

УДК 621.923

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-18-26

Андрій Єрошенко, Олександра Дорошенко

## ТОЧНІСТЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження спрямовані на виявлення та встановлення чинників, що найбільше впливають на точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні, є актуальним завданням у машинобудуванні.

**Постановка проблеми.** Точність формоутворення поверхонь тіл обертання залежить від точності лінійних розмірів, якості оброблюваної поверхні, точності форми та взаємного розташування поверхонь. Ці параметри залежні від багатьох змінних факторів, що впливають на процес обробки. При круглому шліфуванні високої точності можливо досягти лише при великій втраті продуктивності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих дослідженнях точності формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні фактори, що впливають на якість оброблюваної поверхні, розглядаються незалежно один від одного.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Дослідження процесу круглого шліфування з метою виявлення найбільш впливових факторів та встановлення їх оптимальних значень.

**Постановка завдання.** Виявлення основних та другорядних чинників, що впливають на процес формоутворення поверхонь тіл обертання при круглому шліфуванні. Встановлення граничних значень обраних факторів. Проведення експериментальних досліджень для отримання числових значень параметрів точності. Проведення статистичного аналізу отриманих даних та створення математичної моделі процесу. Проведення повного факторного експерименту з метою оптимізації процесу шліфування.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментально досліджено точність формоутворення поверхонь тіл обертання при круглому шліфуванні на основі виявлення найбільш впливових змінних факторів у категоріях: верстат та оснащення, заготовка. Здійснено статистичне оцінювання факторів за планом Plackett-Burman (7/8). Проведено дисперсійний аналіз експерименту. Виявлені залежності між факторами (побудовані графіки маргінальних середніх та графіки взаємодії факторів). Виявлено найбільш впливовий фактор. Проведено повний факторний експеримент, оптимізацію процесу з метою встановлення оптимальних показників найбільш впливових факторів.

**Висновки відповідно до статті.** У результаті проведених досліджень виявлено найбільш впливовий фактор процесу круглого шліфування поверхонь тіл обертання. Розв'язана задача оптимізації, побудовано оптимальний профіль бажаності.

**Ключові слова:** шліфування; формоутворення; циліндричний вал; шорсткість; оптимізація, профіль бажаності.

Рис.: 11. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження спрямовані на виявлення та встановлення чинників, що найбільше впливають на точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні, є актуальним завданням у машинобудуванні.

**Постановка проблеми.** Шліфування – основний метод опоряджувальної обробки, є найбільш економічним, а в окремих випадках єдиним можливим. Тому дослідження, спрямовані на виявлення та встановлення чинників, що найбільше впливають на точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні, є актуальним науковим завданням, вирішення якого дозволить підвищити точність геометричної форми та якість поверхневого шару оброблених деталей та досягти більш продуктивної обробки шляхом правильного використання можливостей шліфувальних верстатів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасному машинобудуванні є два основних види шліфування: алмазне та абразивне. У роботі [1] встановлено, що на параметр якості поверхні суттєво впливають матеріал зерна абразиву, його зернистість, матеріал зав'язки та режими шліфування. У результаті проведених досліджень [2] побудовано математичну модель впливу глибини різання, швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола верстата при круглому алмазному шліфуванні. У роботі [3] наведено результати експериментального дослідження впливу складу інструменту та режимів різання тонкого алмазного шліфування. Виявлено основні закономірності формування шорсткості поверхонь та їх залежність від режимів різання. У процесі експериментальних досліджень [4; 5] визначено величину температури в зонах контакту шліфувального круга та деталі (на вході, у зоні контакту та на виході). У дослідженнях також наведено експериментально отримане значення об'ємного зносу абразивного круга.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутні комплексні експериментальні дослідження точності формоутворення з урахуванням максимальної кі-

© Єрошенко А. М., Дорошенко О. О., 2019

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лькості факторів. Не уточнений вплив досліджуваних факторів у порівнянні між собою на процес формоутворення.

