

Pavlo Yeromin, PhD tech. sci, **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Andrii Hrechka**, PhD tech. sci, Associate Professor, **Sviatskyi Volodymyr**, PhD tech. sci, Associate Professor.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Dimensional Accuracy of Engineering Plastic Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing

The current state of the use of additive FDM 3D printing technologies in the manufacturing of mating (interfacing) components made of engineering plastics has been investigated. The possibility of improving the geometric accuracy of plastic parts through the application of an enhanced 3D printing process has been substantiated. An improved methodology for evaluating the quality of manufactured parts is proposed, in particular with regard to the compliance of their actual geometric parameters with those specified in a specially developed 3D model. Additionally, recommendations have been developed for the selection of 3D printing parameters and for the adaptation of technological approaches to the fabrication of components from various grades of engineering plastics.

FDM technology, dimensional accuracy, engineering plastics, 3D printing

Одержано (Received) 01.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 01.04.2026

Прийнято до друку (Approved) 09.04.2026

УДК 656.338.12

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).52-65](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).52-65)

А. М. Красота, І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, **М. В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Р. А. Осін**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: krasotamy@ukr.net

Визначення оптимальних параметрів ФАБО кулачків розподільних валів

У статті представлені результати дослідження, спрямованого на покращення якості отримання антифрикційних покриттів під час використання фінішної антифрикційної безабразивної обробки кулачків розподільних валів автомобільних та тракторних двигунів. За критерії оптимізації було обрано умови якості антифрикційного покриття (суцільність, відносна шорсткість поверхні) та експлуатаційний показник – інтенсивність зношування зразка. Функціями відгуку були обрані режими ФАБО за визначеною схемою нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню кулачків розподільних валів. Після проведення багатофакторного експерименту, на основі результатів, було отримано серію математичних моделей у вигляді рівнянь регресії. Аналіз математичних моделей дозволив визначити оптимальні змінні значення режимних параметрів ФАБО.

Результати наданого дослідження дозволили визначити оптимальні режими ФАБО, а саме: тиск інструменту, швидкість ковзання інструменту та подача інструменту.

При заданих оптимальних параметрах було отримано прогнозовані значення вихідних змінних: суцільності покриттів, інтенсивності зношування та відносної шорсткості.

Встановлено, що зі збільшенням тиску до 60 МПа спостерігається зменшення інтенсивності зношування, проте подальше збільшення тиску має тенденцію до її зростання. При заданих швидкостях приблизно 2,0 м/с спостерігається збільшення суцільності покриття до досягнення максимальних значень, подальше збільшення швидкості ковзання негативно впливає на суцільність покриття через недостатнє заповнення мікрорельєфу та погане формування антифрикційного покриття. Збільшення подачі у всьому діапазоні негативно впливає на відносну шорсткість, тому під час обробки слід підтримувати мінімальні значення подачі.

антифрикційне покриття, розподільний вал, довговічність, багатокритеріальна оптимізація, технологічний параметр, зносостійкість

Постановка проблеми. Підвищення надійності та довговічності машин є однією з основних проблем сучасного машинобудування. Аналіз літературних джерел [1 - 4] показує, що головною причиною виходу з ладу машин є зношування деталей рухомих з'єднань під впливом сил тертя. Зважаючи на це, важливого значення отримує підвищення зносостійкості деталей технологічними методами, що визначають характеристики робочих поверхонь.

Розподільний вал автомобільного двигуна є однією з складних та дорогих деталей, що працює в умовах підвищених навантажень, а його робочі поверхні, такі як кулачки – працюють в умовах граничного мащення, отже піддаються інтенсивному зношуванню.

Серед технологічних методів підвищення зносостійкості поверхонь досить широко застосовується метод фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО). За даною технологією сталеві деталі для запобігання схоплюванню, покращення припрацювання та підвищення протизадирних властивостей покривають тонким шаром міді або її сплаву [5,6].

Моделювання умов роботи кулачків розподільних валів при наявності на їх робочих поверхнях антифрикційного покриття [7] дозволило стверджувати про ефективність такої технології.

Обґрунтування нової схеми ФАБО кулачків розподільних валів дало змогу запропонувати конструкцію пристрою для її здійснення [8].

При нанесенні захисних покриттів, в тому числі антифрикційних, обов'язково виникає необхідність у пошуку оптимальних технологічних параметрів процесу. При цьому як об'єкт оптимізації можуть прийматися компонування зносостійких шарів, їх максимальна товщина, технологічні параметри нанесення покриттів, їх властивості та ін. [9].

Якість антифрикційних покриттів, що отримуються в результаті ФАБО, значною мірою зумовлена режимами обробки, які визначають умови взаємодії інструмента з деталлю. У роботах [5, 6, 9, 10] досліджено вплив режимів ФАБО на суцільність та мікротвердість покриттів; зносостійкість, шорсткість та геометрію поверхні. Однак отримані результати мають відношення тільки до конкретної схеми нанесення антифрикційних покриттів, і кожна нова технологія ФАБО вимагає проведення окремих досліджень щодо обрання режимів обробки.

Отже, встановлення оптимальних параметрів процесу ФАБО з урахуванням особливостей обраної схеми нанесення антифрикційних покриттів є актуальним та важливим завданням, що потребує проведення спеціальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомості щодо досліджень впливу технологічних параметрів ФАБО на якість отримуваних покриттів відображені у роботах [9-12 та ін.].

У наведених публікаціях під якістю антифрикційних покриттів розуміють їх рівномірність, маслоємність, шорсткість, товщину та зносостійкість поверхні [8].

Автори робіт [13-15] вважають шорсткість поверхні як головний критерій оцінювання якості антифрикційного покриття.

В роботах [16, 17] якість зносостійких покриттів, отриманих в результаті ФАБО, визначали їх товщиною. Однак, слід відзначити, що має місце суперечлива інформація щодо значень цього показника. Визначено значення початкової шорсткості та рельєфу поверхні, що забезпечує необхідні умови для процесів мікрорізання латунного інструменту мікроставами профілю вихідної поверхні деталі, що обробляється, та підвищення інтенсифікації процесу нанесення покриття фрикційно-механічним методом.

Проте, в деяких випадках, наприклад, при обробці поверхонь нової деталі немає сенсу наносити покриття значної товщини, достатньо заповнити впадини мікрорельєфу та знизити таким чином коефіцієнт тертя поверхні та підвищити реальну площу контакту.

Також, в деяких роботах [11-16] немає однозначних рекомендацій щодо тиску інструменту на поверхню деталі, зустрічаються суттєві розбіжності від 0,1 МПа до 80 МПа. Такі значні відмінності у значеннях величини тиску, безумовно, потребують подальших уточнень, адже цей режимний параметр є одним з визначальних.

