УДК 621.923.42
Віталій Кальченко, Володимир Кальченко, Андрій Єрошенко, Наталія Сіра

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ, ЗНОСУ КРУГА, ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ТА ТЕПЛОНАПРУЖЕНОСТІ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТА СТУПІНЧАТИХ ВАЛІВ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ ДЕТАЛІ ТА КРУГА

Виталий Кальченко, Владимир Кальченко, Андрей Ерошенко, Наталия Серая

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СНЯТИЯ ПРИПУСКА, ИЗНОСА КРУГА, ТОЧНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ СО СКРЕЩЕННЫМИ ОСЯМИ ДЕТАЛИ И КРУГА

Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko, Nataliia Sira

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS PROCESS STOCK REMOVAL, WHEEL WEAR, FORMING ACCURACY AND THERMAL VOLTAGE AT GRINDING OF CYLINDRICAL AND STEPPED SHAFTS WITH CROSSED AXES OF PART AND WHEEL

Практичне застосування нових високопродуктивних способів шліфування циліндричних та ступінчастих валів потребує їх теоретичного та експериментального дослідження за основними показниками обробки: продуктивності шліфування, інтенсивності зносу інструменту та теплонапруженості. При теоретичних розрахунках врахування теплонапруженості процесу здійснюється через коефіцієнт, який враховує зміну фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу з підвищенням його температури нагрівання. З метою забезпечення максимальної продуктивності шліфування проведено планування повного факторного експерименту з трьома факторами (повздовжня подача на оберт та швидкість деталі, а також кут орієнтації інструменту) та перевірена значущість коефіцієнтів регресії.
***Ключові слова:** шліфування, циліндричний вал, ступінчатий вал, абразивний круг, алмазний круг, схрещені осі.*
Рис.: 8. Бібл.: 12.

Практическое применение новых высокопроизводительных способов шлифования цилиндрических и ступенчатых валов требует их теоретического и экспериментального исследования по основным показателям обработки: производительности шлифования, интенсивности износа инструмента и теплонапряженности. При теоретических расчетах учет теплонапряженности процесса осуществляется через коэффициент, учитывающий изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала с повышением его температуры нагрева. С целью обеспечения максимальной производительности шлифования проведено планирование полного факторного эксперимента с тремя факторами (продольная подача на оборот и скорость детали, а также угол ориентации инструмента) и проверена значимость коэффициентов регрессии.
***Ключевые слова:** шлифование, цилиндрический вал, ступенчатый вал, абразивный круг, алмазный круг, скрещенные оси.*
Рис.: 8. Библ: 12.

Practical application of new grinding methods of high-performance cylindrical and stepped shafts requires their theoretical and experimental research on the basic machining parameters: grinding performance, the wear rate of tool and thermal stress. Accounting thermal stress process in theoretical calculations is carried out through coefficient, which with increase of the heating temperature considering change of physico-mechanical properties of the processed material. In order to ensure the maximum performance of grinding the planning of full factorial experiment with three factors (longitudinal feed per revolution and the speed of detail and the angle of the tool orientation) carried out and the significance of the regression coefficients tested.
***Key words:** grinding, cylindrical shaft, stepped shaft, grinding wheel, diamond grinding wheel, crossed axis.*
Fig.: 7. Bibl.: 12.

Постановка проблеми. На сучасних автомобілебудівних, верстатобудівних та інших машинобудівних заводах широко використовуються циліндричні та ступінчасті валики. Для забезпечення високих техніко-експлуатаційних показників та надійності роботи вказаних деталей висуваються високі вимоги до точності їх геометричної форми та якості поверхневого шару, які забезпечуються фінішними операціями на шліфувальних верстатах [1; 2].

В умовах подальшого розвитку ринкових відносин у галузі машинобудування актуальним є завдання розроблення нових способів шліфування, які забезпечуватимуть під-

© Кальченко В. І., Кальченко В. В., Єрошенко А. М., Сіра Н. М., 2016

вищення продуктивності оброблення при збереженні високих точності та якості оброблюваних поверхонь деталей.

