

УДК 621.923.02

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРАВКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ АЛМАЗНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Я. О. ШАХБАЗОВ¹, В. В. ШИРОКОВ¹, Х. Б. ВАСИЛІВ², В. О. ФЕДОРОВИЧ³

¹ Українська академія друкарства, Львів;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Правку шліфувальних кругів на керамічній зв'язці методом точіння алмазними інструментами подано у вигляді ударної системи. Отримано часові та силові характеристики взаємодії "абразивне зерно-кристал алмаза" як ударної контактної системи, за якими визначили силу удару, яка передається пружній основі і визначає її напружений стан. Результати теоретичних розробок підтверджені експериментальними дослідженнями, зокрема, розмірним аналізом продуктів руйнування робочої поверхні шліфувального круга та її лазерним скануванням після правки за різними режимами.

Ключові слова: правка, ударна система, контактна міцність, часові характеристики удару, руйнування зерен, лазерне сканування, відносна опорна поверхня.

The cutting process of grinding wheels with ceramic bonding by means of diamond tools is presented as a shock system, which uses the method of turning. The time and power characteristics of the shock contact system "abrasive grain-diamond crystal" are obtained, which determine the magnitude of the impact force, that is passed to the elastic base and causes its stressed state. The results of theoretical developments are confirmed by experimental studies, in particular, by dimensional analysis of the fracture products of the working surface of the grinding wheel and its laser scanning after correction by different regimes.

Keywords: renovation, impact system, contact strength, time characteristics of impact, laser scanning of grains, relative bearing surface.

Вступ. Здебільшого у дрібносерійному і ремонтному виробництвах правку шліфувальних кругів виконують методом точіння алмазними інструментами. Час, упродовж якого відбувається взаємне контактування крихких зерен шліфувального круга та кристала алмаза, незначний і становить $10^{-7} \dots 10^{-8}$ s [1, 2]. Вважають, що це надто малий період дії навантаження, внаслідок чого хімічні реакції чи молекулярні переміщення не є визначальними чинниками, щоб впливати на руйнування абразивних зерен робочої поверхні шліфувального круга під час його правки. Обґрунтованішими є висновки, що суттєву роль за такої швидкої силової взаємодії елементів системи відіграє механічне руйнування [1–8].

Руйнування крихких матеріалів всесторонньо, з урахуванням теоретичних та експериментальних напрацювань, описано раніше [4–7]. Закономірно, що правку шліфувального круга алмазним інструментом розглядають в умовах ударного контакту між двома пружними елементами системи, а саме, кристал алмаза-абразивне зерно. Вперше [4, 7] в статичі і динаміці зроблена спроба розрахунку глибин правки методом точіння однокристалним алмазним інструментом для встановлення ступеня руйнування робочої поверхні круга. Однак ці дослідження не враховують такі важливі для ударних процесів аспекти, як контактна міцність матеріалу абразивного зерна та обмеженість у часі контактних явищ. Тому вони

не дають можливості встановити ступінь руйнування робочої поверхні шліфувального круга залежно від умов правки та теоретично розраховувати та призначати режими правки шліфувальних кругів на операціях шліфування. Таким чином, роботи, спрямовані на дослідження правки шліфувальних кругів з врахуванням його динамічних особливостей, актуальні з теоретичного і практичного погляду.

У статистичі розглядають теоретичні аспекти взаємодії абразивних зерен з кристалом алмаза інструмента під час правки шліфувального круга [4]. Слід відзначити, що результати цих досліджень є основними в теоретичних розробках, але не дають змоги врахувати динаміку процесу, вплив швидкості і глибини взаємодії кристала алмаза й абразивного зерна на характер руйнування робочої поверхні шліфувального круга. Якщо абразивні зерна руйнуються за їх безпосереднього контакту з кристалом алмаза, то закономірності руйнування зв'язки шліфувального круга, де відсутній безпосередній контакт з ним, пов'язують зі стискувальними напруженнями у системі кристал алмаза–абразивне зерно [4]. Таким чином, можна зробити висновок, що управління ступенем руйнування робочої поверхні шліфувальних кругів під час правки можна досягти обмеженням концентрації контактної навантаження в межах абразивного зерна або передачею її до зв'язки шліфувального круга, що дасть змогу впливати на шорсткість обробленої поверхні під час шліфування. Такі фізичні умови залежать від співвідношення між основними параметрами удару, періоду руйнування абразивного зерна та проходження ударної хвилі крізь абразивне зерно. Тому важливо на основі теоретичних підходів встановити технологічні умови управління характером руйнування робочої поверхні шліфувальних кругів під час правки алмазним інструментом для ефективного обробки деталей машин на різних операціях шліфування.

