**ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ
ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ**

Я. О. Шахбазов, В. В. Широков, О. О. Паламар, А. Б. Коломієць

*Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна*

Проведений аналіз використовуваних способів правки шліфувальних кругів алмазними інструментами. Встановлено, що серед відомих способів правки найбільше застосування на всіх типах виробництва має простий і універсальний метод — точіння алмазними інструментами, який потрібно зарахувати до процесів високошвидкісного руйнування крихкого матеріалу робочої поверхні шліфувального круга. Наведені загальні витрати шліфувальних кругів при їх правці показали, що втрати шліфувальних кругів становлять переважну частину корисного їх обсягу. Аналіз демонструє, що режим правки і вид інструмента визначають не тільки стійкість шліфувального круга, а й коефіцієнт його корисного використання. Зазначено, що забезпечення шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні передбачає створення упорядкованого рельєфу на робочій поверхні шліфувального круга. Створення упорядкованого рельєфу можливе мікроруйнуванням абразивних зерен при правці шліфувального круга алмазним інструментом. У такому разі керування характером руйнування робочої поверхні шліфувальних кругів забезпечується крихким мікроруйнуванням або макроруйнуванням абразивних зерен та руйнуванням самої зв'язки круга у процесі контактної взаємодії в системі кристал алмазу—абразивне зерно—зв'язка шліфувального круга.

Зазначено, що в процесі правки шліфувальних кругів алмазним інструментом методом точіння робочий шар шліфувального круга руйнувався переважно по зернах, що дає змогу керувати ступенем їх руйнування та якістю обробленої поверхні під час шліфування.

Ключові слова: шліфування, шліфувальний круг, абразивні зерна, способи правки, алмазний олівець, шорсткість, мікроруйнування, макроруйнування, період зростання сили удару.

Постановка проблеми. Процеси шліфування, які характеризуються значними тепловиділенням, потужністю і силами, потребують від інструмента високої теплостійкості, твердості, хімічної стійкості та водостійкості. Усі ці властивості притаманні шліфувальним (абразивним) кругам на керамічній зв'язці. Забезпечення необхідної точності та якості обробленої поверхні шліфуванням можливо за стабільності експлуатаційних характеристик абразивних кругів, що досягається як вибором характеристики круга, точністю геометричних розмірів і форми, так і рельєфом його робочої поверхні, який утворюється при правці [1, 2, 3].

Сьогодні формування різального рельєфу шліфувальних кругів механічними методами виконується їх правкою точінням з використанням алмазних інструментів, шліфуванням алмазними й абразивними кругами, обкочуванням безалмазними й алмазними інструментами. Серед відомих методів найбільше застосування на всіх типах виробництва має простий і універсальний метод — точіння алмазними інструментами.

Спосіб правки шліфувальних кругів точінням став можливим завдяки високій твердості та зносостійкості алмазних інструментів. Під час правки шліфувального круга способом точіння відбувається миттєве руйнування крихкого абразивно-керамічного матеріалу кристалом алмаза. У процесі правки кристал алмаза сколює абразивні зерна й зв'язку круга, створює нерівні поверхні. Радіальна складова сили, яка утворюється в процесі правки, невелика і не спричиняє помітних пружних деформацій, які впливають на точність профілю круга. Завдяки простоті конструкції і надійності в роботі інструментів та пристосувань і високій якості метод точіння застосовується на всіх операціях шліфування.

Під час вибору технологічних умов правки враховують вимоги, які ставляться до процесу шліфування, — це забезпечення високої різальної здатності шліфувального круга і продуктивності на операціях чорнового шліфування, або зменшення шорсткості обробленої поверхні при необхідній точності геометричних розмірів на операціях чистового шліфування, чи одночасне поліпшення усіх параметрів. Така характеристика процесу шліфування досягається лише примусовим створенням відповідного рельєфу правкою робочої поверхні шліфувального круга.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження [1, 3, 5] доводять, що процес правки шліфувальних кругів на керамічній зв'язці алмазними інструментами потрібно зарахувати до процесів високошвидкісного руйнування крихкого матеріалу. Водночас можливі такі види крихкого руйнування поверхневого шару шліфувального круга (рис. 1) [1, 4]: субмікроруйнування абразивного зерна; мікроруйнування зерна під дією сил стиску; об'ємне руйнування зерна, коли воно поділяється на окремі частини і випадає зі зв'язки; виривання цілого зерна зі зв'язки.