**Мета статті.** Головною метою роботи є дослідження точності формоутворення поверхонь обертання при круглому шліфуванні на основі виявлення найбільш впливових факторів та встановлення їх оптимальних показників.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації мети роботи було заплановано проведення ряду експериментів. Планування першого експерименту проводилося на основі семи факторів: діаметр заготовки, матеріал заготовки, наявність попередньої термічної обробки заготовки, частота обертання заготовки, величина подачі, глибина різання, наявність попередньої правки круга. Інтервали варіювання факторів наведено на рис. 1. Обладнання: круглошліфувальний верстат моделі 3М 151, мікрометр МК 100–1 ГОСТ 6570-90, зразки шорсткості поверхні (порівняння) ГОСТ 9378-93, індикатор годинникового типу. Інструмент – абразивний шліфувальний круг 25AF46 ГОСТ 2424-83. Мазильно-охолоджуюче технологічне середовище – «СІМТЕСН» D18-02. Планування експерименту проводилось із використанням програми STATISTICA. Експеримент проводився згідно з планом Plackett-Burman (7/8). Матриця планування з додатковим стовпчиком результатів вимірюваної шорсткості оброблених поверхонь наведена на рис. 2.

Factor	Factor Name	Low Value	Low Label	High Value	High Label	C/Q Cont or Qual.
A (1)	Діаметр заготовки	30	Low	90	High	C
B (2)	Матеріал заготовки	сталь 45	Low	сталь 45X	High	C
C (3)	ТО заготовки	сира	Low	гартована	High	C
D (4)	Частота обертання	100	Low	160	High	C
E (5)	Подача	0,04	Low	0,12	High	C
F (6)	Глибина	0,01	Low	0,02	High	C
G (7)	Правка круга	без	Low	з	High	C

Рис. 1. Інтервали варіювання досліджуваних факторів

	1 Діаметр заготовки	2 Матеріал заготовки	3 ТО заготовки	4 Частота обертання	5 Подача	6 Глибина	7 Правка круга	8 Шорсткість за Ra
1	30,00000	-1,00000	-1,00000	160,0000	0,120000	0,020000	-1,00000	2,5
2	30,00000	-1,00000	1,00000	160,0000	0,040000	0,010000	1,00000	0,63
3	30,00000	1,00000	-1,00000	100,0000	0,120000	0,010000	1,00000	0,63
4	30,00000	1,00000	1,00000	100,0000	0,040000	0,020000	-1,00000	2,5
5	90,00000	-1,00000	-1,00000	100,0000	0,040000	0,020000	1,00000	2,5
6	90,00000	-1,00000	1,00000	100,0000	0,120000	0,010000	-1,00000	0,63
7	90,00000	1,00000	-1,00000	160,0000	0,040000	0,010000	-1,00000	1,25
8	90,00000	1,00000	1,00000	160,0000	0,120000	0,020000	1,00000	2,5

Рис. 2. Матриця планування та результат проведення експериментів

Результат проведеного оцінювання факторів наведено в таблиці сумарного впливу (рис. 3) та на діаграмі Парето (рис. 4). Перший стовпчик значень визначає ефект, або вплив кожного фактора на досліджуваний параметр. Найбільш впливовим є 6-й фактор – глибина різання. Другий стовпчик виражає коефіцієнти лінійної моделі процесу шліфування.

Effect Estimates; Var.: Шорсткість за Ra; R-sqr=1 7 Factor Screening Design DV: Шорсткість за Ra		
Factor	Effect	Coeff.
Mean/Interc.	1,642500	1,642500
(1)Діаметр заготовки	0,155000	0,077500
(2)Матеріал заготовки	0,155000	0,077500
(3)ТО заготовки	-0,155000	-0,077500
(4)Частота обертання	0,155000	0,077500
(5)Подача	-0,155000	-0,077500
(6)Глибина	1,715000	0,857500
(7)Правка круга	-0,155000	-0,077500