Мета роботи – теоретично проаналізувати правку шліфувальних кругів на керамічній зв'язці однокристалним алмазним інструментом для визначення фізичних параметрів процесу та встановлення технологічних можливостей управління ним.

Для досягнення цього вирішували такі задачі: теоретичний аналіз взаємодії кристала алмаза з абразивним зерном з встановленням фізичних параметрів ударної контактної системи для визначення технологічних умов руйнування робочої поверхні шліфувального круга під час правки; моделювання розрахункових залежностей фізичних параметрів правки; експериментальні дослідження для перевірки запропонованих теоретичних рекомендацій.

Методики досліджень. Крихке руйнування поверхневого шару шліфувального круга відбувається під дією миттєвих сил [4], при цьому можливими його різновидами можуть бути: субмікро-, мікро- або макроруйнування зерна шліфувального круга та руйнування його зв'язки.

Отримана [8] залежність контактної міцності (σ_c) матеріалу абразивного зерна від границі його міцності на розтяг (σ_s) дає змогу визначити максимальне зусилля (P) на контактній площі системи кристал алмаза–абразивне зерно

$$P = \frac{8 \pi r \sigma_c h (r_1 + r_2 - h)}{9 r_1 + r_2 - 2/3h}, \quad (1)$$

де r_1 та r_2 – радіуси абразивного зерна і кристала алмаза, відповідно; r – приведений радіус контактувальних поверхонь кристала алмаза та абразивного зерна; h – глибина правки.

За зусиллям P можна встановити початок крихкого руйнування абразивного зерна у вигляді [8]

$$T_1 = \frac{1,25}{V} \left(\frac{P}{K_1} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

де V – швидкість правки; K_1 – коефіцієнт контактної системи [5, 7, 8]:

$$K_1 = \frac{4}{3 \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \left(\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

де E_1 і E_2 – модулі пружності, а μ_1 і μ_2 – коефіцієнти Пуассона матеріалу абразивного зерна і кристала алмаза, відповідно.

Тут амплітудну характеристику імпульсу зусилля правки, яка проходить крізь зерно і діє на зв'язку круга, визначаємо за рівнянням [8]

$$P_c = 8\pi r \sigma_c h e^{-(\varphi T)} / 9. \quad (4)$$

Коефіцієнт часу φ в залежності (4) можна встановити з рівняння [5, 8]

$$\varphi = K_2 / (F \sqrt{E_1 \rho_1}), \quad (5)$$

де K_2 – коефіцієнт у контактній системі абразивне зерно–зв'язка шліфувального круга; F – площа контакту абразивного зерна зі зв'язкою, а ρ_1 – густина матеріалу абразивного зерна.

За лінійного зміщення зв'язки коефіцієнт K_2 визначаємо з праці [5] у вигляді

$$K_2 = 4E r_k / (3(1-\mu_1^2)), \quad (6)$$

де E – модуль пружності матеріалу зв'язки шліфувального круга, r_k – радіус площі контакту абразивного зерна зі зв'язкою.

Період T передачі ударної хвилі абразивним зерном від площини контакту з кристалом алмаза до зв'язки шліфувального круга (чисельник в залежності) встановлюємо, враховуючи швидкість хвилі (звуку) (знаменник) в матеріалі зерна у вигляді

$$T_z = (2r_1 - h) / \sqrt{E_1 / \rho_1}. \quad (7)$$

Тут найбільші напруження стиску у зв'язці знаходимо за залежністю [8]

$$\sigma_c = \frac{3P e^{-\varphi T}}{2\pi r_1^2 \left(1 - (1 - a_h / r_1)^3 \right)} \left(\left(1 + \frac{V_p}{V_c} \right)^2 \right)^{1/3}. \quad (8)$$

З урахуванням залежності (4)

$$\sigma_c = \frac{4}{3} \frac{\sigma_c h e^{-\varphi T}}{r_1 \left(1 - (1 - a_h / (2r_1))^3 \right)} \left(\left(1 + \frac{V_p}{V_c} \right)^2 \right)^{1/3}, \quad (9)$$

де a_h – глибина проникнення абразивного зерна в зв'язку; V_p та V_c – об'єми пор і зв'язки шліфувального круга, відповідно.