Рис. 1. Основні види крихкого руйнування поверхневого шару шліфувальних кругів:

а — субмікроруйнування зерна; б — мікроруйнування зерна;
в — макроруйнування зерна; з — виривання зерна зі зв'язки

Стійкість шліфувальних кругів залежить від величини знятого при правці абразивно-керамічного шару з їхньої робочої поверхні алмазним інструментом [2, 3, 5].

Загальна мінімальна товщина шару, що видаляється при правці, досягає $h_n = 15\text{--}100$ мкм. Для відновлення різальних властивостей круга зернистістю 40 пропонується видаляти шар завтовшки $0,05\text{--}0,07$ мм, а круга зернистістю 16 — шар завтовшки $0,03\text{--}0,04$ мм [5].

Результати досліджень, виконаних у праці [5] при круглому шліфуванні загартованих сталей, показали, що достатній шар абразивно-керамічного матеріалу, що видаляється при формуванні рельєфу з робочої поверхні круга на керамічній зв'язці зернистістю 16, 25, 40 і твердістю CM2 – C2 становить $0,020\text{--}0,035$ мм.

За рекомендаціями, поданими у праці [5], при чистовому шліфуванні необхідно й достатньо видалити з шліфувального круга шар завтовшки $(0,2\text{--}0,25)d$, де d — середній діаметр абразивного зерна.

У практиці шліфування товщина шару, що видаляється з робочої поверхні абразивного круга при правці методом точіння, коливається в широких межах: від $0,02\text{--}0,04$ мм — на операції внутрішнього шліфування, до $0,2\text{--}0,4$ мм — при плоскому шліфуванні, а іноді — до $0,8$ мм. Товщина шару, що видаляється, звичайно визначається експериментально і переважно залежить від досвіду шліфувальника.

Практика шліфування [5] показує, що втрати шліфувального круга (табл. 1) при правці становлять від 40 % до 80 %, а в деяких випадках досягають до 90–95 % корисного його обсягу. Тому частота правки і вид інструмента визначають не тільки стійкість шліфувального круга, а й коефіцієнт його корисного використання.

Таблиця 1

Витрати на правку шліфувальних кругів

Вид шліфування	Матеріал, що обробляють	Час формування рельєфу в % від основного часу	Витрати на правку, %
Напівчистове шліфування	Сталь 45 (загартована)	50	30–40
Чистове шліфування	Сталь 45 (загартована)	10	5–8
	P9Ф5 (загартована)	50	60–70

У публікаціях [5, 6] автори на основі узагальнення практичного досвіду результатів досліджень навели основні параметри режимів правки шліфувальних кругів алмазними олівцями способом точіння. Зокрема, для деяких видів шліфування пропонуються такі режими (табл. 2). Як видно з наведених даних, зазначені рекомендації не враховують основних параметрів, якими є зернистість шліфувального круга та розмір кристала алмаза правлячого інструмента.

Таблиця 2

Режими правки шліфувальних кругів алмазними олівцями методом точіння

Вид шліфування	Шорсткість обробленої поверхні <i>Ra</i> , мкм	Поздовжня подача, м/хв	Поперечна подача, мм / подв. хід				Кількість робочих проходів без подачі
			Чорнова обробка		Чистова обробка		
			Подача	Кількість проходів	Подача	Кількість проходів	
Кругле зовнішнє на прохід	0,8	0,3–0,4	0,02–0,03	2–3	0,01	1–2	–
	0,4	0,2–0,3			0,01		1
	0,2	0,1–0,2			0,01		1–2
	0,1	0,05–0,1			0,005		1–2
Внутрішнє	0,8	2–3	0,02–0,03	2–4	0,01	1–2	1–2
	0,4	1–2			0,005		2–3
Плоске	0,8	0,6–0,8	0,02–0,03	2–3	0,01	1–2	1
	0,4	0,4–0,6			0,01		1–2
	0,2	0,2–0,4			0,005		1–2

У працях [4, 5, 6] подаються дані про вплив зернистості та твердості абразивного круга, розміру алмазного кристала інструмента для формування рельєфу на стан робочої поверхні шліфувального круга і параметри обробленої поверхні.

