

УДК 621.787.4

DOI: [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)

**І.В. Шепеленко**, проф., д-р техн. наук, **М.І. Черновол**, академік НААН України, проф., д-р техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
e-mail: [kntucpfzk@gmail.com](mailto:kntucpfzk@gmail.com)

**Я.Б. Немировський**, проф., д-р. техн. наук, **В.П. Шумляківський**, доц., канд. техн. наук  
*Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, Україна*

## Пошук оптимальних параметрів фінішної антифрикційної безабразивної обробки гільз циліндрів автотракторних двигунів

В роботі представлені результати досліджень, які спрямовані на підвищення якості отримання антифрикційних покриттів при використанні фінішної антифрикційної безабразивної обробки гільз циліндрів автомобільних і тракторних двигунів. За показники якості антифрикційного покриття обрано його суцільність, шорсткість поверхні та масоперенесення антифрикційного матеріалу. Параметрами оптимізації є основні режими фінішної антифрикційної безабразивної обробки, а також геометричні характеристики вихідної поверхні, що обробляється. В результаті реалізації багатфакторного експерименту отримані статистичні моделі, що дають можливість оцінити вплив досліджувальних факторів на критерії оптимізації. Аналіз математичних моделей дозволив визначити оптимальні варіанти поєднання технологічних факторів, що забезпечують якість покриття, а також встановити раціональні значення режимів фінішної антифрикційної безабразивної обробки та геометричних характеристик вихідної поверхні.

**антифрикційне покриття, гільза циліндрів, автотракторні двигуни, якість покриття, багатокритеріальна оптимізація, технологічні параметри, геометричні характеристики поверхні**

**Постановка проблеми.** Загальновизнаним напрямком підвищення якості робочих поверхонь деталей машин та механізмів є розробка та широке застосування захисних покриттів [1]. Особливе місце серед таких покриттів займають антифрикційні, які маючи низький коефіцієнт тертя, у відповідності до призначення забезпечують сприятливі антифрикційні властивості [2]. З усього різноманіття способів отримання антифрикційних покриттів перевагу слід віддати покриттям з оптимальними значеннями твердості та модуля пружності, з підвищеними антифрикційними властивостями, а також таким, що забезпечують створення сприятливих внутрішніх напружень, максимальних адгезійних характеристик покриття з основним матеріалом [3]. Саме такі властивості притаманні покриттям, які отримуються при використанні фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО) гільз циліндрів автотракторних двигунів [4].

Створення будь-якого захисного покриття, в тому числі антифрикційного, неминуче пов'язане з пошуком та розв'язанням оптимізаційної задачі. При цьому об'єктом оптимізації можуть бути компоновка шарів, їх товщина, технологічні режими нанесення, властивості покриттів та ін. [5].

Формування антифрикційного покриття при ФАБО багато в чому залежить від технологічних параметрів, що визначають умови контактування інструменту з оброблюваною поверхнею, а форма і розміри мікронерівностей, як переконливо

доведено у роботах [6-8], визначають якість отриманого покриття. Дослідження особливостей контактування поверхонь, їх закономірностей, а також основних параметрів процесу ФАБО, дає змогу підвищити якість антифрикційного покриття, а отже, й експлуатаційні властивості деталі. Широке застосування ФАБО стримується відсутністю науково-обґрунтованих даних щодо зв'язку технологічних факторів процесу з геометричними параметрами поверхневого шару, і насамперед, із шорсткістю, яка, на думку дослідників [9, 10 та ін.], є одним з основних критеріїв якості отриманого покриття. У зв'язку з цим вельми актуальними видаються дослідження та пошук оптимальних значень параметрів процесу ФАБО, що забезпечують формування якісного антифрикційного покриття з врахуванням умов контактної взаємодії антифрикційного інструменту з оброблюваною поверхнею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Антифрикційні властивості покриттів можуть бути оцінені такими показниками: рівномірністю нанесених покриттів, їх маслоємністю, шорсткістю, товщиною покриття та зносостійкістю поверхні [11]. На наш погляд, всі ці вимоги цілком можуть визначати якість покриттів, отриманих ФАБО.

