

В.І. Марчук, д.т.н., проф.  
Л.М. Равенець, асист.  
Ештеїві Абдулсалам Мусбах, аспір.  
Луцький національний технічний університет

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ ПЕРЕРИВЧАСТИМИ ШЛІФУВАЛЬНИМИ КРУГАМИ

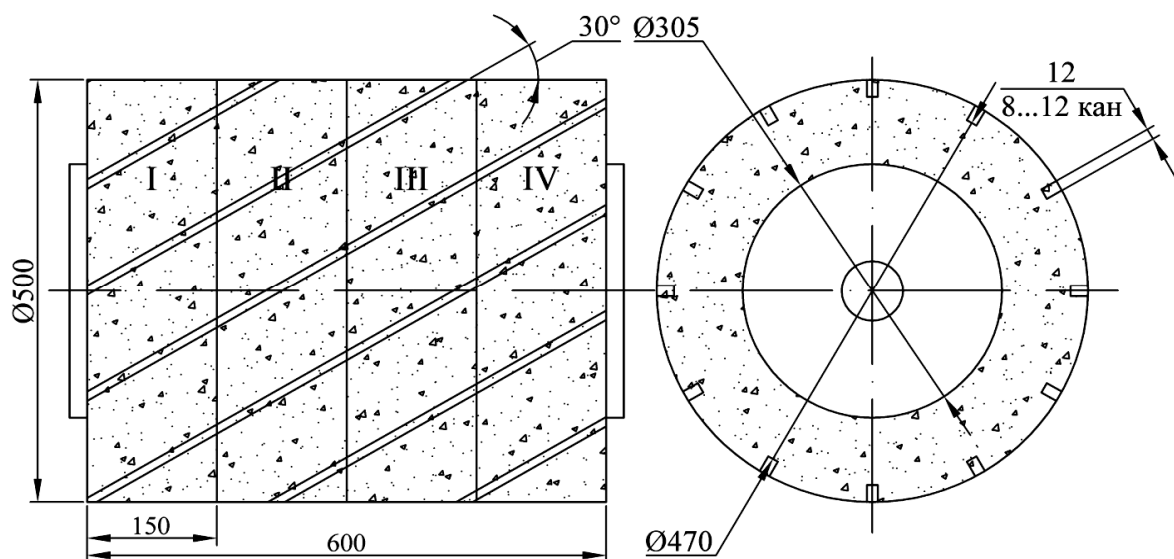
Експериментальне шліфування зразків зі сталі ШХ15 переривчастим шліфувальним інструментом показало, що поверхні мають значно одноріднішу структуру, ніж після оброблення суцільним шліфувальним кругом.

Управління процесом безцентрового шліфування за величиною тангенціальної сили різання є перспективним способом усунення температурних дефектів і підвищення ефективності процесу в цілому. Створення шліфувального інструменту, що реалізує даний принцип управління процесом, може призвести до корисних практичних результатів та супроводжуватись значним економічним ефектом.

**Ключові слова:** різальний інструмент; температурні дефекти; безцентрове шліфування; переривчасті круги.

**Постановка проблеми.** Вдосконалення технологічної операції безцентрового шліфування поверхонь обертання зовнішніх кілець роликів підшипників досить часто супроводжується виникненням підвищених температур і, як наслідок, появою температурних дефектів – місцеві припалювання, внутрішні напруження та мікротріщини.

З метою запобігання такого негативного явища запропоновано використання на безцентрово-шліфувальних операціях переривчастих шліфувальних кругів з гвинтовим розміщенням канавок, схема такого круга показана на рисунку 1.



№ абразивного диска	Зернистість	
	Чорнове шліфування	Напівчистове шліфування
I	80	63
II	63	40
III	32	25
IV	25	25

Рис. 1. Шліфувальний переривчастий круг з похилими різучими виступами  
(кількість канавок  $E=12$ )

Характерною особливістю такого круга є те, що він складається з чотирьох окремих секцій, з'єднаних між собою за допомогою центрального вала і бокових планшайб. Кожна з секцій має різне значення зернистості абразиву, що дає змогу керувати параметрами шорсткості шліфованої поверхні.