Лише в деяких роботах [6, 17] розглядаються такі параметри ФАБО як поздовжня подача інструменту та швидкість ковзання інструменту по поверхні. Однак ці параметри, на нашу думку, хоч і не є вирішальними, проте також суттєво впливають на якість антифрикційних покриттів. Зокрема, при обробці повинно забезпечуватися якісне заповнення западин мікрорельєфу антифрикційним матеріалом, а також часткове змінання виступів мікронерівностей. Також, в роботі [18] зазначено, що для протікання певних хімічних процесів у поверхнево-активному середовищі необхідно мати температуру близько 180-200 °С, яку можна досягти при певних швидкостях ковзання інструменту.

Огляд літературних джерел засвідчив, що автори розглянутих робіт досягли необхідних характеристик покриттів використанням різних технологічних прийомів та поверхнево-активних середовищ. Тому, отримати оптимальні режими, які б задовольняли різноманітним технологіям та схемам ФАБО, є неможливим.

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз впливу технологічних параметрів процесу ФАБО кулачків розподільних валів на якість антифрикційних покриттів та отримання їх раціональних значень.

Викладення основного матеріалу. Для визначення впливу основних факторів на зношування розподільних валів, виготовлених із сталі 18ХГТ, кулачки яких оброблялися фрикційно-механічним методом, було поставлено та проведено активний експеримент з використанням методів математичного планування [19].

Для попередніх досліджень використовували зразки, виготовлені із сталі 18ХГТ, що відповідає матеріалу деталі.

В якості вхідних параметрів розглянуто режими ФАБО при обраній схемі обробки кулачків [8]: тиск P , МПа, з яким інструмент діє на поверхню деталі; швидкість ковзання інструменту по поверхні, V_k , м/с; величина поздовжньої подачі інструменту s , мм/об. Розроблений склад технологічного середовища та параметр шорсткості підтримували постійним.

Вибір основного рівня та інтервалів варіювання проводився на основі попередніх експериментів. Рівні варіювання параметрів ФАБО наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання параметрів ФАБО

Параметр експерименту	Фактори		
	P , МПа	V_k , м/с	s , мм/об
Основний рівень	40,0	1,6	0,2
Інтервал варіювання	30,0	1,4	0,1
Верхній рівень (+1)	70,0	3,0	0,3
Нижній рівень (-1)	10,0	0,2	0,1

Джерело: розроблено авторами

При дослідженні розроблено та реалізовано повнофакторний експеримент типу 2^3 . Систематичні помилки виключали, виконуючи досліди у випадковій послідовності відповідно до рандомізованої матриці експерименту [20-22].

Для виявлення впливу вказаних факторів на значення показників, що характеризують якість антифрикційного покриття, також його трибологічні характеристики реалізовували матрицю центрального композиційного плану 2^3 +зіркові точки. При цьому, функціями відклику обрано:

1) суцільність покриття, яка оцінювалася співвідношенням S_n/S ;

де S_n – площа поверхні антифрикційного покриття, мм^2 ;

S – площа поверхні, що піддається обробці, мм^2 ;

2) інтенсивність зношування пари тертя I , 10^{-4} г/м;

3) відносна шорсткість поверхні $R_a/R_{a \text{ вих.}}$;

де R_a – величина шорсткості поверхні, що отримується після ФАБО;

$R_{a \text{ вих.}}$ – величина шорсткості поверхні до здійснення обробки.

Значення, що були отримані при реалізації матриці планування експерименту показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту 2^3 +зіркові точки

№ досліджу	P , МПа	V_k , м/с	s , мм/об	S_n/S	I , 10^{-4} г/м	$R_a/R_{a \text{ вих.}}$
	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	10,00	0,20	0,10	0,32	4,60	0,90
2	10,00	0,20	0,30	0,28	5,00	1,03
3	10,00	3,00	0,10	0,47	4,20	0,75
4	10,00	3,00	0,30	0,43	4,60	0,88
5	70,00	0,20	0,10	0,82	2,10	0,42
6	70,00	0,20	0,30	0,78	2,50	0,55
7	70,00	3,00	0,10	0,97	1,70	0,27
8	70,00	3,00	0,30	0,93	2,10	0,40
9	40,00	1,60	0,20	0,97	0,70	0,50
10	9,00	1,60	0,20	0,49	3,30	0,94
11	100,00	1,60	0,20	0,97	2,90	0,40
12	40,00	0,35	0,20	0,79	1,48	0,60
13	40,00	4,20	0,20	0,73	1,90	0,49
14	40,00	1,60	0,18	0,95	0,68	0,49
15	40,00	1,60	0,42	0,72	2,60	0,53
16	40,00	1,60	0,20	0,97	0,70	0,50

Джерело: розроблено авторами

Для виконання аналізу експериментальних даних використовували програму STATISTICA версії 12.0 [21], що дало можливість отримати статистичні математичні моделі для суцільності покриття S_n/S (Y_1), інтенсивності зношування I (Y_2) та відносною шорсткості поверхні $R_a/R_{a \text{ вих.}}$ (Y_3) при натуральних значеннях факторів.

$$Y_1(S_n/S) = -0,07733 + 0,02124 \cdot x_1 - 0,00015 \cdot x_1^2 + 0,25384 \cdot x_2 - 0,6086 \cdot x_2^2 + 1,82244 \cdot x_3 - 4,836 \cdot x_3^2; \quad (1)$$

$$Y_2(I) = 7,4751 - 0,1589 \cdot x_1 + 0,0014 \cdot x_2^2 - 1,2698 \cdot x_2 + 0,3276 \cdot x_2^2 - 15,4557 \cdot x_3 + 41,09 \cdot x_3^2; \quad (2)$$

$$Y_3(R_a/R_{a \text{ вих.}}) = 0,98425 - 0,01802 \cdot x_1 + 0,00012 \cdot x_1^2 - 0,12256 \cdot x_2 + 0,02088 \cdot x_2^2 + 1,38698 \cdot x_3 - 1,95982 \cdot x_3^3. \quad (3)$$

Адекватність отриманих моделей перевірялася системою STATISTICA в автоматичному режимі за критеріями Фішера, для перевірки однорідностей дисперсій використовується коефіцієнт Кохрена.

Значимість коефіцієнтів квадратного рівняння регресії перевіряли з використання розподіленням Парето.

Результати виконання факторного експерименту для оптимізації суцільності покриття (S_n/S) представлені на рис. 1.

