  $P_t$  і  $P_n$  визначаємо згідно з працею [5]:

$$P_n = \frac{8 \pi r_1 \sigma_k h (r_1 + r_2 - h)}{9 \left( r_1 + r_2 - \frac{2}{3h} \right)}; \quad (5)$$

$$P_t = \frac{8}{9} \pi r_1 \sigma_k h \left( \frac{2h}{3(r_1 + r_2)} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Враховуючи, що глибина правки  $h$  значно менша радіусів абразивного зерна  $r_1$  і кристала алмаза  $r_2$ , з рівнянь (5) і (6) встановимо співвідношення  $P_t / P_n$  [8, 9] у вигляді

$$\frac{P_t}{P_n} = \left( \frac{2h}{3(r_1 + r_2)} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Використавши у рівняннях (4) співвідношення сил за виразом (7), можна встановити моделі напружень, які виникають за правки шліфувального круга алмазним однокристальним інструментом:

$$\begin{aligned} \sigma_X &= \left( 0,2333 + 0,1766 \left( \frac{2h}{3(r_1 + r_2)} \right)^{1/2} \right) \sigma_k; \\ \sigma_Y &= \left( -0,2333 + 0,16290 \left( \frac{2h}{3(r_1 + r_2)} \right)^{1/2} \right) \sigma_k. \end{aligned} \quad (8)$$

Значні зміни силових функцій за контактного руйнування крихких матеріалів, до яких належать матеріали абразивних зерен, відбуваються за внутрішнього розриву у глибині матеріалу абразивного зерна внаслідок впливу кристала алмаза на фіксовану площу контакту (радіуса  $a$ ). Причиною таких розривів є утворення зони напружень розтягу у глибині матеріалу. Максимальні напруження, спрямовані перпендикулярно осі тиску, можна визначити залежністю [10]

$$\sigma_y = 0,75 \left( 2(1 + \mu_1) \left( 1 - \frac{z}{a} \arctg \frac{a}{z} \right) - \frac{a^2}{(z^2 + a^2)} \right) \sigma_k, \quad (9)$$

де  $z$  – глибина зони руйнування, яка утворюється за дії сили вздовж вертикальної осі  $OZ$ .

Графічний аналіз рівняння (9) показав (рис. 1), що глибина  $z$  точки, в якій напруження розтягу максимальні, відповідає залежності

$$z = 1,58a. \quad (10)$$

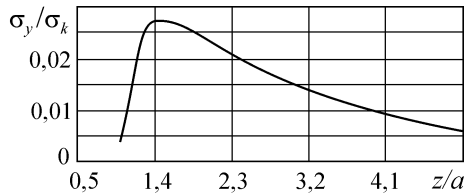


Рис. 1. Вплив співвідношення  $z/a$  на напруження згідно з рівнянням (9).

Fig. 1. Influence of  $z/a$  on stress according to equation (9).

Згідно з виразом (10), глибину зони руйнування визначають радіусом контактної площини  $a$ , який залежатиме від розміру кристала алмаза. Тоді з'являється можливість керувати глибиною зони руйнування вибором відповідного розміру кристала алмаза і ефективністю руйнування абразивного зерна.

Після підстановки виразу (10) в (9) такі напруження можна пов'язати з контактними так:

$$\sigma_y = 0,0274\sigma_k. \quad (11)$$

Розрив матеріалу абразивного зерна відбудеться при  $\sigma_B = \sigma_y$ , що відповідає контактній міцності матеріалу зерна

$$\sigma_k = 36,5\sigma_B. \quad (12)$$

Відомо, що контактна міцність матеріалів є достовірною характеристикою оцінки опірності крихких пружних матеріалів за ударного руйнування [10]. Тому використання цього критерію (12) дає можливість одержувати достовірніші технологічні параметри створення різального рельєфу шліфувальних кругів алмазними інструментами.

За рівняннями (8) розраховано еквівалентні напруження для реальних технологічних умов правки шліфувальних кругів алмазним однокристальним інструментом методом точіння:  $h = 0,01...0,04$  mm;  $r_1 = 0,08...0,2$  mm;  $r_2 = 0,1...0,7$  mm. Розрахунки показали, що максимальні еквівалентні напруження на периферії площі контакту між абразивним зерном і кристалом алмаза становлять 580...605 N/mm<sup>2</sup>, що є набагато меншим за контактну міцність матеріалу ( $\sigma_k = 2555$  N/mm<sup>2</sup>) та зумовлює мікроруйнування абразивних зерен. Тому можна вважати, що крихке макроруйнування абразивних зерен відбувається внаслідок утворення тріщин по нормалі до площини контакту.

На основі аналізу продуктів руйнування встановили ступінь руйнування робочої поверхні шліфувального круга за правки однокристальним алмазним інструментом методом точіння, а саме, що значна кількість частинок є з розмірами меншими в 5–12 разів порівняно з вихідними абразивними зернами.

Наведені (рис. 2) зображення продуктів руйнування, які отримані за сталої поздовжньої подачі інструменту та різних глибин правки шліфувального круга на керамічній зв'язці 14A40CM2K5 7 ПП 350×40×76. Згідно з ними, зі збільшенням глибини правки розміри продуктів руйнування зростають. Якщо за глибини  $h = 0,005$  і 0,02 mm вони в десятки разів менші за абразивні зерна, то при  $h = 0,05$  mm в деяких випадках вони наближаються до їх розмірів.

Але морфологія продуктів руйнування різна, що пояснюємо закономірностями руйнування крихких неметалевих матеріалів та невідповідності глибини взаємодії контактуючих тіл до розміру зруйнованої частинки. За характером руйну-

вання абразивних зерен спостерігали на одиничних абразивних зернах, визначали їх субмікроруйнування (рис. 3).