Рис. 3. Результат сумарного впливу факторів

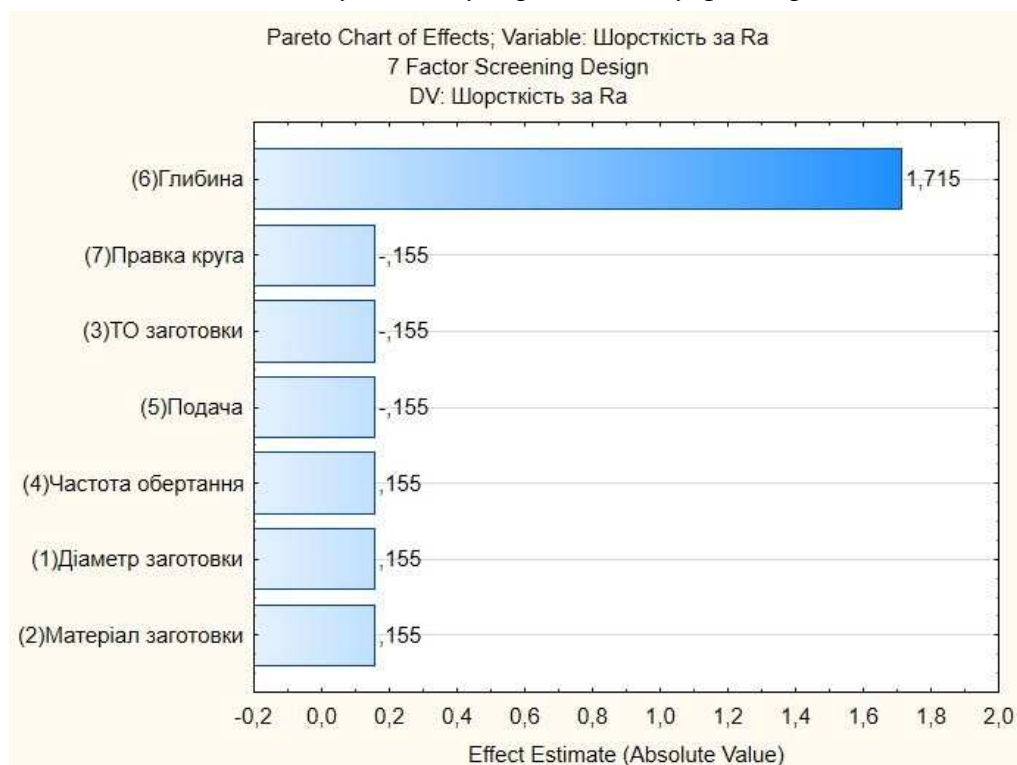


Рис. 4. Діаграма ефектів Парето

Оцінені маргінальні (групові) середні дають оцінки передбачених середніх значень для комірок моделі. Графіки профілів (графіки взаємодії) для цих середніх дозволяють легко візуалізувати досліджувані взаємозв'язки. На рис. 5 зображено графіки маргінальних середніх та графіки взаємодій різних досліджуваних факторів.

Аналізуючи наведені графіки, можемо зробити такі висновки:

1. Чим більший діаметр оброблюваної заготовки, тим меншу частоту обертання необхідно їй задавати з метою отримання меншої шорсткості (рис. 5, а).
2. Чим менша глибина різання, тим менша шорсткість оброблюваної поверхні незалежно від матеріалу (рис. 5, б).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Чим менша глибина різання, тим менша шорсткість оброблюваної поверхні незалежно від її частоти обертання (рис. 5, в).

4. Незалежно від діаметра заготовки для отримання меншої шорсткості необхідно задавати меншу глибину різання (рис. 5, з).