Аналіз досліджень і публікацій. Під час оброблення великогабаритних трубо- та листопрокатних валиків використовується спосіб глибинного шліфування поверхонь обертання орієнтованим широким циліндричним кругом [3; 4], який значно підвищує точність формоутворення та продуктивність шліфування. Німецька фірма Junker досягла підвищення продуктивності в 5–6 разів у порівнянні з традиційним круглим шліфуванням завдяки впровадженню способу глибинного однопрохідного високошвидкісного шліфування (до 140 м/с) зі схрещеними осями інструмента та деталі на верстатах Quickpoint 1000, Quickpoint 3000, Quickpoint 5000 [5].

Дослідження способу шліфування зі схрещеними осями круга і деталей з профілем у вигляді дуги кола наведено в роботі [6].

У роботі [7] представлено високопродуктивний спосіб глибинного шліфування циліндричних та ступінчастих валів зі схрещеними осями круга та деталі, який забезпечує підвищення точності формоутворення та якості обробленої поверхні деталі. Оброблення деталі здійснюється за один установ орієнтованим шліфувальним кругом, де чорновий припуск знімає торець інструменту, а чистове шліфування та калібрування виконує широка розвантажена ділянка його периферії. Практичне застосування запропонованого способу під час шліфування циліндричних та ступінчастих валів потребує теоретичного та експериментального дослідження за основними показниками обробки: продуктивності шліфування, інтенсивності зносу інструмента та теплонапруженості процесу.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність теоретичних та експериментальних досліджень процесу глибинного шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями круга та деталі.

Мета статті. Метою статті є порівняння результатів, отриманих у процесі теоретичних та експериментальних досліджень процесу глибинного однопрохідного шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями круга та деталі, що сприятиме подальшому практичному застосуванню способу в промисловості.

Виклад основного матеріалу. Теоретичне дослідження процесу глибинного однопрохідного шліфування зі схрещеними осями круга та деталі проводиться для циліндричного вала зі сталі 45 діаметром 20 мм та абразивного круга ПП200×20×32 64С 25П СМ2 К3.

Під час оброблення циліндричної деталі шліфувальний круг повертають відносно горизонтальної осі оброблюваної деталі на кут $\varphi = 1^0$ [7; 8], що забезпечує фіксацію його формоутворюючої ділянки, а вісь повороту інструменту розташовують на відстані від торця, рівній радіусу заокруглення радіусної крайки шліфувального круга та половини подачі s на оберт деталі з метою забезпечення роботи широкої ділянки його периферії. Шліфувальний круг подається на всю глибину різання t = 0,5 мм і переміщується вздовж горизонтальної осі деталі з подачею s = 0,1 мм/об, при цьому чорновий припуск знімається торцем круга, а чистова обробка здійснюється широкою ділянкою його периферії.

У ході теоретичних розрахунків отримані залежності (1) та (2) для визначення питомої $Q(i)$ та миттєвої $Q_m(i)$ продуктивності при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями деталі та абразивного круга, графіки розподілу яких вздовж профілю інструмента (координата i) представлені на рис. 1:

$$Q(i) = \int_{\alpha 1(i)}^{\alpha 2(i)} \left(Vn(\alpha, i) - y_{eyc}\right) \cdot R_{ШК}(i) \cdot k_{np} \cdot d\alpha , \tag{1}$$

$$Q_m(i) = \int_{i1}^{i2} \left[\int_{\alpha 1(i)}^{\alpha 2(i)} \left(Vn(\alpha, i) - y_{eyc}\right) \cdot R_{ШК}(i) \cdot k_{np} \cdot d\alpha \right] \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{ШК}(i)}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{ШК}(i)}{di}\right)^2} \cdot di , \tag{2}$$

де Vn – проекція вектора відносної швидкості руху інструменту на напрямок нормалі до його поверхні;

$y_{еус}$ – податливість системи, яка залежить від лінійного положення точки на профілі деталі та коефіцієнта статичної податливості $k_{еус}$: $y_{еус} = f(i_д, k_{еус})$;

$R_{ШК}(i)$ – радіус шліфувального круга;

$k_{пр}$ – коефіцієнт, який враховує ймовірність видалення матеріалу [9; 10];

α та i – кутова та лінійна координати профілю шліфувального круга;

$\sqrt{\left(\frac{dR_{ШК}(i)}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{ШК}(i)}{di}\right)^2}$ – ширина елементарної площадки в осьовому перерізі круга.