Мета статті — встановити умови забезпечення ефективності процесу обробки деталей машин на різних операціях шліфування за допомогою правки шліфувальних кругів при оптимальних технологічних режимах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз досліджень, наведених у працях [1, 4], показує значний вплив на характер руйнування поверхневого шару шліфувального круга на керамічній зв'язці глибини взаємодії кристала алмаза й абразивного зерна, а також швидкості їх взаємодії при правці. Зі збільшенням глибини взаємодії відбувається глибше руйнування робочої поверхні абразивного круга, що призводить до підвищення шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні. Правку шліфувальних кругів алмазними однокристалними інструментами можна представити як процес утворення на робочій поверхні круга гвинтового рівчака. Дію алмазного інструмента, що врізається в робочу поверхню шліфувального круга, можна розглядати як процес нарізання різьби на токарному верстаті (рис. 2) із числом ниток на абразивному зерні чи проходів алмаза по абразивному зерну, що в кінцевому підсумку впливає на шорсткість шліфованої поверхні. Тому для зниження шорсткості обробленої поверхні в процесі шліфування необхідно зменшити висоту і крок нерівностей рельєфу на робочій поверхні шліфувального круга, тобто глибину й поздовжню подачу алмазного інструмента.

Забезпечення шорсткості обробленої поверхні під час шліфування передбачає створення упорядкованого рельєфу на робочій поверхні шліфувального круга. Також створення упорядкованого рельєфу можливе за умови мікроруйнування абразивних зерен. Лише за таких умов видалення шару абразивно-керамічного матеріалу

з робочої поверхні шліфувального круга можливе досягнення упорядкованого рельєфу на його робочій поверхні та забезпечення шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні. Як показують дослідження [1, 2, 4], різновиди зняття шару абразивно-керамічного матеріалу з поверхні шліфувального круга при правці алмазним інструментом залежать від поперечної подачі алмазного інструмента.

Для забезпечення упорядкованого рельєфу та неперервності формування рельєфу робочої поверхні шліфувального круга алмазним інструментом методом точіння необхідно вибрати величину поздовжньої подачі алмазного інструмента за розміром контакту кристала алмаза з кругом, що відповідає розміру $S = AB$ (рис. 2) при глибині правки шліфувального круга h .

Рис. 2. Технологічна схема правки шліфувального круга алмазним олівцем методом точіння

Тому величину поздовжньої подачі при правці шліфувального круга визначаємо із залежності $S = 2\sqrt{2\rho_s h - h^2}$, де ρ_s — радіус вершини кристала алмаза правлячого інструмента.

Отже, процес утворення шорсткості шліфованої поверхні не є випадковим процесом, а має закономірний характер, та при відповідному виборі технологічних параметрів процесу правки шліфувального круга алмазним інструментом можна забезпечити стабільну шорсткість обробленої поверхні у межах 90...95 % кількості деталей у партії з незагартованої та загартованої сталі без використання процесу виходжування.

На операціях чорнового шліфування, де основною вимогою є продуктивне зрізання припуску з поверхні заготовки, режим правки шліфувального круга має забезпечувати високу розвиненість робочої поверхні. Цього можна досягти крихким макроруйнуванням абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга на керамічній зв'язці та руйнуванням самої зв'язки круга за рахунок вибору технологічних режимів процесу правки методом точіння алмазним інструментом. Макроруйнування абразивних зерен та руйнування зв'язки круга призводять до збільшення відстані між різальними зернами, що полегшує процес різання з товстими стружками, переваги яких відомі в практиці обробки. В цьому випадку шорсткість обробленої поверхні при шліфуванні та продуктивність процесу будуть максимальними.

Правка шліфувальних кругів на керамічній зв'язці в режимах макроруйнування абразивних зерен або руйнування зв'язки круга не може забезпечувати малу шорсткість обробленої поверхні при напівчистовому і чистовому шліфуванні деталей машин, причиною чому є зменшення кількості різальних зерен на робочій поверхні шліфувального круга. Тому, при високих вимогах до шорсткості обробленої поверхні в процесі шліфування на цих операціях правку шліфувального круга необхідно виконувати з мінімальним руйнуванням його робочої поверхні, чого можна досягти вибором її технологічних режимів, при яких забезпечується мікроруйнування абразивних зерен. Це у свою чергу викликає зменшення радіуса при вершині зерна [4], покращення енергетичних показників процесу різання при шліфуванні та інших якісних параметрах обробленої поверхні.