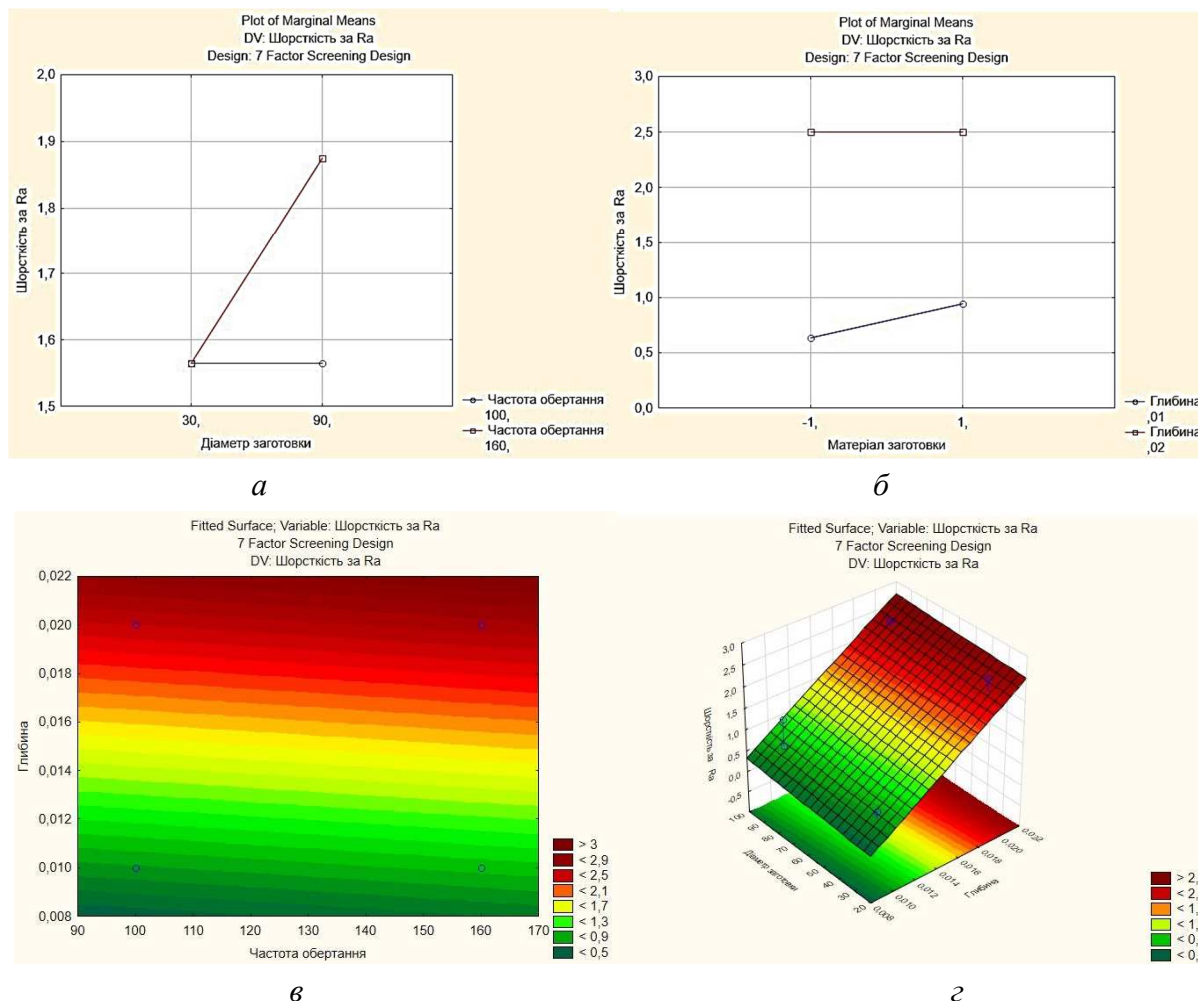


Рис. 5. Графіки маргінальних середніх (а, б) та графіки взаємодії (в, з)

Другий експеримент проводився на основі двох факторів: глибини різання (як найбільш впливовий фактор попереднього експерименту) та частоти обертання заготовки (як найбільш керований фактор серед досліджуваних). Інтервали варіювання наведено на рис. 6. Обладнання, інструмент та мастильно-охолоджуюче середовище не змінювались. Планування експерименту проводилось із використанням програми STATISTICA. Експеримент проводився згідно з центральним композиційним планом (2/1/10). Матриця планування з додатковим стовпчиком результатів вимірюваної шорсткості оброблюваних поверхонь наведена на рис. 7.

Factor	Factor Name	Low Value	Low Label	Center Value	Center Label	High Value	Hig Lab
A (1)	Частота обертання заготовки	120	Low	130	Center	140	High
B (2)	Глибина різання	0,02	Low	0,05	Center	0,07	High

Рис. 6. Інтервали варіювання досліджуваних факторів

Standard Run	2**(2) central composite, nc=4 ns=4 n0=2 Runs=10 (Spreadsheet)		
	Частота обертання заготовки, об/хв	Глибина різання, мм	Шорсткість за Ra, мкм
1	110,0000	0,020000	1,25
2	110,0000	0,070000	2,5
3	150,0000	0,020000	1,25
4	150,0000	0,070000	2
5	101,7157	0,050000	1
6	158,2843	0,050000	2
7	130,0000	0,014645	0,63
8	130,0000	0,085355	1
9 (C)	130,0000	0,050000	0,63
10 (C)	130,0000	0,050000	0,63

Рис. 7. Матриця планування та результат проведення експериментів

У процесі проведення статистичної обробки результатів проведених експериментів досліджуваний параметр шорсткості обирається як залежний параметр, а величини частоти обертання заготовки та глибини різання як незалежні. Діаграму Парето при врахуванні лінійних, квадратичних ефектів та їх взаємодії наведено на рис. 8. Найбільший вплив має квадратичний ефект частоти обертання заготовки.