Effect Estimates; Var.: S_n/S ; R-sqr=.98511; Adj.:.96279 (Spreadsheet150126)										
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=.0023										
DV: S_n/S										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,938251	0,024698	37,98964	0,000000	0,877818	0,998683	0,938251	0,024698	0,877818	0,998683
(1)P, МПа(L)	0,532388	0,032743	16,25960	0,000003	0,452269	0,612507	0,266194	0,016371	0,226134	0,306253
P, МПа(Q)	-0,278318	0,028922	-9,62296	0,000072	-0,349088	-0,207548	-0,139159	0,014461	-0,174544	-0,103774
(2)Vк, м/с(L)	0,132375	0,030398	4,35472	0,004798	0,057993	0,206756	0,066187	0,015199	0,028997	0,103378
Vк, м/с(Q)	-0,213705	0,029143	-7,33285	0,000329	-0,285016	-0,142393	-0,106852	0,014572	-0,142508	-0,071197
(3)s, мм/об(L)	-0,059861	0,016663	-3,59244	0,011470	-0,100634	-0,019088	-0,029930	0,008332	-0,050317	-0,009544
s, мм/об(Q)	-0,034819	0,009108	-3,82312	0,008729	-0,057105	-0,012534	-0,017410	0,004554	-0,028552	-0,006267
1L by 2L	-0,000000	0,032095	-0,00000	1,000000	-0,078533	0,078533	-0,000000	0,016047	-0,039266	0,039266
1L by 3L	0,000000	0,020347	0,00000	1,000000	-0,049787	0,049787	0,000000	0,010173	-0,024893	0,024893
2L by 3L	-0,000000	0,019257	-0,00000	1,000000	-0,047120	0,047120	-0,000000	0,009628	-0,023560	0,023560

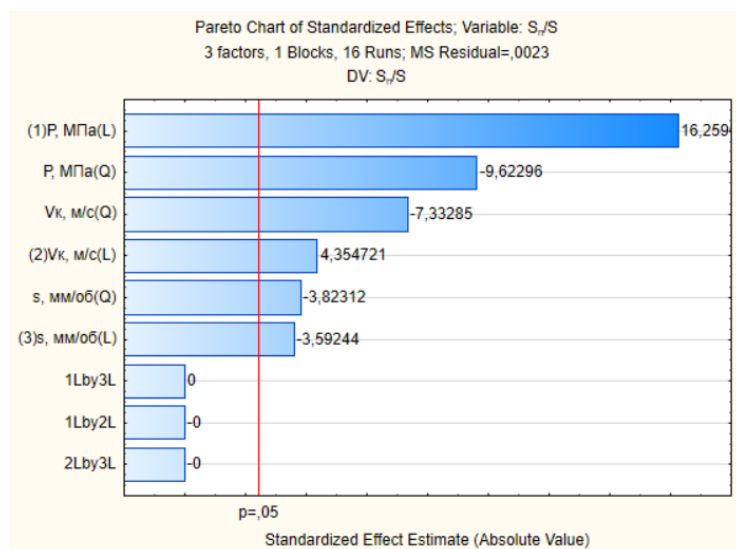
Рисунок 1 – Дані, отримані в ході реалізації центрального композиційного плану, що дозволили визначити вплив факторів на суцільність покриття S_n/S
Джерело: розроблено авторами

ANOVA; Var.: S_n/S ; R-sqr=.98511; Adj.:.96279 (Spreadsheet150126)					
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=.0023					
DV: S_n/S					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)P, МПа(L)	0,608049	1	0,608049	264,3747	0,000003
P, МПа(Q)	0,212979	1	0,212979	92,6013	0,000072
(2)Vк, м/с(L)	0,043615	1	0,043615	18,9636	0,004798
Vк, м/с(Q)	0,123670	1	0,123670	53,7707	0,000329
(3)s, мм/об(L)	0,029682	1	0,029682	12,9056	0,011470
s, мм/об(Q)	0,033617	1	0,033617	14,6163	0,008729
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
1L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
2L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Error	0,013800	6	0,002300		
Total SS	0,927076	15			

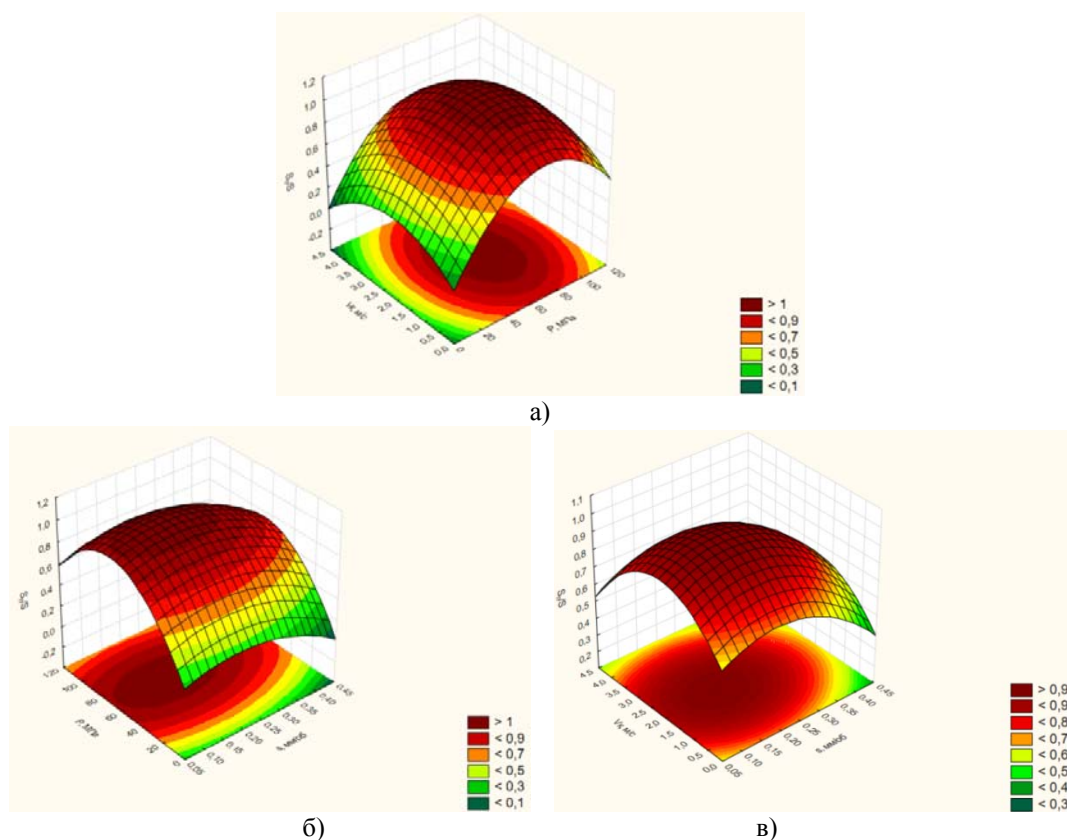
Рисунок 2 – Данні, отримані при визначенні статистичних показників в програмі STATISTICA 12 для аналізу впливу технологічних факторів на значення суцільності покриття S_n/S
Джерело: розроблено авторами

Виконавши дослідження Парето-карти та результатів, представлених на рис. 1 - 3 експерименту для суцільності покриття, можна дійти висновку, що максимальний вплив на суцільність покриття здійснюють тиск, швидкість та подача інструменту, а також їх квадратичні величини. Решта параметрів (добуток факторів) є незначимими.

Побудовані в результаті розрахунку поверхні відгуку та графічне зображення ліній рівного виходу, отримані для суцільності покриття представлені на рис. 4, а їх аналіз дає можливість зазначити, що максимальна суцільність забезпечується при наступних значеннях факторів: $P=40\dots80$ МПа; $V_k=1,5\dots2,5$ м/с; $s=0,15\dots0,25$ мм/об.