У ряді досліджень [12-14], присвячених утворенню антифрикційного покриття ФАБО, автори приймають шорсткість поверхні за основний критерій оцінювання якості плівки, що наноситься.

З огляду на те, що параметри шорсткості поверхні багато в чому визначають інтенсивність зношування пар тертя, певним чином впливають на показники її фізичного стану (наклеп, внутрішні напруження, мікротріщини, структуру), корозійну стійкість та надійність нерухомих з'єднань деталей, тому параметр  $R_a$  (середнє арифметичне відхилення профілю) цілком можливо використати за один з показників якості покриття. У зв'язку з тим, що авторами робіт [15, 16] отримано та обґрунтовано вихідний мікрорельєф поверхні для створення сприятливих умов для мікрорізання антифрикційного матеріалу мікровиступами вихідної поверхні та інтенсифікації процесу утворення покриття фрикційно-механічним методом, постає необхідність проведення спеціальних досліджень впливу технологічних параметрів ФАБО на шорсткість поверхневого шару.

В роботі [17] якість покриття, отриманого ФАБО, оцінювали її товщиною. Однак, слід відзначити наявність суперечливої інформації щодо величини цього показника. Так автори робіт [18-20] отримали товщину покриття фрикційно-механічним методом ФАБО у межах 0,3 – 0,5 мкм, а в роботі [21] вказано товщину покриття порядку 10 мкм. Така велика відмінність у результатах свідчить про необхідність проведення додаткових досліджень задля визначення об'єктивних даних щодо величини цього показника якості покриття.

Оптимізації процесу нанесення захисних покриттів присвячено низка досліджень [5, 22 та ін.]. При цьому якість обробки оцінювали за допомогою балів, а параметрами слугували: колір покриття; зменшення довжини натираючого стрижня – інтенсивність натирання; рівномірність покриття (його суцільність); згладжування шару покриття. Такий підхід до оцінки якості покриття та ефективності технології ФАБО є не зовсім точним, оскільки колір, товщина, пористість та інші показники є непрямими характеристиками якості покриття, які можуть бути прийняті на етапі відпрацювання технології нанесення покриттів. На етапі експлуатації виробу першорядною властивістю покриття слід вважати його здатність чинити опір зношуванню (зносостійкість).

Показниками якості покриття можуть також виступати адгезія покриття до основного матеріалу [5, 22, 23], напружено-деформований стан поверхневого шару [24, 25], характеристики міцності покриття тощо [5].

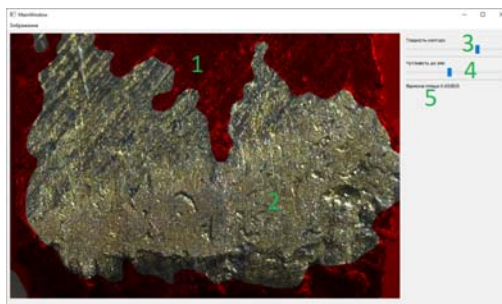
Наведені дані літературних джерел не дають змоги дати оцінку ефективності технології ФАБО з точки зору якості отриманих покриттів. У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні досліджень щодо визначення впливу технологічних параметрів процесу ФАБО на якість покриття, отриманого фрикційно-механічним методом.

В роботі [5] представлено методологію оптимізації технологій нанесення покриттів за критеріями міцності та зносостійкості, які забезпечують максимально можливу міцність та довговічність деталі з покриттям за мінімальних витрат на процес нанесення покриттів. Перспективи використання напряму оптимізації методом факторного планування експерименту переконливо доведені на таких технологіях, як газополум'яне та детонаційне напилення [26], вакуумплазмове напилення [27], електроіскрове легування [28], іонне азотування [29]. Стосовно ФАБО такий підхід не використовувався.