Якщо руйнування самих абразивних зерен відбувається при їх безпосередньому контакті з кристалом алмаза, то закономірності руйнування зв'язки шліфувального круга, де немає контакту з кристалом алмаза, потрібно пов'язати з проходженням ударної хвилі крізь абразивне зерно. У такому випадку керування характером руйнування робочої поверхні шліфувальних кругів можна досягти обмеженням концентрації контактного навантаження в межах абразивного зерна або передачею її до зв'язки шліфувального круга.

Вирішення цієї проблеми залежить від співвідношення між такими основними параметрами удару, як періоди тріщиноутворення та проходження ударної хвилі крізь абразивне зерно [1, 9].

Максимальну ударну силу між кристалом алмаза й абразивним зерном визначаємо із залежності [1, 7, 8]

$$P_{\max} = K^{2/5} (1,25MV^2)^{3/5}, \quad (1)$$

де K — коефіцієнт жорсткості удару [8], M — приведена маса співударних елементів абразивного зерна і кристала алмаза, V — швидкість шліфувального круга.

Виразимо у залежності (1) кількість руху (MV) через імпульс сили (PT), що діє на абразивне зерно в процесі контактування з алмазом. Після розв'язку цієї залежності відносно сили отримаємо

$$P_{\max} = 1,4K(TV)^{3/2}, \quad (2)$$

де T — тривалість удару між абразивним зерном і кристалом алмаза [8].

Із залежності (2) знаходимо період зростання сили удару у вигляді залежності (3), за якого забезпечується відповідний характер руйнування зерна абразивного круга в процесі правки шліфувального круга

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

У залежностях (1) та (2) значення сили відповідає характерові руйнування абразивного зерна. Наприклад, для випадку: за середньостатистичних радіусів абразивного зерна $r_1 = 0,1$ мм і кристала алмаза $r_2 = 0,2$ мм та швидкості шліфування $V = 40$ м/с (матеріалом абразивного зерна є електрокорунд) коефіцієнт жорсткості [8] буде становити $K = 3 \times 10^{-8}$ Н/м². Якщо вважати силу макроруйнування абразивного зерна $P = 20$ Н [9], то розрахункове значення моменту початку

тріщиноутворення, що визначається залежністю (3), становить приблизно $T = 4 \times 10^{-9}$ с; період же проходження ударної хвилі крізь абразивне зерно з полюса руйнування до вільної поверхні дорівнює $T_g = 6,67 \times 10^{-9}$ с. Як видно з цього розрахунку, ударне навантаження, головним чином, витрачається на руйнування абразивного зерна. На зв'язку ж шліфувального круга діють незначна частина сили та імпульс післяударного навантаження. Період мікроруйнування зерна, очевидно, буде ще меншим. Отже, в процесі правки шліфувальних кругів алмазним інструментом методом точіння робочий шар шліфувального круга буде руйнуватися переважно по зернах, що дає змогу керувати ступенем їх руйнування, за рекомендаціями публікації [9], якістю обробленої поверхні та продуктивністю шліфування.

Висновки. На основі проведених досліджень встановлені закономірності формування упорядкованого рельєфу на робочій поверхні шліфувальних кругів при їх правці алмазним інструментом методом точіння. Створення упорядкованого рельєфу можливе мікроруйнуванням абразивних зерен при правці шліфувального круга алмазним інструментом. Зазначено, що в процесі правки шліфувальних кругів алмазним інструментом методом точіння робочий шар шліфувального круга руйнується переважно по зернах. Це дає змогу керувати ступенем їх руйнування та ефективністю процесу шліфування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Резников А. Н., Сандлер В. А. Исследование условий разрушения зерен шлифовального круга при правке. *Сверхтвердые материалы*. 1981. № 2. С. 43–47.
2. Кремнев Г. П., Ница А. Н. (США), Соколов В. Ф. Повышение эффективности процесса шлифования при правке абразивных шлифовальных кругов. *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві*. 2015. № 3 (8). С. 233–238.
3. Schwarz K. E. Zerspanungsvorgänge und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2001. Vol. 123. P. 319–324.
4. Шейко М. Н., Лавринова Е. С., Чеповецкий И. Х. Влияние режимов правки абразивных кругов алмазными роликами на шероховатость поверхности деталей при врезном шлифовании. *Сверхтвердые материалы*. 1992. № 1. С. 38–39.
5. Прогрессивные методы правки абразивных кругов / под ред. В. И. Пилинского. Киев: Техника, 1985. 112 с.
6. Романов В. Ф., Авакян В. В. Технология алмазной правки шлифовальных кругов. Москва: Машиностроение, 1980. 118 с.
7. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара. Москва: Наука, 1977. 224 с.
8. Шахбазов Я. О. Керування робочою поверхнею шліфувальних кругів. Львів: Фенікс, 1998. 136 с.
9. Шахбазов Я. О., Широков В. В., Широков О. В., Паламар О. О. Технологічне забезпечення процесу шліфування. *Поліграфія і видавнича справа*. 2018. № 1 (75). С. 75–81.