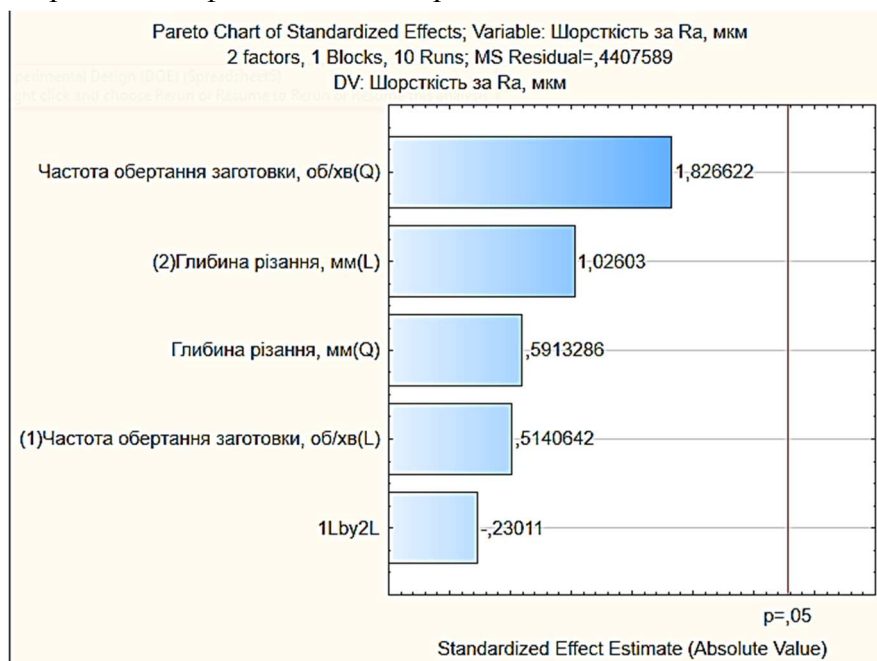


Рис. 8. Діаграма Парето лінійні та квадратичні ефекти з взаємодією

Змінюючи налаштування параметрів моделі на врахування лише лінійних ефектів, отримуємо результат більшого впливу частоти обертання заготовки (рис. 9).

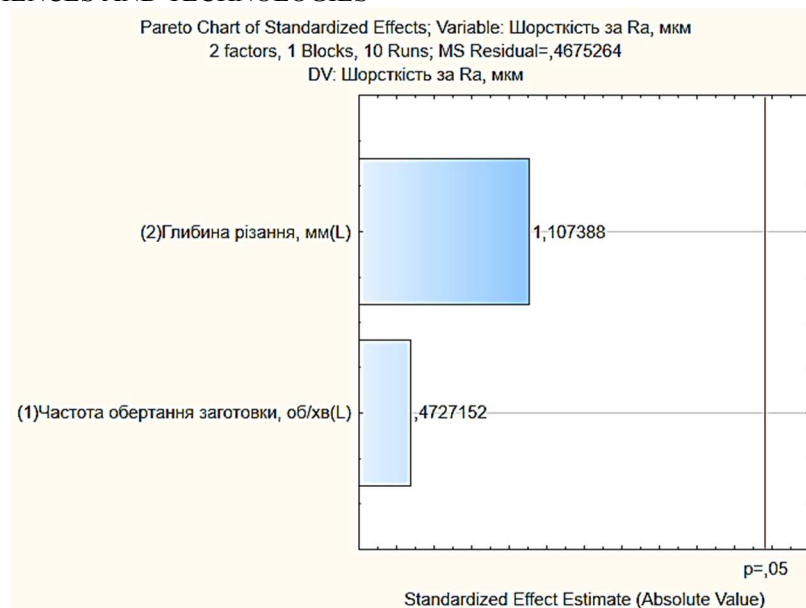
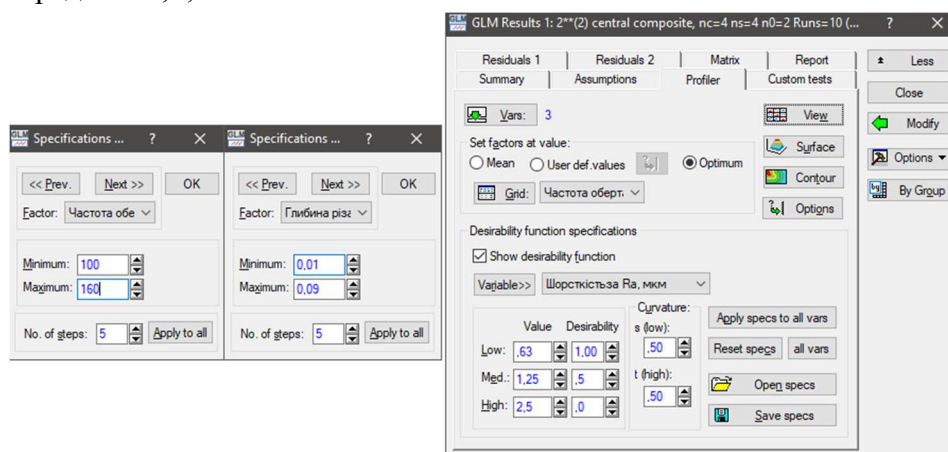