**Постановка завдання.** Метою представлених досліджень є оцінка впливу технологічних факторів процесу ФАБО на якість антифрикційних покриттів та отримання їх раціональних значень.

**Методика проведених досліджень.** За критерії оптимізації були прийняті наступні показники якості антифрикційного покриття:

1. Відносна площа покриття  $S_n/S$ , де  $S_n$  – площа покриття;  $S$  – площа досліджуваної поверхні. Величину площі покриття визначили виходячи з результатів металографічного аналізу поверхні, використовуючи методи цифрової обробки зображень на ПК (рис.1). З цією метою була написана програма на мові C++ з використанням фреймворка Qt і бібліотек обробки зображення OpenCV [30].



1 – зона без покриття; 2 – зона з покриттям; 3, 4 – регулятори, які дозволяють пристосувати алгоритм виділення до можливостей камери; 5 – відношення зони з покриттям до загальної площі

Рисунок 1 – Інтерфейс програми для визначення площі покриття

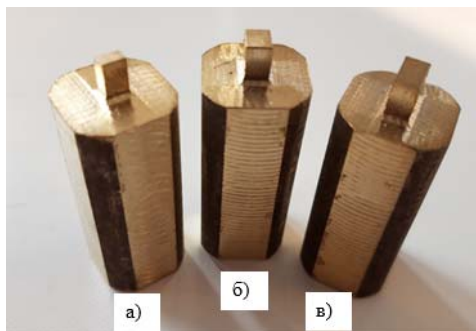
*Джерело: розроблено авторами*

2. Маса покриття  $m$ . Величину масоперенесення визначали шляхом визначення різниці маси латунного інструменту до і після ФАБО.

3. Зміна значення висотного параметра  $R_a$  (середнього арифметичного відхилення профілю), який вимірювали за допомогою профілографа Mahr XR20. Причому за значення  $R_a$  застосовували його середнє значення, що було отримано в результаті трьох вимірів.

В якості параметрів оптимізації обрано основні режими ФАБО при вибраній схемі обробки: шлях тертя  $L$ , навантаження на інструмент  $P$ , а також довжина опорної поверхні оброблюваного зразка  $\Delta l$ .

Шлях тертя  $L$  змінювали в межах 2...30 мм за рахунок варіювання довжини латунного інструменту  $l$  (рис.2) і кількості його проходів  $n$ .



а)  $l = 2$  мм; б)  $l = 4$  мм; в)  $l = 6$  мм

Рисунок 2 – Латунний інструмент для ФАБО з довжиною її робочої частини:

Джерело: розроблено авторами

Сили, що припадають на 1 мікронерівність 1 мм її ширини  $P_{\Sigma}$ , визначали згідно залежності  $\frac{P_{\Sigma} \cdot S}{L \cdot b}$ , де  $P_{\Sigma}$  – сумарна сила,  $\frac{L}{S}$  – число виступів мікрорельєфу,  $b$  – ширина інструменту,  $S$  – подача верстату.

Величину опорної поверхні досліджуваного зразка (рис.3), а отже протяжність контакту з інструментом, варіювали в межах  $\Delta l = 0,2 \dots 0,6$  мм на підставі отриманих раніше закономірностей [31].

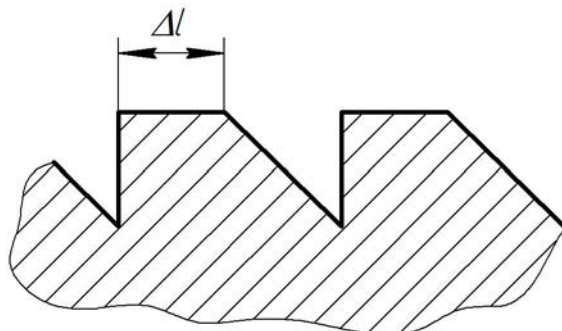


Рисунок 3 – Форма мікрорельєфу досліджуваного зразка

Джерело: розроблено авторами

Метою серії дослідів була реалізація матриці центрального композиційного плану  $2^3$ +зіркові точки, в результаті чого встановлено вплив ряду факторів ( $L \times n$  (сумарного шляху тертя),  $P_{\Sigma}$  (сили, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини),  $\Delta l$  (довжини контакту) на показники, що характеризують якість покриття, отриманого ФАБО.