Рисунок 3 – Стандартизована Парето-карта для суцільності покриття $Y_1(S_n/S)$.

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 4 - Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_1(S_n/S)$:а) $Y_1 = f(x_1, x_2)$; б) $Y_1 = f(x_1, x_3)$; в) $Y_1 = f(x_2, x_3)$.

Джерело: розроблено авторами

Результати виконання факторного експерименту для оптимізації інтенсивності зношування ($Y_2(I)$) представлені на рис. 5.

Effect Estimates; Var.: $1 \cdot 10^{-4}$ r/m; R-sqr=,95828; Adj: ,89569 (Spreadsheet150126)										
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,2145405										
DV: $1 \cdot 10^{-4}$ r/m										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,86492	0,238533	3,62598	0,011018	0,28125	1,44859	0,86492	0,238533	0,28125	1,448588
(1)P, МПа(L)	-2,64345	0,316237	-8,35906	0,000159	-3,41725	-1,86964	-1,32172	0,158119	-1,70863	-0,934822
P, МПа(Q)	2,58477	0,279337	9,25324	0,000090	1,90126	3,26828	1,29238	0,139668	0,95063	1,634140
(2)Vк, м/с(L)	-0,45650	0,293589	-1,55491	0,170966	-1,17489	0,26188	-0,22825	0,146794	-0,58744	0,130941
Vк, м/с(Q)	1,15039	0,281473	4,08703	0,006451	0,46165	1,83913	0,57519	0,140736	0,23082	0,919563
(3)s, мм/об(L)	0,51209	0,160934	3,18201	0,019027	0,11830	0,90589	0,25605	0,080467	0,05915	0,452944
s, мм/об(Q)	0,29585	0,087962	3,36335	0,015167	0,08061	0,51108	0,14792	0,043981	0,04031	0,255542
1L by 2L	-0,00000	0,309976	-0,00000	1,000000	-0,75848	0,75848	-0,00000	0,154988	-0,37924	0,379241
1L by 3L	-0,00000	0,196513	-0,00000	1,000000	-0,48085	0,48085	-0,00000	0,098256	-0,24042	0,240425
2L by 3L	0,00000	0,185985	0,00000	1,000000	-0,45509	0,45509	0,00000	0,092993	-0,22754	0,227545

Рисунок 5 – Дані, отримані в ході реалізації центрального композиційного плану, що дозволили визначити вплив факторів на інтенсивність зношування I
Джерело: розроблено авторами

ANOVA; Var.: S_n/S ; R-sqr=,98511; Adj: ,96279 (Spreadst					
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0023					
DV: S_n/S					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)P, МПа(L)	0,608049	1	0,608049	264,3747	0,000003
P, МПа(Q)	0,212979	1	0,212979	92,6013	0,000072
(2)Vк, м/с(L)	0,043615	1	0,043615	18,9636	0,004798
Vк, м/с(Q)	0,123670	1	0,123670	53,7707	0,000329
(3)s, мм/об(L)	0,029682	1	0,029682	12,9056	0,011470
s, мм/об(Q)	0,033617	1	0,033617	14,6163	0,008729
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
1L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
2L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Error	0,013800	6	0,002300		
Total SS	0,927076	15			

Рисунок 6 – Дані, отримані при визначенні статистичних показників в програмі STATISTICA 12 для аналізу впливу технологічних факторів на інтенсивність зношування покриття I
Джерело: розроблено авторами

Виконавши дослідження Парето-карти та результатів, представлених на рис. 5 - 7 експерименту для інтенсивності зношування покриття, можна дійти висновку, що максимальний вплив на інтенсивність зношування мають тиск, швидкість та подача інструменту, а також їх квадратичні величини. Решта параметрів (добуток факторів) є незначимими.

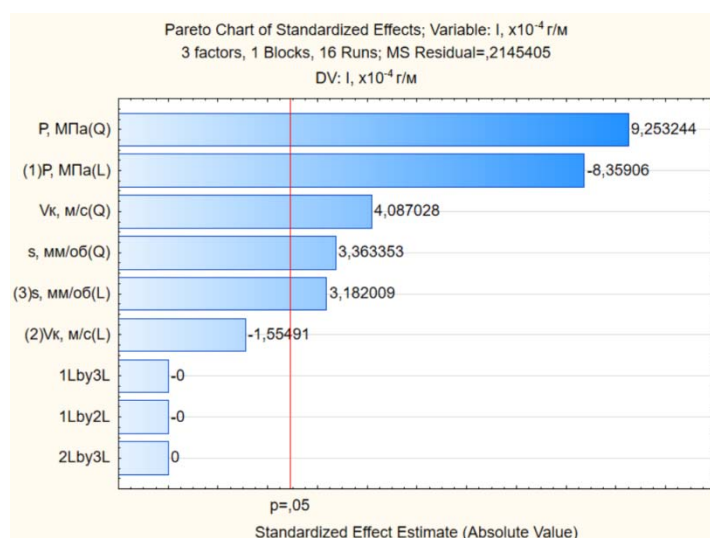


Рисунок 7 – Стандартизована Парето-карта для інтенсивності зношування покриття $Y_2(I)$.
Джерело: розроблено авторами

Побудовані в результаті розрахунку поверхні відгуку та графічне зображення ліній рівного виходу, отримані для інтенсивності зношування покриття представлені на рис. 8, а їх аналіз дає можливість встановити, що найменша інтенсивність зношування отримується при наступних значеннях факторів: $P=40\dots60$ МПа; $V_k=0,5\dots3,0$ м/с; $s=0,1\dots0,3$ мм/об.