Рис. 9. Діаграма Парето лінійних ефектів

Оптимізаційна задача полягає в тому, щоб знайти рівні частоти обертання заготовки та глибини різання, які дадуть найкращий результат якості поверхні на основі використання функції бажаності.

В основі побудови функції бажаності лежать попередньо отримані результати досліджень, проведені за центральним композиційним планом. Параметри налаштувань мінімальних та максимальних значень факторів та кількість кроків їх розподілу (рис. 10, а) задаються відповідно до даних експериментальних досліджень. Межі досліджуваного параметру (шорсткості за Ra) (рис. 10, б) задаються у трьох категоріях: висока – 1; середня – 0,5; низька – 0.



а

б

Рис. 10. Параметри налаштувань факторів (а) та межі досліджуваного параметра (б)

На рис. 11 зображено оптимальний профіль бажаності. Рисунок складається з двох ліній графіків. Графік у правому верхньому куті відображає функцію бажаності [10]. Інші графіки верхньої лінії відображають зрізи підігнаної функції залежності (шорсткості за Ra) від відповідної залежної змінної при фіксації всіх інших змінних на оптимальних рівнях. Оптимальні рівні незалежних змінних відображені на графіках у нижній частині червоними лініями. У цій же серії графіків зображені зміни функції бажаності при варіюванні відповідних незалежних змінних.