Для встановлення впливу обраних факторів на показники, що характеризують якість антифрикційного покриття реалізовували матрицю центрального ротатабельного композиційного плану  $2^3$ +зіркові точки, яка дозволила отримати математичні моделі впливу факторів на прийняті функції відгуку:  $m$  – маси антифрикційного покриття;  $S_n/S$  – відносної площі покриття;  $R_a/R_{a \text{ вих}}$  – зміни значення середньоарифметичного відхилення профілю поверхні.

Ротатабельний план має п'ять рівнів: верхній, нульовий, нижній і два крайніх («зіркові точки»). Інтервал від нульового рівня до «зіркових точок» визначено

«зірковим плечем», що дорівнює 1,68 [32]. Задля унеможливлення впливу систематичних помилок, спричинених неврахованими факторами, досліди проводили у випадковому порядку, для чого використовували таблицю випадкових чисел.

Обробка експериментальних даних виконувалася за допомогою пакету прикладних програм STATISTICA 12.0.

**Виклад основного матеріалу.** Отримані рівняння регресії мають наступний вигляд:

$$Y_1(m) = 0,005519 + 0,000735 \cdot x_1 - 0,000462 \cdot x_2 - 0,001442 \cdot x_3 - \\ -0,001895 \cdot x_1^2 - 0,001603 \cdot x_2^2 - 0,001799 \cdot x_3^2 + \quad ; \quad (1) \\ +0,000248 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,000306 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,00031 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Y_2\left(\frac{S_n}{S}\right) = 0,668755 + 0,044408 \cdot x_1 - 0,056635 \cdot x_2 - 0,275208 \cdot x_3 - \\ -0,199841 \cdot x_1^2 - 0,200608 \cdot x_2^2 - 0,149047 \cdot x_3^2 - \quad ; \quad (2) \\ -0,014875 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,042875 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,006198 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Y_3\left(\frac{R_a}{R_{a \text{ еих}}}\right) = 0,626308 - 0,088358 \cdot x_1 - 0,00778 \cdot x_2 + 0,077667 \cdot x_3 + \\ +0,163163 \cdot x_1^2 + 0,048406 \cdot x_2^2 + 0,061634 \cdot x_3^2 - \quad , \quad (3) \\ -0,017354 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,015312 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,003099 \cdot x_2 \cdot x_3$$

де  $x_1$  – сумарний шлях тертя, мм;

$x_2$  – сила, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини, Н;

$x_3$  – довжина контакту, мм.

Статистична оцінка отриманих результатів дозволила вважати дослідити рівноточними. Значимість отриманих коефіцієнтів перевіряли за допомогою критерію Стьюдента, а адекватність рівнянь – з використанням критерію Фішера.

Аналіз Парето-карти (рис.4) та табличних результатів експерименту для маси покриття  $m$  дозволив визначити найбільший вплив значення величини опорної поверхні  $x_3$  (довжина контакту) та квадратичний вплив усіх трьох факторів  $x_1^2$  (сумарний шлях тертя),  $x_2^2$  (сила, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини),  $x_3^2$  (довжина контакту).