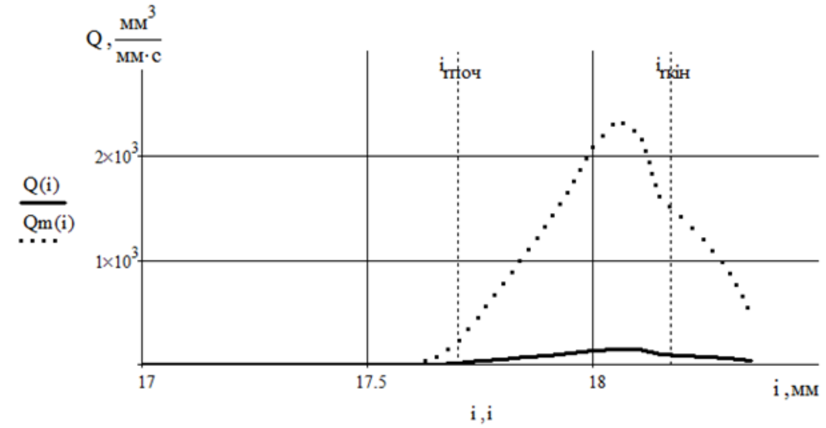


Рис. 1. Розподіл питомої $Q(i)$ та миттєвої $Q_m(i)$ продуктивності шліфування вздовж профілю абразивного круга під час оброблення циліндричного вала

На рис. 1 ділянка до координати $i_{гпоч}$ відповідає периферії круга, яка є чистовою ділянкою; від координати $i_{гпоч}$ до $i_{гкін}$ – перехідній радіусній крайці інструменту; після координати $i_{гкін}$ – торцю інструменту, на який припадає чорновий припуск.

Оцінка зносу шліфувального круга визначається через його об’ємний знос:

$$K = \frac{Q_a}{Q_{yin}}, \tag{3}$$

де Q_a – об’ємна кількість зношеного абразиву за одиницю часу [10];

Q_{yin} – швидкість зняття металу за той же час.

Теоретично розрахована величина об’ємного зносу абразивного круга при шліфуванні циліндричного вала становить K = 19,3 мм³/хв.

При розрахунку складових сил різання [11], які впливають на потужність шліфування, врахування впливу нагрівання оброблюваного матеріалу здійснюється через величину напруги зсуву, яка знаходиться за залежністю: $\tau_s(t) = \tau_{s20} \cdot k_t$, де τ_{s20} – напруга зсуву при температурі 20 °С; k_t – коефіцієнт, який враховує зміну фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу з підвищенням температури нагрівання t деталі.

На рис. 2 наведено графік зміни напруги зсуву τ_s сталі 45 залежно від температури t. За даними графіка визначено коефіцієнт k_t для сталі 45: $k_t = -2 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 10^{-5} \cdot t^2 + 0{,}003 \cdot t + 0{,}924$.

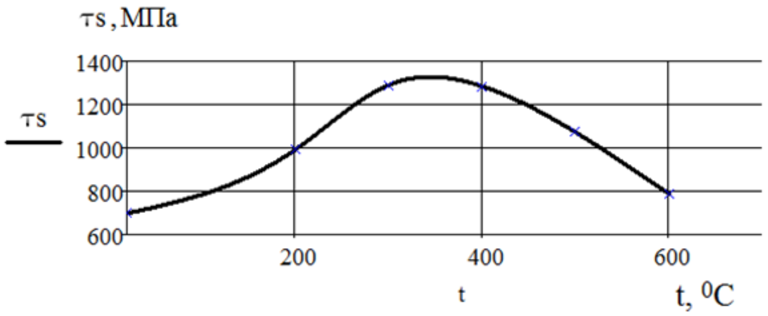


Рис. 2. Залежність напруги зсуву τs від температури нагріву t для сталі 45

Теоретично розрахована величина потужності при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного вала зі сталі 45 діаметром 20 мм і абразивного круга ПП200×20×32 64С 25П СМ2 К3, з глибиною різання t = 0,3 мм та повздовжньою подачею s = 0,1 мм/об деталі, становить N_m = 899,6 Вт.