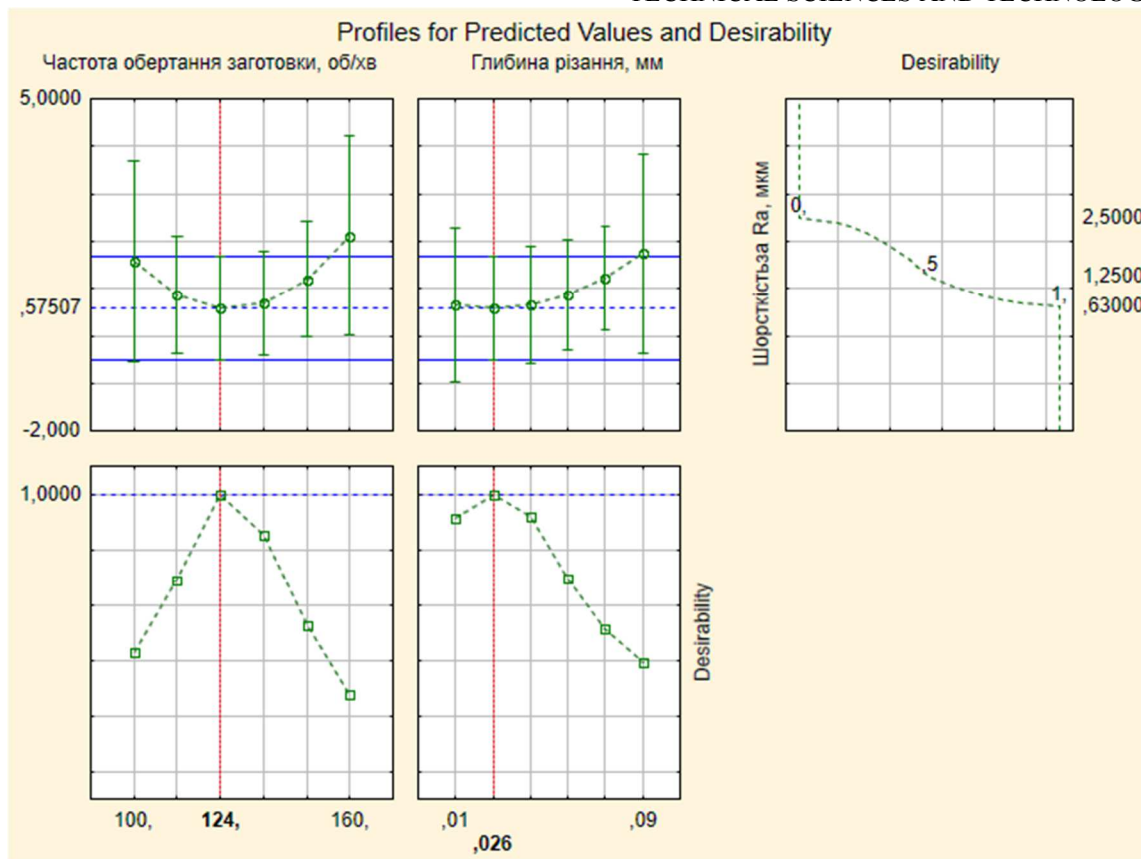


Рис. 11. Оптимальний профіль бажаності

У результаті аналізу отриманого профілю отримуємо значення шорсткості 0,57 мкм, при бажаності 1. Таке значення якості оброблюваної поверхні досягається при частоті обертання заготовки  $n = 124 \text{ хв}^{-1}$  та глибині різання  $t = 0,026 \text{ мм}$ . На практиці показники режимів різання треба округлити до цілих значень:  $n = 125 \text{ хв}^{-1}$ ,  $t = 0,03 \text{ мм}$ .

**Висновки відповідно до статі.** Проведені експериментальні дослідження точності формоутворення поверхонь обертання при круглому шліфуванні на базі семи факторів. За результатами експериментальних досліджень здійснено оцінювання факторів – найбільш впливовим серед оцінюваних є глибина різання. Проведено статистичну обробку, побудовано графіки маргінальних середніх та графіки взаємодій досліджуваних факторів. Проведені експериментальні дослідження та базі двох факторів із використанням центрального композиційного плану. За результатами оцінювання факторів найбільший вплив має квадратичний ефект частоти обертання заготовки. Побудований оптимальний профіль бажаності, у результаті оцінювання якого маємо значення параметра шорсткості 0,57 мкм при  $n = 125 \text{ хв}^{-1}$ ,  $t = 0,03 \text{ мм}$ .

#### Список використаних джерел

1. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні / А. П. Гавриш та ін. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2013. № 5. С. 119–127.
2. Роп'як Л. Я., Остапович В. В. Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття методом математичного планування експерименту. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2016. № 53. С. 130–138.
3. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Вплив складу інструмента і режимів тонкого алмазного шліфування на шорсткість поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2013. № 5. С. 80–86.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Кальченко В., Кальченко В., Єрошенко А., Сіра Н. Теоретичне та експериментальне дослідження процесу зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування циліндричних та ступінчастих валів зі схрещеними осями деталі та круга. *Технічні науки та технології*. 2016. № 4 (6). С. 35–43.
5. Kalchenko V. V., Yeroshenko A. M., Boiko S. V. Mathematical modeling of abrasive grinding working process. *Науковий вісник НГУ*. 2017. № 6(162). С. 76–82.
6. Портман В. Т., Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков. Москва, 1986. 320 с.
7. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. Москва: Машиностроение, 1974. 320 с.
8. Сіра Н.М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / ЧНТУ. Чернігів, 2017. 176 с.
9. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н. С. Равська й ін. Житомир: ЖІТІ, 2000. 332 с.
10. Пен Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации технологических процессов. *Международный журнал экспериментального образования*. 2017. № 2. С. 81–83.