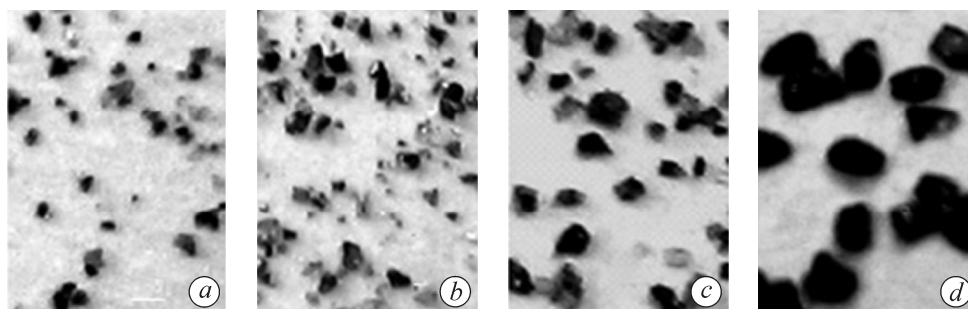


Рис. 2. Продукти руйнування поверхневого шару шліфувального круга:  
 $a - h = 0,005$  mm;  $b - 0,02$  mm;  $c - 0,05$  mm;  $d -$  зернистість 40 ( $\times 20$ ).

Fig. 2. Products of fracture of a grinding wheel surface layer :  
 $a - h = 0.005$  mm;  $b - 0.02$  mm;  $c - 0.05$  mm;  $d -$  granularity 40 ( $\times 20$ ).



Рис. 3. Зруйновані поверхні кристалів електрокорунду нормального алмазним олівцем:  
 $a -$  субмікроруйнування зерна,  $h = 0,005$  mm;  
 $b -$  мікроруйнування зерна,  $h = 0,02$  mm;  
 $c -$  макроруйнування зерна,  $h = 0,05$  mm ( $\times 20$ ).

Fig. 3. Fractured surfaces of electrocorundum crystals by a normal diamond pencil:  
 $a -$  submicrofracture of grain,  $h = 0.005$  mm;  
 $b -$  microfracture of grain,  $h = 0.02$  mm;  
 $c -$  macrofracture of grain,  $h = 0.05$  mm ( $\times 20$ ).

Таким чином, враховуючи результати спостережень за продуктами руйнування і поверхнею абразивних зерен, вважаємо, що руйнуванням абразивних зерен можна керувати.

**Обговорення результатів.** Під час правки шліфувального круга алмазним інструментом методом точіння на периферії площі контакту між абразивним зерном і кристалом алмаза утворюються максимальні еквівалентні напруження, які набагато менші за контактну міцність матеріалу абразивного зерна. Моделювання за еквівалентними напруженням дало змогу встановити, що вони можуть викликати мікроруйнування абразивних зерен по периферії контакту кристал алмаза–абразивне зерно. Крихке макроруйнування абразивних зерен відбувається внаслідок утворення тріщин по осі, нормальній до площини контакту, але при цьому необхідно враховувати контактну міцність матеріалу абразивного зерна.

Результати експериментальних досліджень за продуктами руйнування і поверхнею абразивних зерен дають підставу вважати, що за створеними моделями можна встановити технологічні параметри керування руйнуванням робочої поверхні шліфувальних кругів при їх правці алмазним інструментом на різних стадіях шліфування.

## ВИСНОВКИ

На підставі закономірностей ударного крихкого руйнування в системі кристал алмаза–абразивне зерно–зв’язка при правці шліфувальних кругів на керамічній зв’язці алмазним інструментом методом точіння встановлені напруження за спільної дії нормальних і дотичних навантажень в ударній контактній системі кристал алмаза–абразивне зерно та максимальні еквівалентні напруження, які утворюються на периферії площі контакту між абразивним зерном і кристалом алмаза і є набагато меншими за контактну міцність матеріалу абразивного зерна. Моделювання за еквівалентними напруженням показало, що вони можуть викликати мікроруйнування абразивних зерен по периферії контакту кристал алмаза–абразивне зерно.

1. *Кремнев Г. П., Ница А. Н., Соколов В. Ф.* Повышение эффективности процесса шлифования при правке абразивных шлифовальных кругов // Информ. технологии в образовании, науке и производстве. – 2015. – № 3 (8). – С. 233–238.
2. *Schwarz K. E.* Zerspanungsvorgänge und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding // J. of Manufacturing Sci. and Eng. – 2001. – **123**. – P. 319–324.
3. *Мурашкин С. В.* Повышение эффективности шлифования за счет правки шлифовальных кругов с применением ультразвуковых колебаний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01; Тольяттинский гос. ун-т. – Ульяновск, 2006. – 18 с.
4. *Яцюк А. И.* Новый способ механической обработки древесины. – Львов: Вища школа, 1975. – 256 с.
5. *Механика разрушения и прочность материалов:* Справ. пос.: в 4 т. / Под общей ред. В. В. Панасюка. – Т. 1: Основы механики разрушения материалов / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
6. *Механіка руйнування:* довідн. пос. / Під ред. З. Т. Назарчука. – Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. – Львів: ФМІ НАН України, 2001. – 1138 с.
7. *Коровчинский М. В.* Распределение напряжений в окрестности локального контакта упругих тел при одновременном действии нормальных и касательных сил в контакте // Машиностроение. – 1967. – № 6. – С. 85–96.
8. *Королев А. В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 192 с.
9. *Шахбазов Я. О.* Керування робочою поверхнею шліфувальних кругів. – Львів: Фенікс, 1998. – 136 с.
10. *Соколинский В. Б.* Машины ударного разрушения. – М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.

Одержано 28.05.2021