Максимальне значення температури в зоні контакту шліфувального круга та деталі визначається за залежністю, наведеною в [12]:

$$\theta = \frac{q}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot a \cdot h}{v_\partial}}, \tag{4}$$

де q – густина теплового потоку [10];

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

a – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу;

v_∂ – швидкість переміщення теплового джерела.

Визначені за рівнянням (4) максимальні значення температури в зоні контакту шліфувального круга та деталі становлять: на торці інструменту θ = 65,8 °С, на перехідній радіусній крайці θ = 84,8 °С, на периферії шліфувального круга θ = 102 °С.

З метою перевірки достовірності даних, отриманих при теоретичних розрахунках, були проведені експериментальні дослідження процесу глибинного однопрохідного шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями абразивного круга та деталі.

Глибинне однопрохідне шліфування зі схрещеними осями абразивного круга ПП200×20×32 64С 25П СМ2 К3 та циліндричного вала (сталь 45) діаметром 20 мм здійснювалося на верстаті моделі В3208Ф3 (рис. 3).

Рис. 3. Шліфування циліндричного вала зі схрещеними осями абразивного круга та деталі на верстаті моделі В3208Ф3

Для визначення оптимальних значень кута орієнтації круга, величини повздовжньої подачі на оберт та швидкості кругової подачі деталі і отримання при цьому максимальної продуктивності шліфування, застосовувався метод математичного планування експерименту. Як параметр оптимізації Y була обрана продуктивність шліфування Q, як фактори – повздовжня подача на оберт s деталі, кут схрещування осей інструмента та деталі φ та швидкість деталі $v_д$. Використано повний факторний експеримент типу 2^3 із взаємодіями.

Діапазони варіювання факторів: повздовжня подача на оберт деталі s – 0,05–0,1 мм/об; кут схрещування осей інструмента та деталі φ – 0,5–1,5°; кругова подача деталі $v_д$ – 25–35 м/хв.

Для розрахунку коефіцієнтів складемо матрицю планування експерименту 2^3 з ефектом взаємодії:

№	X_1 (s, мм/об)	X_2 (φ, ^{0})	X_3 ($v_д$, м/хв)	X_1X_2	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Y (Q)
1	+	+	+	+	+	+	+	1087
2	-	+	+	-	-	+	-	617,05
3	+	-	+	-	+	-	-	1401
4	-	-	+	+	-	-	+	928,5
5	+	+	-	+	-	-	-	839,4
6	-	+	-	-	+	-	+	438,1
7	+	-	-	-	-	+	+	1000,5
8	-	-	-	+	+	+	-	627,8

Рівняння математичної моделі в кодованих значеннях має вигляд:

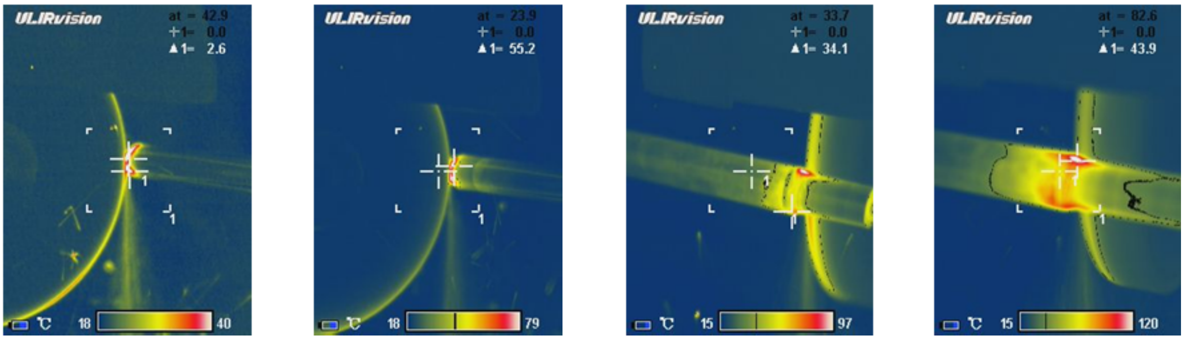
$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (5)$$