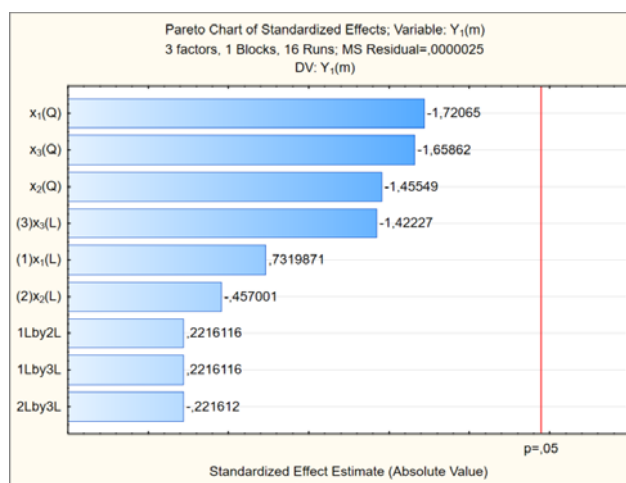


Рисунок 4 – Стандартизована Парето-карта для  $Y_1(m)$

Джерело: розроблено авторами

Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу (рис.5) дозволяють відмітити, що найбільше масоперенесення відбувається при наступних значеннях факторів:  $x_1 \rightarrow L \times n = 18 \dots 19 \dots 20$  мм;  $x_2 \rightarrow P_\Sigma = 20/b \dots 24/b \dots 28/b$ ;  $x_3 \rightarrow \Delta l = 0,3 \dots 0,4 \dots 0,5$  мм.

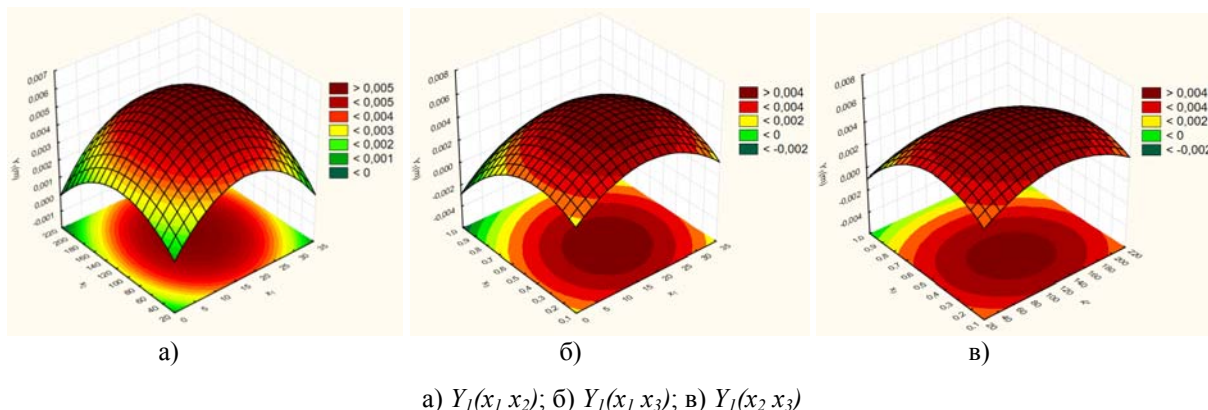


Рисунок 5 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу  $Y_1(m)$ :

Джерело: розроблено авторами

Отримавши Парето-карту для відносної площі покриття  $S_n/S$  (рис.6), відзначаємо максимальний вплив на критерій оптимізації  $Y_2$  параметру  $x_3$ , який фактично визначає загальну площу покриття. Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу для  $S_n/S$  (рис.7) дозволяють відмітити, що найбільша суцільність покриття досягається при наступних значеннях чинників:  $x_1 \rightarrow L \times n = 16 \dots 18 \dots 20$  мм;  $x_2 \rightarrow P_\Sigma = 20/b \dots 24/b \dots 28/b$ ;  $x_3 \rightarrow \Delta l = 0,2 \dots 0,25 \dots 0,3$  мм.