**Постановка питання.** На етапі технологічного проектування операцій безцентрового шліфування переривчастими шліфувальними кругами необхідно визначити взаємозв'язки режимів шліфування з силовими параметрами процесу, а також параметрами якості шліфування поверхні.

Аналізуючи схему безцентрового шліфування, визначаємо напрямок дії радіальної та тангенціальної складової сил різання.

**Викладення основного матеріалу.** Фізичні й хімічні процеси і явища, що виникають між різальними елементами інструмента й оброблюваною поверхнею, лежать в основі формування параметрів мікрорельєфу й дефектного шару поверхні деталі.

Для ефективного шліфування заготовки з метою одержання високих експлуатаційних властивостей деталей необхідно визначити область режимів різання, що забезпечують максимальну швидкість видалення припуску при підтримці необхідної якості поверхневого шару. Для зручності аналізу сили різання умовно ділять на радіальну  $P_r$  і тангенціальну складові  $P_z$ . Підсумовуванням складових сили різання, що діють на одиничні зерна, визначають результуючі їхні значення під час шліфування. Якщо радіальна складова сили різання під час шліфування визначає силовий вплив інструмента на оброблюваний матеріал за лінією зрізу й формування дефектного шару під дією силового фактора під час шліфування, то тангенціальна складова – енергоємність і тепловий потік у зоні контакту. Силові й теплові поля є результатом взаємодії алмазних зерен з заготовкою, що обробляють.

Під час шліфування заготовок зовнішніх кілець з загартованої сталі ШХ15 сили різання мають невеликі значення, але зростає вплив сил різання на точність оброблюваної деталі. Встановлено, що під час оброблення матеріалів з мікрорельєфом вище 10 % сили різання менші, ніж під час оброблення загартованих сталей. Так, для перлітних, ферито-перлітних матеріалів сили різання вищі в 1,5 раза, ніж для матеріалів, що мають феритну структуру [4].

Але до теперішнього часу не встановлено залежність сили різання під час переривчастого безцентрового шліфування від фізико-механічних характеристик заготовки. Отримання такої залежності дало б змогу прогнозувати вплив сил різання на якість поверхневого шару заготовки залежно від режимів різання. Для досягнення поставленої мети потрібно визначити вплив режимів шліфування на сили різання з врахуванням кількості канавок переривчастого круга.

Для проведення досліджень з визначення впливу режимів різання на сили шліфування використовувалася методика повного факторного експерименту, що представлений планом  $2^4$  (варіювання чотирьох технологічних параметрів на двох рівнях). Основні чинники, що впливають на сили різання під час шліфування поверхні заготовки, залежать від повздовжньої подачі  $S$ , швидкості заготовки  $V_0$ , числа канавок  $\mathcal{E}$ , глибини різання  $t$ . Враховуючи, що 60 % силового впливу приходить на радіальну силу різання  $P_r$ :

$$P_r = f(S, V_0, \mathcal{E}, t). \quad (1)$$

У першому наближенні функцію (1) можна представити у наступному вигляді:

$$P_r = C \cdot S^a \cdot V_0^b \cdot \mathcal{E}^c \cdot t^d, \quad (2)$$

де  $C$  – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості заготовки й умови оброблення;  $S$  – повздовжня подача, мм/хв.;  $V_0$  – швидкість заготовки, м/хв.;  $\mathcal{E}$  – кількість канавок;  $t$  – глибина різання, мм.