Після обробки отриманих результатів визначили значення коефіцієнтів у рівнянні математичної моделі:

$$Y = 867{,}41 + 214{,}56 \cdot X_1 - 122{,}04 \cdot X_2 + 140{,}98 \cdot X_3 + 21{,}06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 34{,}32 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (6)$$

Аналіз рівняння регресії (7) показав, що вплив на продуктивність оброблення здійснюють повздовжня s і кругова $v_д$ подачі деталі та кут орієнтації шліфувального круга φ, а їх взаємодія та взаємодія повздовжньої подачі s і кута орієнтації φ не впливають на результати експерименту.

У ході експерименту за допомогою тепловізора визначено температури абразивного круга і деталі при кутах схрещування їх осей $\varphi = 0{,}5^0$ та $\varphi = 1^0$ (рис. 4).

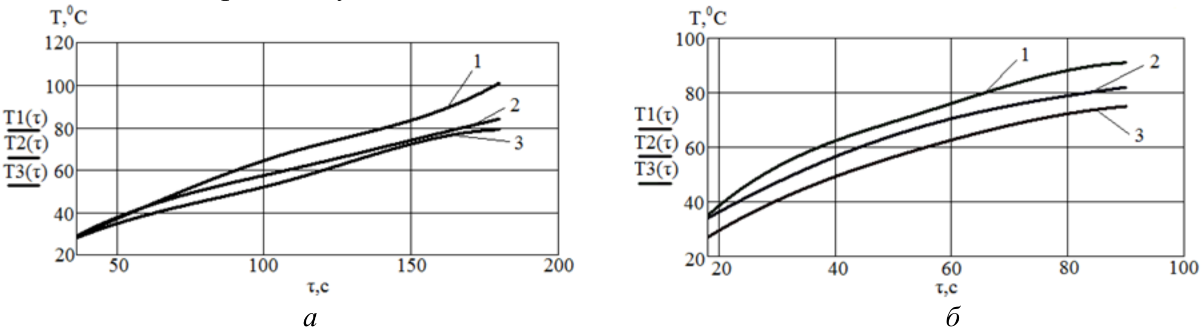


а *б* *в* *г*

Рис. 4. Температури шліфувального круга і деталі у процесі глибинного однопрхідного шліфування при кутах схрещування осей $0{,}5^0$ (а, б) та 1^0 (в, г)

За допомогою безконтактного термометра були визначені значення температур T_i у зонах контакту шліфувального круга і деталі. На основі отриманих даних побудовано графіки залежності температури T від часу оброблення τ (рис. 5). Як видно із графіків,

найбільші значення температури на виході шліфувального круга з деталі, найменші – на вході шліфувального круга в матеріал заготовки, середні значення – у зоні контакту круга та деталі. Розбіжність значень величини температури з теоретично отриманими значеннями в середньому становить 8 %.



а *б*

Рис. 5. Температура в зонах контакту шліфувального круга і деталі при кутах схрещування осей 0,5^0 (а) та 1^0 (б): 1 – температура при виході шліфувального круга з деталі; 2 – температура в зоні контакту круга та деталі; 3 – температура на вході шліфувального круга в матеріал деталі

Визначення зносу шліфувального круга здійснено по пластинці за допомогою мікроскопу. На основі отриманих значень побудовано зношений профіль абразивного круга (рис. 6). Як видно із графіка, найбільший знос шліфувального круга припадає на його торець, який є завантаженою ділянкою і зрізує чорновий припуск, середні значення величини зносу припадають на перехідну радіусну крайку, а найменші – на периферію інструменту, яка є чистовою і калібруючою ділянкою. Такий розподіл величини припуску вздовж профілю інструменту забезпечує рівномірний знос шліфувального круга, а отже, і високу точність формоутворення деталі.

Експериментально отримане значення об'ємного зносу абразивного круга при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі при заданих режимах оброблення становить $K = 17{,}8$ мм^3/хв. При цьому розбіжність з теоретично отриманим значенням становить 7,8 %.