Розглянемо як приклад теоретичний розрахунок фізичних показників процесу правки шліфувального круга на керамічній зв'язці середньої структури і твердості з електрокорунду нормального, зернистістю 25 алмазним однокристальним інструментом із середньостатистичним радіусом $r_2 = 0,25$ mm за швидкості $V = 40$ m/s і глибини правки $h = 0,01$ mm.

За рівнянням (1) контактне зусилля $P = 5,1$ N, а початок крихкого руйнування зерна (2) із врахуванням залежності (3) відбувається за $T_1 = 4,5 \cdot 10^{-8}$ s.

Аналіз теоретичних розрахунків за залежністю (1) і отриманих експериментально результатів показав їх розбіжність у межах 8...10%, що можна вважати допустимим для технічних завдань. Отже, одержані за рівнянням (1) зусилля правки можна використовувати в теоретичних розрахунках.

У цьому випадку амплітудна характеристика імпульсу зусилля, який проходить крізь абразивне зерно і діє на зв'язку, становить $P_c \approx 0,3$ N (4) за коефіцієнта часу $\varphi = 2,42 \cdot 10^7$ s⁻¹ і часу $T_2 = 6,4 \cdot 10^{-8}$ s. Максимальні напруження стиску, які

утворюються в зв'язці, обчислені за рівнянням (9), становлять $\sigma_c \approx 20 \text{ N/mm}^2$, що (не враховуючи контактну міцність матеріалу зв'язки) у 4–5 разів нижче границі міцності керамічної зв'язки шліфувального круга на стиск. За глибини правки $h = 0,03 \text{ mm}$ напруження стиску за рівнянням (8) наближаються до границі міцності зв'язки, що може викликати руйнування зв'язки круга, але, якщо врахувати її контактну міцність, то руйнування малоімовірно.

Таким чином, можна прогнозувати, що внаслідок меншого навантаження зв'язки, руйнування поверхневого шару шліфувального круга відбувається здебільшого на абразивних зернах.

Достовірнішу інформацію про характер руйнування поверхневого шару шліфувального круга під час його правки можна одержувати аналізом продуктів руйнування на відповідних технологічних режимах. Під час його правки алмазним олівцем відбирали порції продуктів руйнування, які містять зв'язку і дроблені абразивні зерна. Потім цю порцію обробляли в плавиковій кислоті для розчинення зв'язки, після чого зерна промивали і висушували для ситового аналізу. Отримані частинки просіювали через стандартні сита на вібраційному пристрої з розміром отвору, що відповідає розміру абразивного зерна, після чого встановлювали набір контрольних сит у діапазоні від 40 до 200 μm . Для визначення маси абразивних частинок використовували електронну вагу з точністю до 0,001 г. Для кожної проби здійснювали 5 експериментів і обчислювали середнє значення показника.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати експериментальних досліджень про ступінь руйнування робочої поверхні шліфувального круга під час правки глибиною h однокристальним алмазним інструментом з $r_1 = 0,25 \text{ mm}$ методом точіння одержали на основі розмірного аналізу продуктів руйнування та їх візуального спостереження під мікроскопом.

За результатами розмірного аналізу (див. таблицю) продукти руйнування містять незначну кількість зерен основної зернистості. Водночас виявлено велику кількість дрібних зерен, які в шліфувальному крузі відсутні. У продуктах руйнування значну кількість становлять частинки з розмірами, в десятки разів меншими, ніж вихідний склад абразивних зерен. У межах глибини правки $h = 0,01 \dots 0,03 \text{ mm}$ суттєвої кількісної зміни продуктів руйнування не спостерігали.

Результати розмірного ситового аналізу продуктів руйнування після правки шліфувального круга 14A25CM2K5 ПП 300×40×76 за поздовжньої подачі $S_f = 0,13 \text{ mm/turn}$