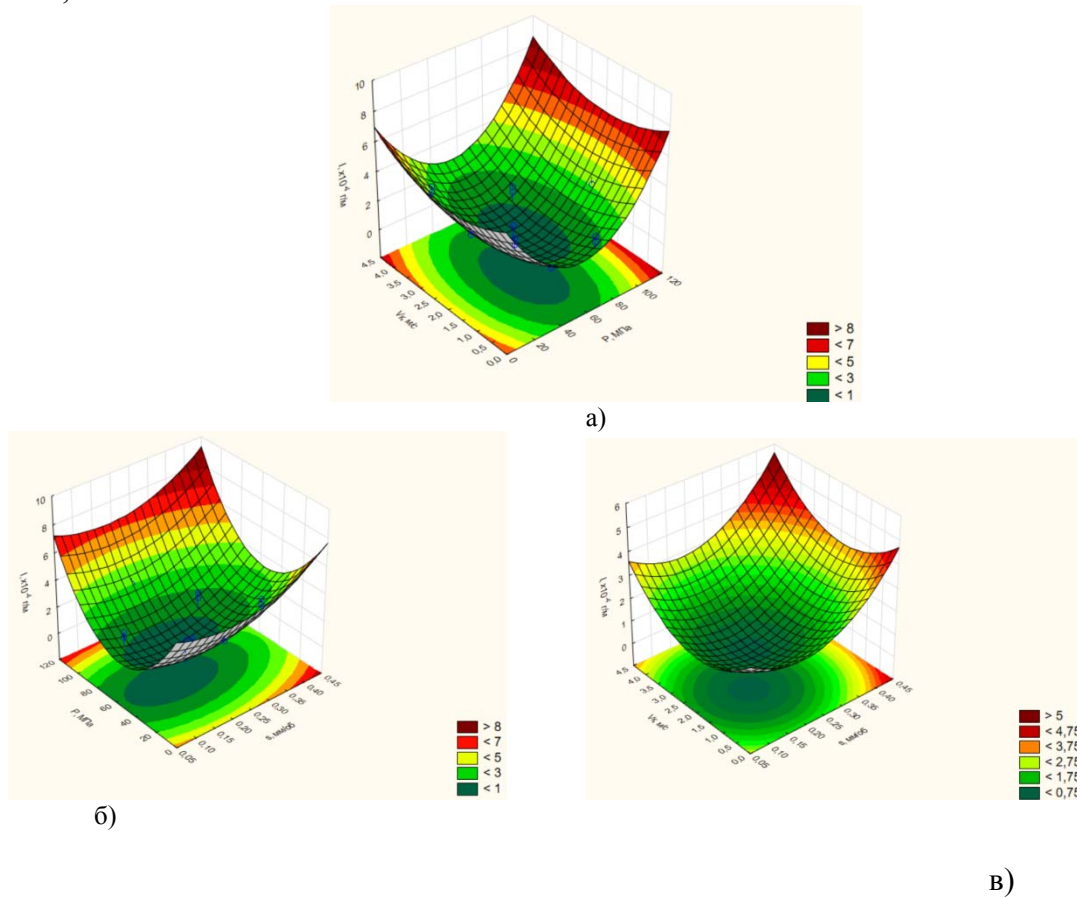


Рисунок 8 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_2(I)$:

а) $Y_2 = f(x_1, x_2)$; б) $Y_2 = f(x_1, x_3)$; в) $Y_2 = f(x_2, x_3)$.

Джерело: розроблено авторами

Результати виконання факторного експерименту для оптимізації відносної шорсткості $Y_3 (R_a/R_{a\text{вих}})$ представлені на рис. 9.

Effect Estimates; Var.: $R_a/R_{a\text{вих}}$; R-sqr=,98942; Adj., 97354 (Spreadsheet150126)											
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0013532											
DV: $R_a/R_{a\text{вих}}$											
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt	
Mean/Interc.	0,527324	0,018944	27,8356	0,000000	0,480969	0,573678	0,527324	0,018944	0,480969	0,573678	
(1)P, МПа(L)	-0,509467	0,025115	-20,2850	0,000001	-0,570922	-0,448012	-0,254733	0,012558	-0,285461	-0,224006	
P, МПа(Q)	0,214379	0,022185	9,6633	0,000070	0,160095	0,268663	0,107189	0,011092	0,080047	0,134331	
(2) V_k , м/с(L)	-0,139422	0,023317	-5,9795	0,000982	-0,196476	-0,082368	-0,069711	0,011658	-0,098238	-0,041184	
V_k , м/с(Q)	0,073315	0,022354	3,2797	0,016830	0,018616	0,128014	0,036658	0,011177	0,009308	0,064007	
(3)s, мм/об(L)	0,053551	0,012781	4,1898	0,005751	0,022276	0,084826	0,026776	0,006391	0,011138	0,042413	
s, мм/об(Q)	-0,014111	0,006986	-2,0199	0,089915	-0,031205	0,002983	-0,007055	0,003493	-0,015602	0,001492	
1L by 2L	0,000000	0,024618	0,0000	1,000000	-0,060238	0,060238	0,000000	0,012309	-0,030119	0,030119	
1L by 3L	0,000000	0,015607	0,0000	1,000000	-0,038189	0,038189	0,000000	0,007803	-0,019094	0,019094	
2L by 3L	-0,000000	0,014771	-0,0000	1,000000	-0,036143	0,036143	-0,000000	0,007385	-0,018071	0,018071	

Рисунок 9 – Дані, отримані в ході реалізації центрального композиційного плану, що дозволили визначити вплив факторів на відносну шорсткість $R_a/R_{a\text{вих}}$.

Джерело: розроблено авторами

ANOVA; Var.: $R_a/R_{a\text{вих}}$; R-sqr=,98942; Adj.: ,97354 (Spre: 3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0013532
DV: $R_a/R_{a\text{вих}}$

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)P, МПа(L)	0,556819	1	0,556819	411,4822	0,000001
P, МПа(Q)	0,126362	1	0,126362	93,3800	0,000070
(2)Vк, м/с(L)	0,048383	1	0,048383	35,7544	0,000982
Vк, м/с(Q)	0,014555	1	0,014555	10,7562	0,016830
(3)s, мм/об(L)	0,023755	1	0,023755	17,5544	0,005751
s, мм/об(Q)	0,005521	1	0,005521	4,0799	0,089915
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
1L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
2L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Error	0,008119	6	0,001353		
Total SS	0,767261	15			

Рисунок 10 – Данні, отримані при визначенні статистичних показників в програмі STATISTICA 12 для аналізу впливу технологічних факторів на відносну шорсткість $R_a/R_{a\text{вих}}$.
Джерело: розроблено авторами

Виконавши дослідження Парето-карти та результатів, представлених на рис. 9 – 11, для інтенсивності зношування (рис. 9 – 11) можна дійти висновку, що максимальний вплив на відносну шорсткість здійснюють тиск, швидкість та подача інструменту, а також квадрати тиску та швидкості ковзання. Решта параметрів – квадрат подачі, а також добуток факторів є незначимими.