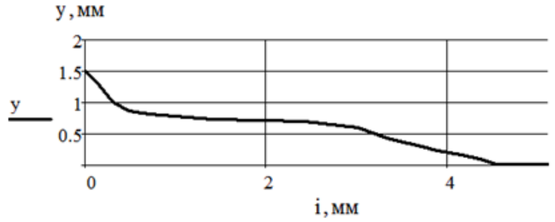
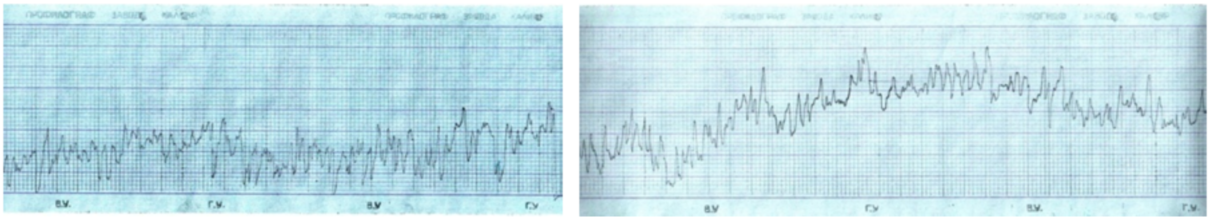


Рис. 6. Профіль зношеної ділянки абразивного круга при глибинному однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі

Шорсткість *Ra* обробленої поверхні циліндричного вала була визначена за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 і при обробці з кутами схрещування осей круга та деталі φ = 0,5^0 та φ = 1^0 (рис. 7) склала: при подачі s = 0,1 мм/об – *Ra* = 0,63-1,25 мкм, при зменшенні подачі до s = 0,05 мм/об – *Ra* = 0,32-0,63 мкм.



а *б*

Рис. 7. Профілограми обробленої поверхні циліндричного вала при кутах схрещування осей круга та деталі 0,50 (а) та 10 (б)

З метою отримання параметра шорсткості обробленої поверхні *Ra* = 0,32-0,16 мкм використовувався ельборовий круг марки 1А1 150×*5×32×5 ЛКВ 50 80/63 С2 КС10 100*, яким здійснювалося чистове шліфування циліндричної ділянки вала та обробка торця деталі.

Під час оброблення торцевої поверхні циліндричного вала повздовжня подача на оберт деталі та величина кута схрещування осей зменшується [7] і профіль торця отримується шляхом копіювання зовнішнього діаметра алмазного круга врізним шліфуванням, при якому деталь повинна зробити не менше одного оберту. Відхилення від перпендикулярності торцевої поверхні циліндричного вала, обробленого таким способом, становила 6 мкм на висоті торця 0,5 мм.

На рис. 8 наведено результати вимірювання потужності глибинного однопрохідного шліфування зі схрещеними осями абразивного круга та циліндричного вала. Розбіжність значень величини потужності *N* з теоретично отриманим значенням становить 10 %.

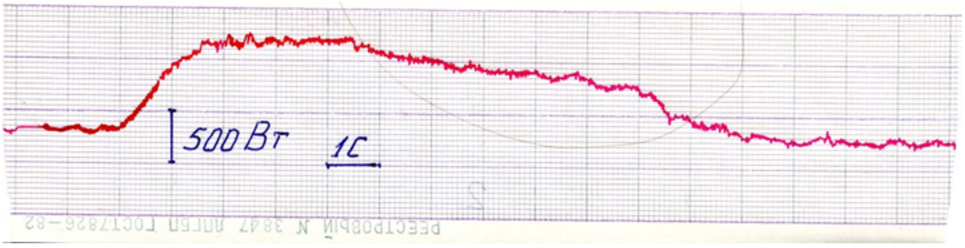


Рис. 8. Результати вимірювання потужності шліфування із схрещеними осями абразивного круга та циліндричного вала

Висновки. Представлений спосіб глибинного однопрохідного шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями круга та деталі забезпечує підвищення продуктивності обробки, точності (IT 6-7) та шорсткості (*Ra* = 0,32-0,16 мкм) оброблених поверхонь деталей. Поворот осі шліфувального круга відносно горизонтальної осі оброблюваної деталі забезпечує фіксацію формоутворюючої точки інструменту та можливість її програмування на верстатах з ЧПК.