Розмір частинок, μm	Середнє значення з 5 спостережень						Зерно 25, %
	$V = 18 \text{ m/s};$ $h = 0,01 \text{ mm}$		$V = 18 \text{ m/s};$ $h = 0,03 \text{ mm}$		$V = 27 \text{ m/s};$ $h = 0,03 \text{ mm}$		
	$m, \text{ g}$	%	$m, \text{ g}$	%	$m, \text{ g}$	%	
315	–	–	–	–	–	–	9,65
250	–	–	–	–	–	–	57,54
200	1,278	6,4	1,377	6,9	2,235	11,2	28,26
160	2,818	14,1	2,963	14,8	3,040	15,1	4,55
125	2,760	13,8	2,841	14,2	3,278	16,4	
100	2,538	12,7	2,438	12,4	2,581	12,9	
80	2,263	11,3	2,420	12,1	2,218	11,1	
63	2,019	10,1	2,342	11,7	1,690	8,5	
50	1,943	9,7	1,819	9,1	1,439	7,2	
40	1,736	8,7	1,680	8,4	1,970	9,9	
< 40	2,521	12,6	1,960	9,6	1,232	6,1	

Результати візуального спостереження за продуктами руйнування показали різноманітність їх форми, що пояснюємо закономірностями руйнування крихких неметалевих матеріалів.

За відомої характеристики шліфувального круга залежність (9) дає змогу встановити значення поперечної подачі алмазного правлячого інструмента, що забезпечує глибину правки, для управління руйнуванням робочого поверхневого шару шліфувальних кругів та їх різальними властивостями на різних операціях шліфування. Таким чином, результати ситового аналізу продуктів руйнування та візуальних спостережень дають підставу вважати, що руйнуванням робочої поверхні шліфувальних кругів можна керувати під час їх правки алмазним інструментом методом точіння.

Щоб остаточно встановити вплив глибини правки на ступінь руйнування робочої поверхні шліфувального круга та його придатність для застосування на різних операціях шліфування, за сприяння спеціалістів Магдебурзького технічного університету дослідили 3D моделі (рис. 1) різального рельєфу робочої поверхні шліфувальних кругів на сканувальному приладі "Perthometer S8P" з лазерним давачем моделі FOCODYN. Діапазон його вертикальної роздільної здатності $\pm 250 \mu\text{m}$, що цілком достатньо для вимірювання висотних параметрів рельєфу робочої поверхні кругів зернистістю 16...40 та опорної поверхні круга.

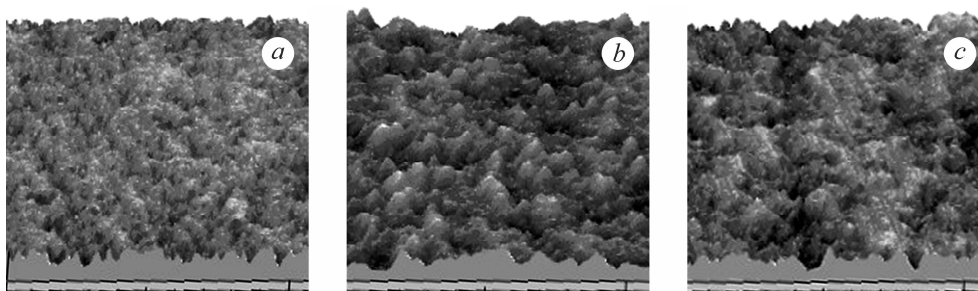


Рис. 1. 3D модель рельєфу робочої поверхні шліфувального круга зернистістю 25 після правки: *a* – при $h = 0,005 \text{ mm}$; *b* – $0,01 \text{ mm}$; *c* – $0,03 \text{ mm}$.

Fig. 1. 3D model of a relief of a working surface of grinding circle with a number of grains 25 after correction: *a* – at $h = 0.005 \text{ mm}$; *b* – 0.01 mm ; *c* – 0.03 mm .

Аналіз реплік рельєфу робочої поверхні абразивного круга показує, що під час його формування відбувається крихке руйнування основної маси зерен, тобто його параметри суттєво відрізняються від рельєфу спрацьованого круга. Як бачимо (рис. 1), зі збільшенням глибини правки ступінь руйнування робочої поверхні шліфувального круга різний, що впливатиме на кількість робочих зерен, а отже, на шорсткість обробленої поверхні. За результатами лазерного сканування робочої поверхні шліфувального круга отримані відносні опорні поверхні. Вони характеризуються кількістю абразивних зерен, які контактують з обробленою поверхнею за різних глибин правки (рис. 2).