REFERENCES

1. Reznikov, A. N., & Sandler, V. A. (1981). Issledovanie uslovii razrusheniia zeren shlifovalnogo kruga pri pravke: Sverkhтвердые материалы, 2, 43–47 (in Russian).

2. Kremnev, G. P., Nitca, A. N. (SShA), & Sokolov, V. F. (2015). Povyshenie effektivnosti protsessa shlifovaniia pri pravke abrazivnykh shlifovalnykh krugov: Informatsiini tekhnologii v osviti, nautci ta virobnitctvi, 3 (8), 233–238 (in Russian).
3. Schwarz, K. E. (2001). Zerspanungsvorgange und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding: Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, 319–324 (in German).
4. Sheiko, M. N., Lavrinova, E. S., & Chepovetckii, I. Kh. (1992). Vliianie rezhimov pravki abrazivnykh krugov almaznymi rolikami na sherokhovatost poverkhnosti detalei pri vreznom shlifovanii: Sverkhтвердые материалы, 1, 38–39 (in Russian).
5. Progressivnye metody pravki abrazivnykh krugov / pod red. Pilinskogo V. I. (1985). Kiev: Tekhnika (in Russian).
6. Romanov, V. F., & Avakian, V. V. (1980). Tekhnologiya almaznoi pravki shlifovalnykh krugov. Moskva: Mashinostroenie (in Russian).
7. Panovko, Ia. G. (1977). Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara. Moskva: Nauka (in Russian).
8. Shakhbazov, Ya. O. (1998). Keruvannia robochoiu poverkhneiu shlifovalnykh kruhiv. Lviv: Feniks (in Ukrainian).
9. Shakhbazov, Ya. O., Shyrokov, V. V., Shyrokov, O. V., & Palamar, O. O. (2018). Tekhnologichne zabezpechennia protsesu shlifuvannia: Polihrafiia i vydavnycha sprava, 1 (75), 75–81 (in Ukrainian).

doi: 10.32403/1998-6912-2019-1-58-11-19

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL CONDITIONS OF THE GRINDING PROCESS EFFECTIVENESS

Ya. O. Shakhbazov, V. V. Shyrokov, O. O. Palamar, A. B. Kolomiets

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
shah-nika@ukr.net*

An analysis has been carried out for the methods used to make grinding wheels with diamond tools. It has been determined that among the known methods of setting the greatest application for all types of production has a simple and universal method – turning by diamond tools, which should be pertained to the processes of high-speed destruction of the brittle material of the working surface of the grinding wheel. The given general waste of grinding wheels while their setting showed that the losses of grinding wheels makes up greater part of their useful volume. The analysis has shown that the mode of setting and the type of tool determines not only the stability of the grinding wheel, but also the rate of its useful use. It has been noted that ensuring the necessary roughness of the treated surface during grinding involves creating an ordered relief on the working surface of the grinding wheel. The creation of ordered relief is possible by micro-destruction of abrasive grains while setting of a grinding wheel by a diamond

tool. In the case, the control of the destruction nature of the working surface of the grinding wheels can be achieved by limiting the contact load concentration within the abrasive grain or transferring it to the grinding wheel's bond. It has been shown that the solution of the problem depends on the ratio between the impact main parameters, such as the periods of crack formation and the shock wave passage through the abrasive grain. The research has demonstrated that in the process of grinding wheels' setting by the method of diamond turning, the working layer of the grinding wheel breaks mainly in grains, what allows controlling the degree of their destruction and the quality of the treated surface while grinding.

Keywords: *grinding, grinding wheel, abrasive grains, methods of setting, diamond pencil, roughness, micro-destruction, macro-destruction, period of increase of impact force.*

Стаття надійшла до редакції 26.02.2019

Received 26.02.2019