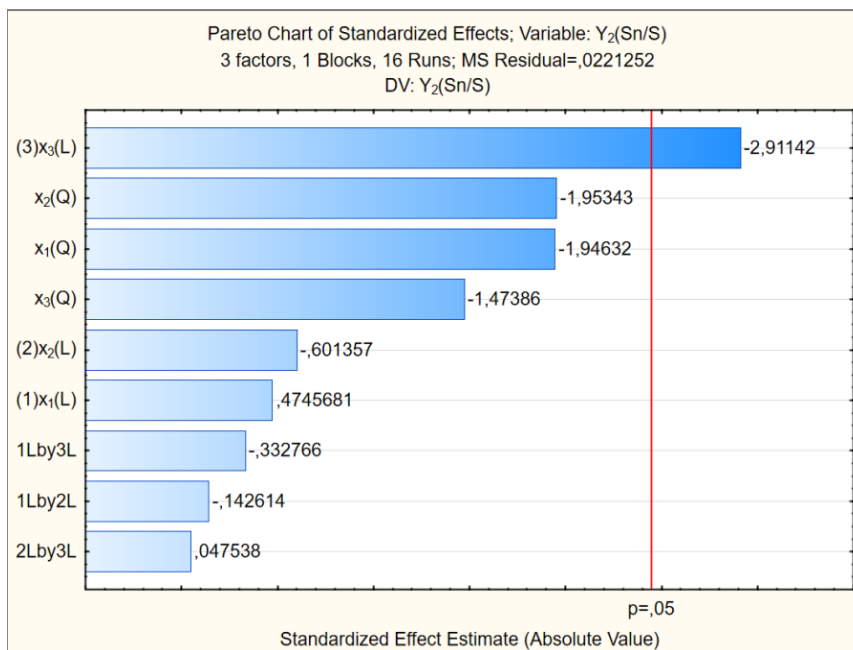


Рисунок 6 – Стандартизована Парето-карта для  $Y_2(S_n/S)$

Джерело: розроблено авторами

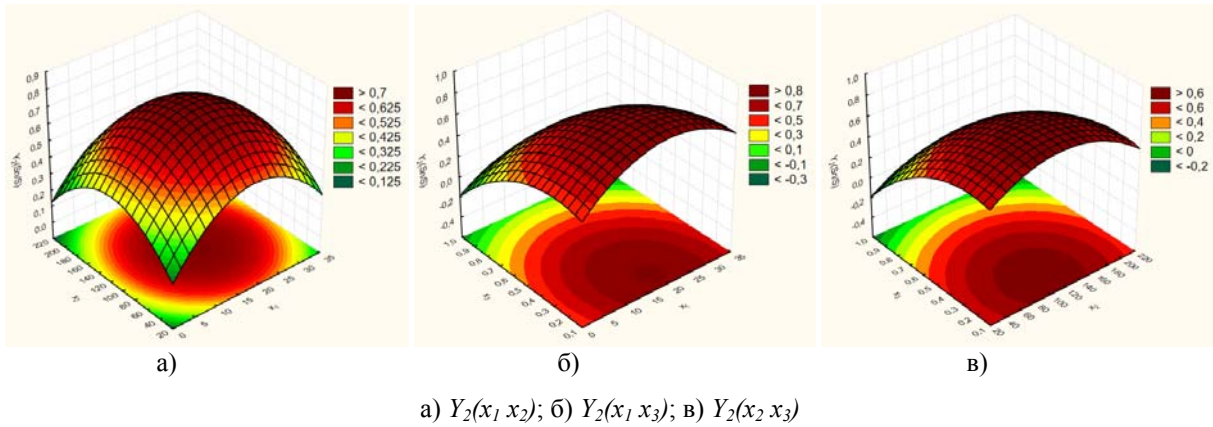


Рисунок 7 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу  $Y_2(S_n/S)$

Джерело: розроблено авторами

Стандартизована Парето-карта для відносної шорсткості поверхні (рис.8) свідчить про максимальний вплив на критерій оптимізації  $Y_3$  параметрів  $x_1$ ,  $x_3$  та  $x_2$ , які визначають зміну шорсткості поверхні. Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу для  $R_a/R_{a\text{вих}}$  представлені на рис.9. Їх аналіз дозволяє відмітити, що найменша величина відносної шорсткості поверхні досягається при наступних значеннях чинників:  $x_1 \rightarrow L \times n = 18...20...22$  мм;  $x_2 \rightarrow P_\Sigma = 22/b...26/b...30/b$ ;  $x_3 \rightarrow \Delta l = 0,3...0,35...0,4$  мм.