Необхідно зазначити, що математична модель не описує систему в цілому, а лише окремий комплекс чинників, що є визначальними під час шліфування заготовок. У логарифмічному представленні рівняння (2) буде поліномом першого степеня:

$$\ln P_r = \ln C + a \ln S + b \ln V + c \ln \mathcal{E} + d \ln t. \quad (3)$$

При переході до безрозмірних величин у загальному вигляді рівняння (3) запишемо:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4. \quad (4)$$

Експерименти проводили, використовуючи методику повного факторного аналізу, тобто одночасного варіювання усіх змінних чинників  $x_1(S)$ ,  $x_2(V)$ ,  $x_3(\mathcal{E})$ ,  $x_4(t)$ . Кожна з цих змінних варіюється на двох рівнях ( $2^k$ ), де  $k$  – кількість змінних. Визначили невідомі  $b_0$  і коефіцієнти  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ .

Вибір режимів оброблення проводився таким чином, щоб спростити кодування із врахуванням можливостей обладнання та граничних режимів оброблення.

У таблиці 1 представлено верхній (+) і нижній (-) рівні варіювання технологічних параметрів, що обиралися з умов технологічних можливостей застосовуваного устаткування, а також відсутності мікротріщин і припалень на обробленій поверхні заготовок.

Таблиця 1

*Значення технологічних параметрів, що використовуються в експериментальних дослідженнях та кодові позначення*

Рівень	Режими шліфування				Кодові позначення			
	$S$ , мм/хв.	$V_o$ , м/хв.	$\mathcal{E}$ ,	$t$ , мм	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Верхній	400	40	36	0,4	1	1	1	1
Середній	300	30	24	0,3	0	0	0	0
Нижній	200	20	12	0,2	-1	-1	-1	-1

Під час перевірки гіпотези однорідності дисперсії використовували  $G$ -критерій Кохрена. Адекватність отриманої моделі оцінювали за  $F$ -критерієм Фішера на основі вирахованої дисперсії адекватності  $S_{ad}^2$  при прийнятому рівні значущості  $q = 5\%$  і кількості степенів вільності  $N_{lad} = N - l = 16 - 4 = 12$  ( $l$  – кількість значущих коефіцієнтів) та  $V_{3B} = N(m - 1) = 80$ . Для отримання кінцевих залежностей проводили заміну перемінних в рівнянні регресії та приводили його до степеневого вигляду. За даними експериментальних досліджень і статистичного оброблення результатів були отримані математичні моделі радіальної й тангенціальної складових сили шліфування. Отримані математичні моделі дійсні лише в межах інтервалів варіювання технологічних параметрів.

Аналіз отриманих математичних залежностей показав, що найбільше впливає на збільшення складових сили шліфування  $P_y$ ,  $P_z$  збільшення глибини різання й меншою мірою – повздовжньої подачі заготовки ( $S$ ) та швидкість заготовки ( $V_o$ ). Кількість канавок шліфувального круга ( $\mathcal{E}$ ) впливає на складові сили різання під час переривчастого шліфування, збільшення яких призводить до зниження силового впливу на оброблювану поверхню. Найбільш високі значення коефіцієнта кореляції (у межах до 0,797) були отримані між радіальною складовою сили різання й глибиною різання оброблюваної деталі. Також був встановлений тісний кореляційний зв'язок між радіальною складовою сили різання й подачею  $S$  (коефіцієнти кореляції 0,49).

Експериментальні значення радіальної складової сили різання та її лінійна апроксимація від подачі представлені на рисунку 2. Була перевірена вірогідність постійних коефіцієнтів регресії (за  $t$ -критерієм) і оцінка реальності зв'язку між змінними (для рівня значущості 0,05). Вона показала значущість коефіцієнтів регресії й кореляції для рівняння радіальної складової сили різання. У результаті проведених експериментальних досліджень із наступним регресійним аналізом отриманих даних були отримані залежності радіальної й тангенціальної складових сили шліфування:

$$P_y = 350,7 \frac{S^{0,17} \cdot V_o^{0,07} \cdot t^{0,27}}{\mathcal{E}^{0,13}}, \quad (5)$$

$$P_z = 2909,7 \cdot S^{0,31} \cdot V_o^{0,12} \cdot \mathcal{E}^{-0,99} \cdot t^{0,18}, \quad (6)$$

де  $S$  – повздовжня подача, мм/хв.;  $V_o$  – швидкість заготовки, м/хв.;  $\mathcal{E}$  – кількість канавок;  $t$  – глибина різання, мм.