Зняття чорнового припуску торцем інструменту, а чистового – широкою ділянкою його периферії забезпечує підвищення точності деталі, оскільки найбільше зношується торець шліфувального круга, а формоутворююча точка знаходиться на периферії інструменту. При цьому периферією інструменту знімається весь дефектний шар (0,03–0,05 мм), що забезпечує високу якість оброблених деталей. Експериментально отримане значення об’ємного зносу абразивного круга при становить 17,8 мм^3/хв.

З метою забезпечення максимальної продуктивності шліфування проведено планування повного факторного експерименту з трьома факторами. Аналіз рівняння регресії показав, що вплив на продуктивність оброблення здійснюють повздовжня подача на оберт та швидкість деталі і кут орієнтації інструменту, а взаємодія повздовжньої подачі і кута орієнтації не впливають на результати експерименту.

У ході експериментальних досліджень визначено величину температури в зонах контакту шліфувального круга та деталі: на вході шліфувального круга в матеріал заготовки (до 80 °С), у зоні контакту круга та деталі (до 85 °С) та на виході шліфувального круга з деталі (до 120 °С). При цьому величина потужності, яка витрачається на глибинне однопрохідне шліфування зі схрещеними осями абразивного круга та деталі, становить 1 кВт. Розбіжність результатів, отриманих при експериментальному та теоретичному дослідженнях процесу глибинного однопрохідного шліфування зі схрещеними осями круга та деталі, знаходиться в межах 10 %.

Запропонований спосіб шліфування може бути використаний під час оброблення не тільки циліндричних та ступінчатих, а й криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі.

Список використаних джерел

1. *Ящерицын П. И.* Основы резания материала и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск : Вышейшая школа, 1975. – 528 с.

2. *Патент №50-636* (Япония) кл. B24B 53/100 Способ правки шлифовального круга / Тоеда Коки К. К., 1976.

3. *Авторское* свидетельство № 1234163 (СРСР), кл. B24B 5/04 Способ круглого шлифования с продольной подачей / Кальченко В. И., 1984.

4. *Кальченко В. И.* Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента : дис. … д-ра техн. наук / В. И. Кальченко. – Х. : ХГПУ, 1994. – 329 с.

5. *Quickpoint.* Fleksible high-performance grinding machine: [Журнал фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraβe 2. – Nordrash, Germany, 2015. – Октябрь. – 12 p.

6. *Єрошенко А. М.* Теоретичні та експериментальні дослідження процесу шліфування зі схрещеними осями інструмента і деталі з профілем у вигляді дуги кола / А. М. Єрошенко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник – Чернігів : ЧДТУ, 2008. – Вип. 35. – С. 5–24.

7. *Кальченко В. І.* Модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного та ступінчастого вала і ельборового круга / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Н. М. Сіра // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 36–48.

8. *Сіра Н. М.* Модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного вала і абразивного круга / Н. М. Сіра // Технічні науки та технології. – 2016. – № 3 (5). – С. 67–75.

9. *Новоселов Ю. К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Сатаров : Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.

10. *Грабченко А. И.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧДТУ, 2009. – 256 с.

11. *Кальченко В. И.* Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом / В. И. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко // Сверхтвердые материалы. – К. : Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2012. – № 2 (196). – С. 58–73.

12. *Високопродуктивне* шліфування / О. В. Якімов, Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, О. О. Якімов – К. : ІСДО, 1995. – 180 с.

References

1. Yashcherytsyn, P.I., Eremenko, M.L. & Zhigalko, N.I. (1975). *Osnovy rezaniia materiala i rezhushchii instrument [Fundamentals of cutting material and the cutting tool]*. Minsk: Vysheishaia shkola (in Russian).

2. Toeda Koki, K.K. (1976). *Sposob pravki shlifovalnogo kruga [A method of grinding wheel dressing]*. Patent № 50-636 klas V24V 53/100 (Yaponiia).