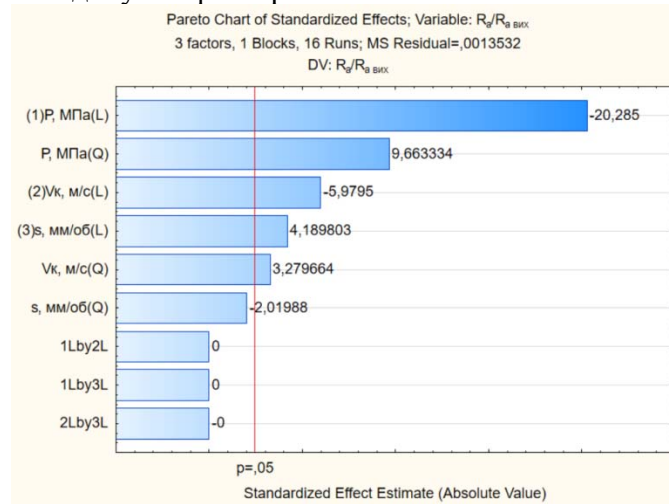
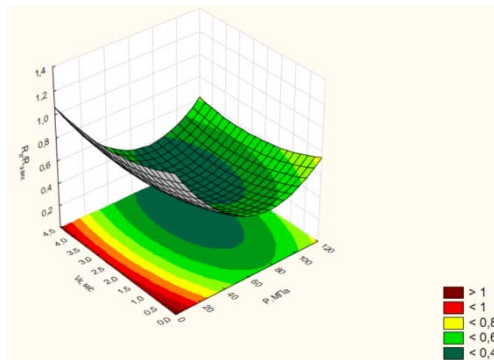
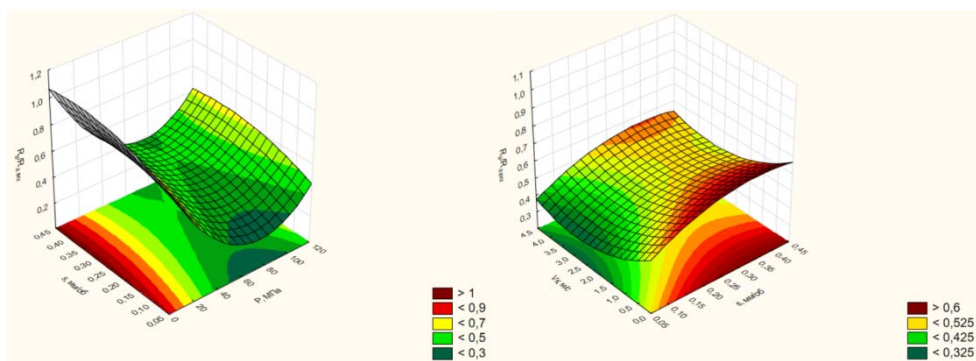


Рисунок 11 - Стандартизована Парето-карта для відносної шорсткості поверхні $Y_3(R_a/R_{a\text{вих}})$.
Джерело: розроблено авторами

Побудовані в результаті розрахунку поверхні відгуку та графічне зображення ліній рівного виходу, отримані для відносної шорсткості покриття наведені на рис. 12, а їх аналіз дає можливість стверджувати, що мінімальна відносна шорсткість забезпечується при наступних значеннях факторів: $P=60...100$ МПа; $V_k=1,5...4,0$ м/с; $s=0,05...0,1$ мм/об.



а)



б)

в)

Рисунок 12 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_3(R_a/R_{a \text{ вих}})$:

а) $Y_3 = f(x_1, x_2)$; б) $Y_3 = f(x_1, x_3)$; в) $Y_3 = f(x_2, x_3)$

Джерело: розроблено авторами

Графічне представлення результатів за допомогою діаграм розсіювання у поєднанні з гістограмами (рис. 13), які були встановлені з використанням програми STATISTICA 12.0 дозволяють отримати графічну інтерпретацію раціональних значень кожного фактора, з визначенням реальних значень суцільності покриття, інтенсивності зношування, відносної шорсткості поверхні [19].

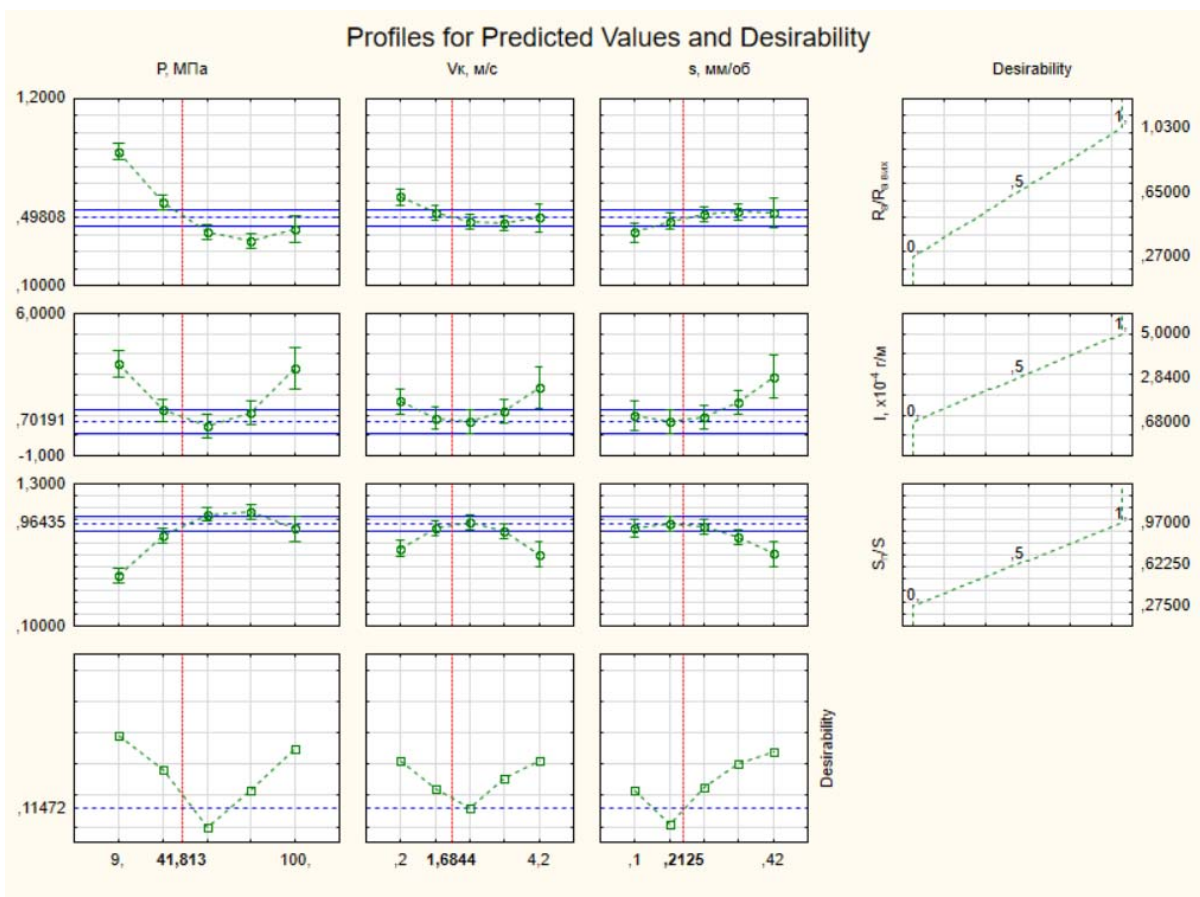


Рисунок 13 – Профілі для прогнозованих значень та бажаності критеріїв оптимізації, що характеризують вплив досліджуваних факторів на параметри покриттів, нанесених ФАБО
Джерело: розроблено авторами

Попередній аналіз отриманих результатів дає можливість визначити оптимальні режими, при яких інтенсивність зношування буде мінімальною: тиск інструмента – $P=41,8$ МПа; швидкість ковзання інструмента – $V_k=1,68$ м/с; подача інструмента – $s=0,21$ мм/об.