На рисунку 3 показано поверхню відгуку залежності радіальної сили різання  $P_y$  від кількості канавок шліфувального круга деталі та глибини різання під час переривчастого шліфування кругом 1-600x500x305 14A25-H C1-CM2 7K1A 35 м/с, з кількістю канавок 12,  $V_o = 30$  м/хв., що побудована на основі регресійної залежності (5).

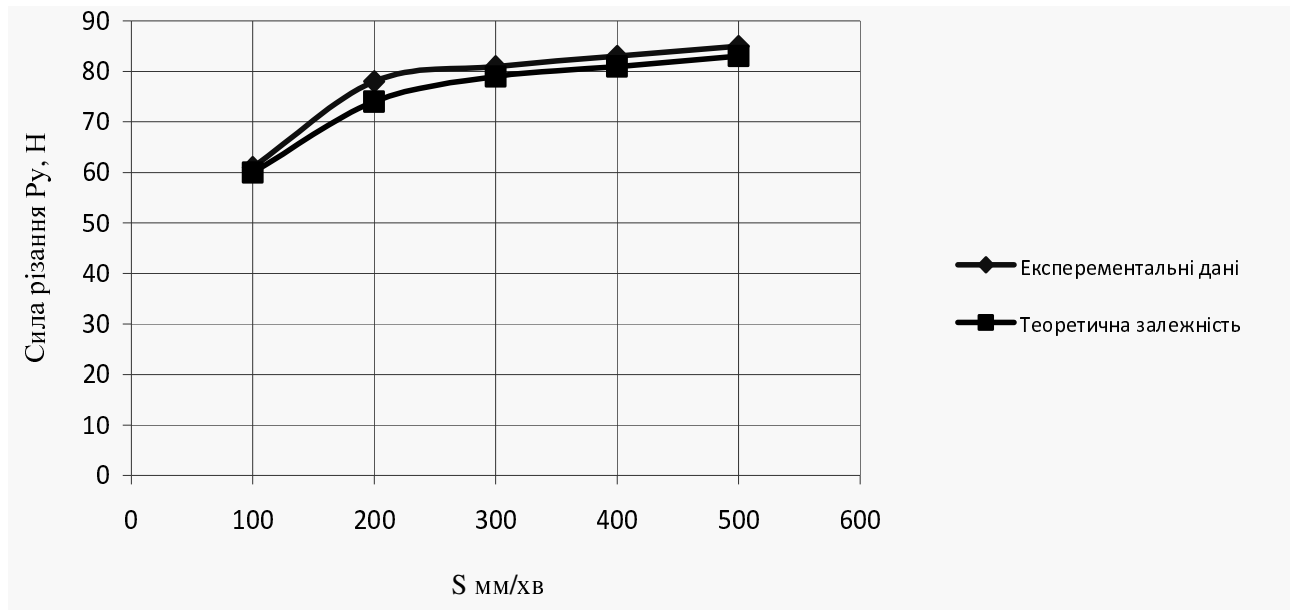


Рис. 2. Вплив повздовжньої подачі на силу різання, при  $V_0 = 20$  м/хв.,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $t = 0,2$  мм,  $S = 300$  мм/хв.