3. Kalchenko, V.I. (1984). *Sposob kruglogo shlyfovaniia s prodolnoi podachei [Cylindrical grinding method with a longitudinal feed]*. Avtorskoe svidetelstvo SRSR № 1234163, klas V24V 5/04.

4. Kalchenko, V.V. (2006). Naukovi osnovy efektyvnoho shlifuvannia zi skreshchenymy osiamy abrazyvnoho instrumentu ta detali [Scientific bases of effective cross-axes grinding abrasive tools and detail]. *Doctor's thesis*. Kharkiv: NTU «KPI» (in Ukrainian).

5. Quickpoint. Fleksible high-performance grinding machine. (2015, October). Zhurnal firmy «Junkermaschinen» – Junkermaschinen company magazine (Germany).

6. Yeroshenko, A.M. (2008). Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia protsesu shlifuvannia zi skhreshchenymy osiamy instrumenta i detali z profilem u vyhliadi duhy kola [Theoretical and experimental researches of the grinding process with crossed axes of the tool and workpiece with a profile in the form of a circular arc] *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu: zbirnyk – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, vol. 35, pp. 5–24.

7. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V. & Sira N.M. (2016). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, procesiv zniattia prypusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi shreshchenymy osiamy

tsylindrychnoho ta stupinchastoho vala i elborovoho kruha [Modular 3D-modeling tools, processes of removal allowance and shaping in grinding with crossed axes stepped cylindrical shaft and CBN wheel]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tool in technological systems*, no. 86, pp. 36–48 (in Ukrainian).

8. Sira, N.M. (2016). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, protsesiv zniattia prypusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy tsylindrychnoho vala i abrazyvnoho kruha [Modular 3D-modeling tools, processes of stock removal and shaping in grinding with crossed axes of cylindrical shaft and abrasive wheel] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, no. 3 (5), pp. 67–75 (in Ukrainian).

9. Novoselov, Iu. K. (1979). *Dinamika formoobrazovaniia poverkhnostei pri abrazivnoi obrabotke [The dynamics of surfaces shaping at abrasive processing]*. Saratov: Izdatestvo Saratovskogo universiteta (in Russian).

10. Grabchenko, A.I., Kalchenko, V.I. & Kalchenko, V.V. (2009). *Shlifovanie so skreshhivaiushchimisia osiami instrumenta i detail [Grinding with crossed axes of tool and workpiece]*. Chernigov: ChDTU (in Russian).

11. Kalchenko, V.I., Pogiba, N.N. & Kalchenko, D.V. (2012). Opredelenie sostavliaiushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnostei vrashcheniia orientirovannym elborovym krugom [Determining cutting forces components in deep grinding of revolution surfaces oriented el'bor wheel]. *Sverkhtverdye materialy – Journal of Superhard Materials*, no. 2 (196), pp. 58–73 (in Russian).

12. Yakimov, O.V., Novikov F.V., Novikov, H.V. & Yakimov O.O. (1995). *Vysokoproduktyvne shlifuvannia [High-performance grinding]* Kyiv : ISDO (in Ukrainian).

Кальченко Віталій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).
Кальченко Виталий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).
Kalchenko Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Road Transport and Industrial Engineering Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: kalchenkovi@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9850-7875
ResearcherID: G-9477-2014

Кальченко Володимир Віталійович – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).
Кальченко Владимир Витальевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).
Kalchenko Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in Scientific and Pedagogical Work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: vvkalchenko74@gmail.com

Єрошенко Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).
Ерошенко Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий машиностроения и деревообработки, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).
Yeroshenko Andriy – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Machine Building Technology and Wood Processing Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: yeroshenkoam@gmail.com
ORCID ID: https://orcid.org/ 0000 – 0002 – 1629 – 9516
Researcher ID: G-6757-2014

Сіра Наталія Миколаївна – аспірант,Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).
Серая Наталия Николаевна – аспирант, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).
Sira Nataliia – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: nnseraya@ukr.net

Теоретичне та експериментальне дослідження процесу зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга / В. Кальченко, В. Кальченко, А. Єрошенко, Н. Сіра // Технічні науки та технології. – 2016. – № 4 (6). – С. 35-43.