При вказаних оптимальних параметрах прогнозовані значення вихідних змінних складуть відповідно:

- суцільність покриття $S_n/S=0,92...0,96...1,0$;
- інтенсивність зношування $I=0,67\cdot 10^{-4}...0,7\cdot 10^{-4}...0,73\cdot 10^{-4}$ г/м;
- відносна шорсткість $R_a/R_{a\text{вих}}=0,45...0,49...0,53$.

При вивченні експериментальних графіків розсіювання (рис. 13) отримуємо можливість з'ясувати характер зміни факторів та встановити їх взаємний вплив на три критерії оптимізації.

Так, при підвищенні тиску до 70 МПа досягається максимальне значення суцільності покриття та мінімальна відносна шорсткість. Подальше збільшення тиску майже не приводить до покращення вказаних параметрів. При підвищенні тиску до 60 МПа відбувається зниження інтенсивності зношування, однак при подальшому збільшенні тиску інтенсивність зношування має тенденцію до збільшення. Цей факт може бути пояснений розміцненням (перенаклепу) поверхневих шарів та вириванням часток покриття внаслідок високої силової дії інструменту.

При значеннях швидкості ковзання близько 2,0 м/с відбувається збільшення суцільності покриття до максимальних значень, подальше збільшення швидкості ковзання негативно впливає на суцільність поверхні через недостатнє заповнення западин мікрорельєфу та неякісного утворення антифрикційного покриття.

При збільшенні швидкості ковзання інструменту до значень 2,0 м/с спостерігається зниження величини відносної шорсткості обробленої поверхні, що вказує на якісне заповнення западин антифрикційним матеріалом, а також змінання верхівок нерівностей поверхневого шару, при подальшому збільшенні швидкості значення відносної шорсткості майже не змінюються.

Також, при швидкостях до 2,0 м/с інтенсивність зношування поверхні спадає, при більших значеннях спостерігається її підвищення. Цей факт можливо пояснити гіршим формоутворенням покриття на високих швидкостях.

При величині подачі до значень 0,2 мм/об суцільність поверхні майже не змінюється, однак при більших значеннях спостерігається її зниження, що пояснюється недостатнім заповненням антифрикційним матеріалом западин нерівностей поверхні.

Також, при значеннях подачі до 0,2 мм/об інтенсивність зношування дещо знижується. Подальше збільшення величини подачі негативно впливає на інтенсивність зношування зразка через значне зниження якості покриття. Слід відмітити, що підвищення подачі у всьому діапазоні негативно позначається на відносній шорсткості, отже при обробці слід дотримуватися її мінімальних значень.

Висновки.

1. З метою отримання якісних покриттів, що формуються в результаті ФАБО, в роботі визначено критерії оптимізації, якими обрано показники, що характеризують якість нанесених антифрикційних покриттів, зокрема суцільність та відносну шорсткість поверхні, а також експлуатаційний показник – інтенсивність зношування поверхні. За параметри оптимізації прийнято основні режими ФАБО: тиск, швидкість ковзання та поздовжня подача інструменту. Експериментально визначено вплив технологічних параметрів процесу нанесення антифрикційних покриттів на їх якість.

2. Отримані математичні моделі, які встановлюють залежність параметрів якості антифрикційного покриття (суцільність, відносна шорсткість) та експлуатаційного показника покриття (інтенсивність зношування) від технологічних параметрів процесу

ФАБО, що дає можливість встановити вплив кожного з факторів на критерії, що підлягали оптимізації.

3. Встановлено оптимальні варіанти значень технологічних факторів, при яких отримуються якісні та експлуатаційні характеристики антифрикційних покриттів. Визначені раціональні значення режиму нанесення покриттів та геометричних параметрів вихідної поверхні.

Список літератури

1. Паніна В. В., Дашивець Г. І. Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигунів. *Праці ТДАТУ*. 2014. Т.1, № 4. С. 115-119.
2. Середа Б. П., Калініна Н. Є., Кругляк І. В. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія, Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2004. 230 с.
3. Савуляк В. І., Савуляк В. В. Зносостійкі покриття з градієнтними властивостями. *Вісник машинобудування і транспорту*. 2016. №1. С. 82 -88.
4. Косарчук В. В., Кульбовський І. І., Агарков О. В. Сучасні методи зміцнення і підвищення зносостійкості пар тертя. *Вісник Національного транспортного університету*. 2014. Вип. 31. С. 263-268.
5. Шепеленко І. В., Черкун В. В. Підвищення ефективності обробки цапф шестерень гідронасосів. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу 2021» (07 – 10 вересня 2021 р.)*, Вип. 7. Херсон: ХНТУ, 2021. С.109–112.
6. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. №4. С. 39 – 43.
7. Шепеленко І. В., Красота А. М., Красота М. В. Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. I, С. 179-189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.179-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189)
8. Шепеленко І.В., Красота А.М., Гуцул В.І., Красота М.В. Обґрунтування конструкції пристрою для обробки кулачків розподільних валів фрикційно-механічним методом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11 (42), ч.ІІ. С.169–176. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.169-176](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.169-176)
9. Пошук оптимальних параметрів фінішної антифрикційної безабразивної обробки гільз циліндрів автотракторних двигунів. / Шепеленко І.В., Черновол М.І., Лещенко С.М., Красота М.В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. II. С. 11–23. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.11-23](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.11-23).
10. Mykhaïlo Chernovol, Shepelenko Igor, Budar Mohamed R.F. Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2015. Вип. 45(1). С. 10–13. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/212810>.
11. Кубич В. І., Юдиценко О. В., Блощинська Н. В. Феноменологічний підхід до оцінки трибологічного стану з'єднань ЦПГ ДВЗ. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2016. № 2. С. 44–50. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.2.08
12. Shepelenko I. Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*. 2021. 26(2/100). P. 50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>
13. Shepelenko I. The study of surface roughness in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Problems of Tribology*. 2020. 25(1/95), 34–40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40>
14. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Stephyn Y., Mahopets S., Melnyk O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19.
15. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К. Підвищення якості антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022. Т. 6, № 1. С.24–30. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655>.
16. Shepelenko I., Cherkun V., Warouma A. Improvement of finishing antifriction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries. *Int J Agric Res Innov Technol*. 2014. № 4(1). P. 98–101. <https://ageconsearch.umn.edu/record/305359/>

17. Nemyrovskiy Y., Shepelenko I., Posviatenko E., Chernovol M., Zlatopolskiy F. Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*. 2022. №27(1/103). P. 14–25. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25>
18. Krasota, A., Shepelenko, I., Krasota, M. (2025). Physical and chemical processes in the application of antifriction coatings by the friction-mechanical method. *Problems of Tribology*. 30(1/115), Pp. 66–73.
19. Статистичні методи обробки та аналізу експериментальних даних / Ю. В. Кулешков та ін. ; ред. Ю. В. Кулешков ; Кіровоградський держ. технічний ун-т. - Кіровоград : КДТУ, 2002. 133 с.
20. Черкун В.В. Оптимізація режимів ФАБВО . *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2006. Вип. 5, т.1. С. 184 - 186.
21. Фетісов В. С. Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA . Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. 114 с.
22. Маханець Л.Л., Вінничук О.Ю., Григорків М.В. Статистика. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2023. 161 с.