## References

1. Havrysh, A. P., Shevchuk, A. V., Roik, T. A., Kovalov, V. A., Vitsiuk, Yu. Yu. (2013). Vplyv abrazyvnoho instrumentu na shorstkist poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv polihrafichnoi tekhniky pry tonkomu shlifuvanni [Influence of abrasive tool on surface roughness of composite bearings of polygraphic technique at thin grinding]. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» – Scientific reports of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 5, 119-127 [in Ukrainian].
2. Ropiak, L. Ia., Ostapovych, V. V. (2016). Doslidzennia vplyvu rezhymiv almaznoho shlifuvannia na shorstkist khromovoho pokryttia metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu [Investigation of the influence of diamond grinding regimes on the roughness of chromic coating by the method of mathematical planning of the experiment]. *Mizhvuzivskiy zbirnyk «Naukovi notatky» – Intercollegiate collection «Scientific Notes»*, 53, 130-138 [in Ukrainian].
3. Havrysh, A. P., Kyrychok, P. O., Roik, T. A., Vitsiuk, Yu. Yu. (2013). Vplyv skladu instrumenta i rezhymiv tonkoho almaznoho shlifuvannia na shorstkist poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv kovzannia polihrafichnykh mashyn [Influence of tool composition and modes of thin diamond grinding on roughness of surfaces of composite bearings of polygraphic machines slipping]. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» – Scientific reports of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 5, 80-86 [in Ukrainian].
4. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Sira, N. M. (2016). Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesu zniattia pryusku, znosu kruha, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzenosti pid chas shlifuvannia tsylindrychnykh ta stupinchastykh valiv zi skhreshchenymy osiamy detali ta kruha [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]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4(6), 35-43 [in Ukrainian].
5. Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Boiko, S. V. (2017). Mathematical modeling of abrasive grinding working process. *Naukovyi visnyk NHU – NSU Scientific Bulletin*, 6(162), 76-82.
6. Portaman, V. T., Reshetov, D. N. (1986). *Tochnost metallovezhushchih stankov [Accuracy of machine tools]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
7. Maslov, E. N. (1974). *Teoriia shlifovaniia materialov [Theory of grinding materials]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
8. Sira, N. M. (2017). *Pidvyshchennia efektyvnosti shlifuvannia tsylindrychnykh, stupinchastykh ta kryvoliniinykh poverkhon obertannia zi skhreshchenymy osiamy kruha ta detail [Increase the efficiency of grinding cylindrical, step and curvilinear surfaces of rotation with crossed axes of a circle and a part]*. (PhD thesis). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
9. Ravska, N. S., Rodin, P. R., Nikolaienko, T. P. (2000). *Osnovy formoutvorennia poverkhon pry mekhanichnii obrobtsi [Fundamentals of surface shaping under machining]*. Zhytomyr: ZhITI [in Ukrainian].
10. Pen, R. Z. (2017). Statisticheskie metody modelirovaniia i optimizatcii tekhnologicheskikh protsessov//Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia [Statistical methods for mode-



ling and optimization of technological processes]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia – International Journal of Experimental Education*, 2, 81-83 [in Russian].

UDC 621.923

*Andriy Yeroshenko, Oleksandra Doroshenko*

## FORMING ACCURACY OF THE SURFACE OF ROTATION AT GRINDING USING THE CUTTING FLUID

**Urgency of the research.** The research is aimed at identifying and identifying the factors that most affect the accuracy of forming the surfaces of the bodies of rotation when grinding is an urgent task in mechanical engineering.

**Target setting.** The accuracy of shaping surfaces of the bodies of rotation depends on the accuracy of linear dimensions, the quality of the surface to be treated, the accuracy of the shape and the relative arrangement of the surfaces. These parameters depend on many variables affecting the processing process. With round grinding, high precision can only be achieved with high loss of performance.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In known studies of the accuracy of the formation of surfaces of bodies of rotation when grinding, factors affecting the quality of the treated surface are considered independently of each other.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Research of the round grinding process in order to identify the most influential factors and establish their optimal values.

**The research objective.** Identification of the main and secondary factors influencing the formation of surfaces of bodies of rotation during round grinding. Setting the boundary values of the selected factors. Conduct experimental studies to obtain numerical values of accuracy parameters. Conduct statistical analysis of the obtained data and create a mathematical model of the process. Conduct a complete factor experiment to optimize the grinding process.

**The statement of basic materials.** The experimental researches of the accuracy of forming of surfaces of bodies of rotation at round grinding on the basis of revealing of the most influential variable factors in the categories: a machine tool and an equipment, a workpiece are made. The statistical estimation of factors according to Plackett-Burman (7/8) is carried out. A dispersion analysis of the experiment was conducted. The dependencies between the factors are revealed (graphs of marginal averages and graphs of interactions of factors are constructed). The most influential factor was found. A complete factor experiment, optimization of the process was conducted, with the aim of establishing optimal indexes of the most influential factors.

**Conclusions.** As a result of the conducted studies, the most influential factor in the process of round grinding of surfaces of bodies of rotation was revealed. The optimization problem is solved, the optimal profile of desirability is constructed.

**Keywords:** grinding; shaping; cylindrical shaft; roughness; optimization; profile of desirability.

Fig.: 11. References: 10.

**Єрошенко Андрій Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Yeroshenko Andriy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Wood technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** yeroshenkoam@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>

**ResearcherID:** G-6757-2014

**Scopus Author ID:** 57193700687

**Дорошенко Олександра Олександрівна** – магістрант кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Doroshenko Oleksandra** – master of mechanical engineering and wood technology department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** doroshenko.cntu@gmail.com