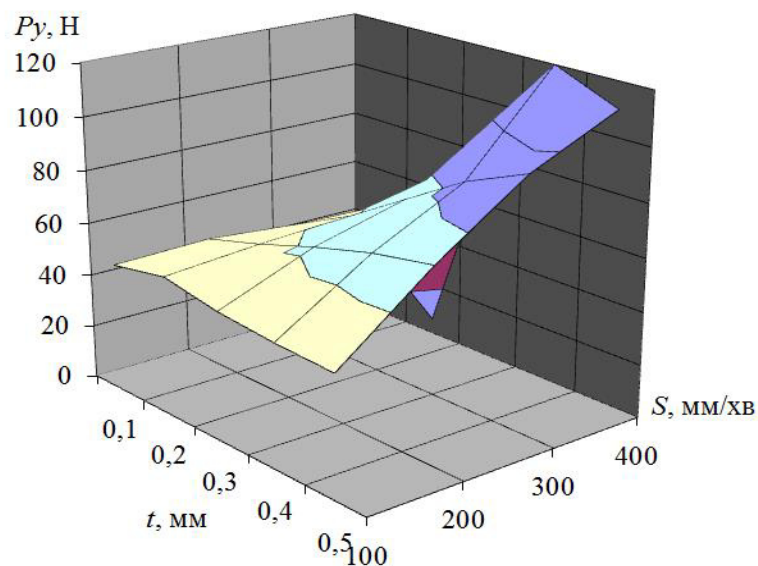


Рис. 3. Поверхня відгуку залежності радіальної сили різання  $P_y$  від повздовжньої подачі деталі та глибини різання кругом 1-600x500x305 14A25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с з кількістю канавок 12  $V_0 = 30$  м/хв.

На рисунку 4 показано поверхню відгуку залежності радіальної сили різання  $P_y$  від глибини різання та поперечної подачі під час переривчастого шліфування кругом 1-600x500x305 14A25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с при  $\mathcal{E} = 24$ ,  $V_0 = 10$  м/хв., що побудована на основі регресійної залежності (5).

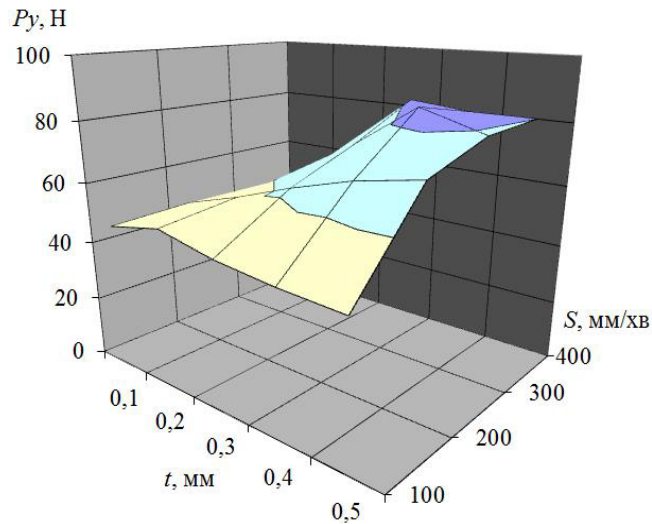


Рис. 4. Поверхня відгуку залежності радіальної сили різання  $P_y$  від глибини різання, повздовжньої подачі на операції безцентрового шліфування переривчастим кругом 1-600x500x305 14A25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с з кількістю канавок 12

На тангенціальну силу різання значно впливають всі досліджувані чинники за виключенням мікронерівності деталі, вплив якої в досліджуваному діапазоні варіювання є незначним. Адекватність отриманої моделі тангенціальної складової сили шліфування перевіряли за допомогою  $F$ -критерію Фішера. Табличне значення критерію  $F_m$  при 5 %-ому рівні значущості дорівнює 5,844. Розрахункове значення критерію Фішера складає 2,816, що менше за табличне значення. Таким чином, отримана модель тангенціальної складової сили шліфування адекватна при 5 %-ому рівні значущості. Залежність тангенціальної складової сили різання від режимів різання така сама, як і радіальної складової.

Найбільше впливає на тангенціальну складову мікронерівність деталі, яка зі зростанням призводить до зменшення сили різання.

На рисунку 5 показано поверхню відгуку залежності тангенціальної сили різання  $P_z$  від повздовжньої подачі  $S$  та глибини різання  $t$  під час переривчастого шліфування кругом 1-600x500x305 14A25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с при  $V_o = 20$  м/хв., кількості різальних виступів круга 12, що побудована на основі регресійної залежності (6).