References

1. Panina, V.V., & Dashyvets, H.I. (2014). Increasing the wear resistance of engine cylinder liners. *Proceedings of the TSATU*, 1, 4, 115-119 [in Ukrainian].
2. Sereda, B.P., Kalinina, N.Ye., & Kruhliak, I.V. (2014). Surface hardening of materials . Zaporizhzhia: RVV ZDIA [in Ukrainian].
3. Savuliak, V.I. & Savuliak, V.V. (2016). Znosostiiki pokryttia z hradiientnyimi vlastyvostiamy. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 1, 82 -88 [in Ukrainian].
4. Kosarchuk, V.V. Kulbovskiy, I.I., & Aharkov, O.V. (2014). Suchasni metody zmitsnennia i pidvyshchennia znosostiikosti par tertia. *Bulletin of the National Transport University*. 31, 263-268 [in Ukrainian].
5. Shepelenko, I.V., & Cherkun, V.V. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti obrobky tsapf shesteren hidronasosiv/ I.V. Shepelenko, *Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnologii promysloвого kompleksu - 2021»* (07 – 10 veresnia 2021 r.), Vol. 7. Kherson: KhNTU, P.109–112 [in Ukrainian].
6. Kosiuk, M.M., Kostiuk, S.A., & Kostiuk, M.A. (2018). Technological support for applying antifriction coating on incomplete spherical surfaces by friction-mechanical method. *Bulletin of Khmelnytsky National University*, 4, 39 – 43 [in Ukrainian].
7. Shepelenko I. V., Krasota A. M., & Krasota M. V. (2025). Zmina napruzhenno-deformovanoho stanu robochoi poverkhni detali z antyfryktsiynym pokryttiam. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Papers*. Vyp. 11(42), ch. I. P. 179-189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.179-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189) [in Ukrainian].
8. Shepelenko I.V., Krasota A.M., Hutsul V.I., & Krasota M.V. (2025). Substantiation of the Design of a Device for Machining Camshaft Cams by the Friction-Mechanical Method. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Papers*, №11 (42)_II, 169–176. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.169-176](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.169-176). [in Ukrainian].
9. Shepelenko, I. V., Chernovol, M. I., Leshchenko, S. M., Krasota, M. V., Nemyrovskiy, Ya. B., Shumliakivskiy, V. P. (2023). Search for optimal parameters for finishing antifriction non-abrasive treatment of cylinder liners of autotractor engines. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Collection of Scientific Papers*, 8(39), II, 11–23 [in Ukrainian].
10. Mykhailo Chernovol, Shepelenko Igor, & Budar Mohamed R.F. (2015). Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *esign, Production and Exploitation of Agricultural Machines: National Interd. Sci.&Tech.1 Coll.*, 45(1), 10–13. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/212810>. [in Ukrainian].
11. Kubych, V. I., Yudytsenko, O. V., & Bloshchynska, N. V. (2016). Phenomenological approach to assessing the tribological condition of CPG joints of internal combustion engines. *Internal combustion engines*, 2, 44–50. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.2.08 [in Ukrainian].
12. Shepelenko, I. (2021). Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*, 26(2/100), 50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>.
13. Shepelenko, I. (2020). The study of surface roughness in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Problems of Tribology*, 25(1/95), 34–40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40>.
14. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., & Melnyk, O. (2024). *Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching*. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*.

- Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19. [in Switzerland]
15. Shepelenko, I.V., Nemyrovskiy, Ya.B., & Posviatenko, E.K. (2022). Improving the quality of antifriction coatings using plastic deformation. *Mechanics and Advanced Technologies*. Т. 6, № 1. P.24–30. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655> [in Ukrainian].
 16. Shepelenko, I., Cherkun, V., & Warouma, A. (2014). Improvement of finishing antifriction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries. *Int J Agric Res Innov Technol*. № 4(1). P. 98–101. <https://ageconsearch.umn.edu/record/305359> [in Bangladesh].
 17. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Posviatenko, E., Chernovo, I M., & Zlatopolskiy, F. (2022). Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*, 27(1/103), P. 14–25. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25>
 18. Krasota, A., Shepelenko, I., & Krasota, M. (2025). Physical and chemical processes in the application of antifriction coatings by the friction-mechanical method. *Problems of Tribology*, 30(1/115), 66–73. [in Ukrainian].
 19. Kulieshkov, Yu. V. et al. (2002). *Statystychni metody obrobky ta analizu eksperymentalnykh danykh*; Yu. V. Kulieshkov (Ed.); Kirovohradskiy derzh. tekhnichnyi un-t. Kirovohrad : KDTU [in Ukrainian].
 20. Cherkun, V.V. (2006). Optymizatsiia rezhymiv FABVO/V.V. Cherkun . *Proceedings of the TSATU*, 5, 1, 184 – 186. [in Ukrainian].
 21. Fetisov, V. S. (2018). Paket statystychnoho analizu danykh . Nizhyn : NDU im. M. Hoholia [in Ukrainian].
 22. Makhnats, L.L., Vinnychuk, O.Yu., & Hryhorkiv, M.V.(2023). Statystyka. Chernivtsi : *Chernivets. nats. un-t im. Yu. Fedkovycha* [in Ukrainian].

Artem Krasota, Ihor Shepelenko, Prof., DSc., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determining the Optimal Parameters of Camshaft Cams FANT

The purpose of this work is to analyze the influence of technological process parameters of camshaft cams finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) on the quality of antifriction coating and to obtain their rational values.

The paper presents the research results, aimed at improving the quality of obtaining antifriction coatings during the utilization of finishing antifriction non-abrasive treatment of camshaft cams in automotive and tractor engines. For the criteria of optimization, the conditions of antifriction coating quality (continuity, relative surface roughness) and operational indicator – wear intensity of the sample were chosen. Response functions were the regimes of FANT under a defined scheme of applying the antifriction coatings to the working surface of the camshaft cams. After performing a multifactor experiment, based on the results, a series of mathematical models in the form of regression equations were obtained. The analysis of mathematical models allowed optimal variable values of regime parameters of FANT to be determined.

The results of the provided research yielded optimal regimes of FANT, namely the tool pressure, tool sliding velocity, and tool feed.

At the specified optimal parameters, predicted values of output variables: coatings continuity, wear intensity, and relative roughness were obtained.

Established that as the pressure increases to 60 MPa, there is a decreasing of wear intensity, however further pressure increasing has a tendency to wear intensity increasing. With specified velocities of approximately of 2,0 m/s, there is an increasing in coating continuity until it reaches maximum values, further increase of sliding velocity has a negative impact on the coating continuity due to insufficient filling of microrelief and poor formation of antifriction coating. Increasing the feed in the entire range has a negative impact on the relative roughness, therefore minimum feed values should be maintained during the treatment.

antifriction coating, camshaft, durability, multicriteria optimization, technological parameter, wear resistance

Одержано (Received) 26.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026