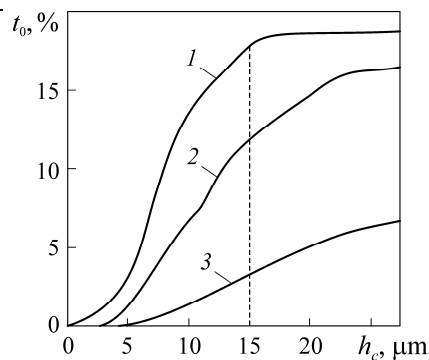
З рис. 2 можна визначити, що, наприклад, для перерізу при $h_c = 15 \mu\text{m}$ за $h = 0,005 \mu\text{m}$ відносна опорна поверхня $t_p \approx 18\%$; за $h = 0,01 \mu\text{m}$ – $t_p \approx 12\%$, а за $h = 0,03 \mu\text{m}$ – $t_p \approx 3,5\%$. Зростання опорної поверхні пояснено збільшенням кількості робочих зерен, що спричиняє зниження шорсткості обробленої поверхні деталі під час шліфування, та підтверджено експериментальними дослідженнями, згідно з працею [9].

Під час правки шліфувального круга його зв'язці передається частина сили удару, що зумовлює суттєво менші напруження, які не викликають руйнування зв'язки круга, тому можна керувати його різальними властивостями, змінюючи

ступінь руйнування абразивних зерен кристалом алмаза правлячого інструмента. Для цього в теоретичних дослідженнях необхідно враховувати контактну міцність матеріалу абразивного зерна та часові характеристики ударної контактної системи абразивне зерно–кристал алмаза, за якими можна визначити силу удару, яка передається зв'язці круга. Це дозволяє встановити її напружений стан та закономірності руйнування робочої поверхні шліфувальних кругів на різних операціях шліфування. Що нижчий ступінь руйнування робочої поверхні шліфувального круга, то вона менш розвинена і нижча шорсткість обробленої поверхні під час шліфування, чого і вимагає обробка на чистових операціях.

Рис. 2. Закономірності зміни відносної опорної робочої поверхні шліфувального круга зернистості 25 за глибиною по січній площині за різних глибин правки:
1 – $h = 0,005$ mm; 2 – 0,01 mm; 3 – 0,03 mm.

Fig. 2. Regularities of change of the relative bearing working surface of the grinding wheel with a number of grains 25 by the depth on the cutting plane at different depths of correction:
1 – $h = 0,005$ mm; 2 – 0,01 mm; 3 – 0,03 mm.



ВИСНОВКИ

На підставі отриманих закономірностей ударного крихкого руйнування в системі кристал алмаза–абразивне зерно–зв'язка під час правки шліфувальних кругів на керамічній зв'язці алмазним інструментом методом точіння встановлено важливі параметри ударної системи, зокрема, його часові та силові характеристики, які обґрунтовані і визначені теоретично; початок крихкого руйнування абразивного зерна та закономірності зростання інтенсивності сили удару і передачі її зв'язці круга, а також її напружений стан. Розмірний аналіз та спостереження за продуктами руйнування, а також лазерне сканування робочої поверхні шліфувального круга, дають підставу вважати, що правка методом точіння здебільшого відбувається внаслідок крихкого руйнування абразивних зерен.

1. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 304 с.
2. Zahedi A., Azarhoushanq B., and Krajnik P. An analytical force and surface roughness model for cylindrical grinding of brittle materials // Int. J. of Abrasive Technol. – 2017. – 8, № 2. – P. 157–170.
3. Кремнев Г. П., Ніца А. Н., Соколов В. Ф. Підвищення ефективності процесу шліфування при правці абразивних шліфувальних кругів // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – 2015. – № 3 (8). – С. 233–238.
4. Schwarz K. E. Zerspanungsvorgänge und Schleiferggebnis beim Abrichten von Grinding // J. of Manufacturing Sci. and Eng. – 2001. – 123. – P. 319–324.
5. Соколинский В. Б. Машины ударного разрушения. – М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
6. Мурашкин С. В. Повышение эффективности шлифования за счет правки шлифовальных кругов с применением ультразвуковых колебаний: Автореф. дис. ... к. т. н. – Ульяновск, 2006. – 18 с.
7. Резников А. Н., Сандлер В. А. Исследование условий разрушения зерен шлифовального круга при правке // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 43–47.
8. Шахбазов Я. О. Керування робочою поверхнею шліфувальних кругів. – Львів: Фенікс, 1998. – 136 с.
9. Shakhbazov Ya. O., Shyrokov V. V., and Fedorovych V. O. Specifying the process parameters for diamond dressing of grinding wheels // J. of Superhard Materials. – 2019. – 41, № 4. – P. 272–277.

Одержано 14.03.2022