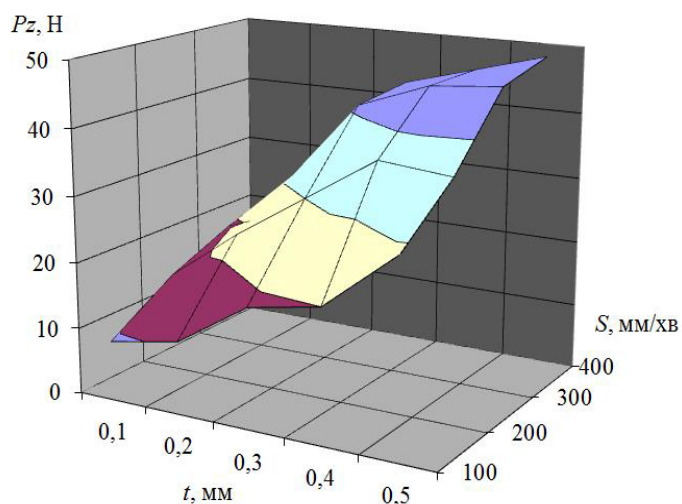


Рис. 5. Поверхня відгуку залежності тангенціальної сили різання  $P_z$  від глибини різання, повздовжньої подачі на операції безцентрового шліфування переривчастим кругом 1-600x500x305 14A25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с з кількістю канавок 12

Бачимо, що збільшення глибини різання призводить до росту тангенціальної сили різання і фактично збільшує теплонапруженість процесу шліфування.

**Висновки.** Проведеними теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що

радіальна сила різання  $P_y$  під час шліфування переривчастими кругами збільшується зі збільшенням поздовжньої подачі та глибини різання (рис. 3). Тангенціальна сила  $P_z$  збільшується зі збільшенням поздовжньої подачі кілець та глибини різання більшою мірою, ніж радіальна сила  $P_y$ . Дослідженнями встановлено також, що зростання тангенціальної сили шліфування має кореляційну залежність з температурою, яка виникає в зоні різання під час шліфування.

#### Список використаної літератури:

1. Якимов О.В. Високопродуктивне шліфування / О.В. Якимов, Ф.В. Новиков. – К. : ІНТМ, 1995. – 180 с.
2. Лебедев В.Г. Автоматическое управление качеством деталей машин при шлифовании / В.Г. Лебедев. – К. : Знание, 1981. – 25 с.
3. Марчук В.І. Про вплив параметрів якості робочих поверхонь кілець на експлуатаційні характеристики високоточних роликів підшипників / В.І. Марчук, Л.М. Равенець, Ештеїві Абдулсалам Мусбах // Перспективні технології та прилади. – Вип. 6 (1). – Луцьк : Вид-во ЛНТУ, 2015. – С. 49–53.
4. Бохонский А.И. Гашение колебаний при токарной обработке нежестких деталей / А.И. Бохонский, Т.В. Мозолева // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. – Львов : Высшая школа, 1981. – Вып. 20. – С. 37–41.

МАРЧУК Віктор Іванович – доктор технічних наук, завідувач кафедри «Приладобудування» Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- технологічне забезпечення параметрів якості та експлуатаційних характеристик деталей машин та приладів на операціях механічного оброблення.

E-mail: [pb@lntu.edu.ua](mailto:pb@lntu.edu.ua)

РАВЕНЕЦЬ Леся Миколаївна – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Приладобудування» Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- підвищення ефективності технології шліфування кілець роликів підшипників в умовах переналагоджувального виробництва.

E-mail: [ylar21@mail.ru](mailto:ylar21@mail.ru)

ЕШТЕІВІ Абдулсалам Мусбах – аспірант кафедри «Приладобудування» Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- підвищення якості та експлуатаційних характеристик роликів підшипників в умовах переналагоджувального виробництва.

E-mail: [pb@lntu.edu.ua](mailto:pb@lntu.edu.ua)

Стаття надійшла до редакції 03.11.2015.