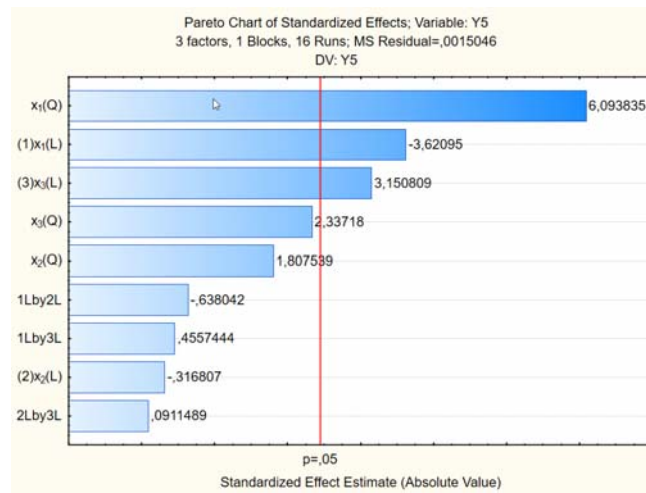


Рисунок 8 – Стандартизована Парето-карта для  $Y_3(R_a/R_{a\text{вих}})$

Джерело: розроблено авторами

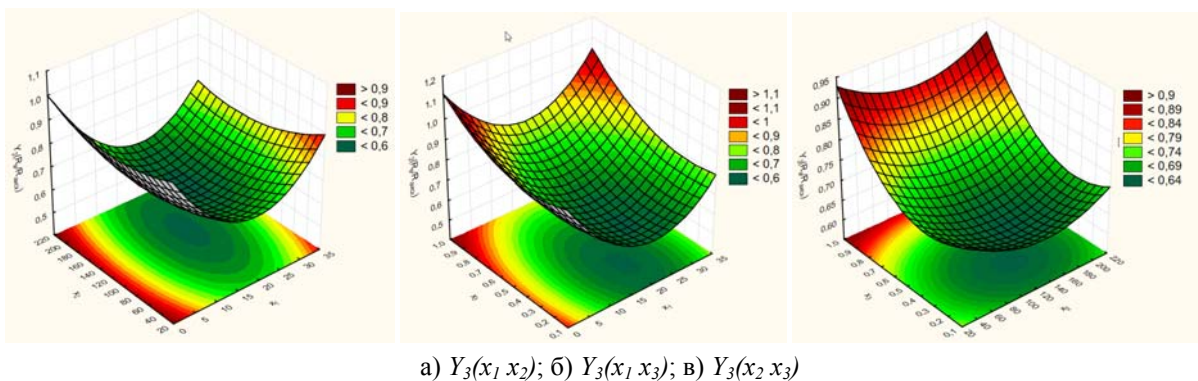


Рисунок 9 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу  $Y_3(R_a/R_{a\text{вих}})$

Джерело: розроблено авторами

Враховуючи обернено-пропорційний зв'язок критеріїв оптимізації  $Y_1(m)$  і  $Y_2(S_n/S)$  з  $R_a/R_{a \text{ вих}}$  досягнення їх максимальних значень одночасно неможливе, що показує різниця в раціональних значеннях деяких параметрів, насамперед,  $x_3$  та  $x_1$ .

Тому, для аналізу впливу фактору на критерії оптимізації побудовані експериментальні графіки розсіювання з гистограмами (рис.10), які дозволяють графічно визначити раціональні значення кожного параметру, з оцінкою реальних значень маси антифрикційного покриття, відносної площі покриття та шорсткості поверхні.

Експериментальні графіки розсіювання (рис.10) дозволяють уточнити зміни факторів та встановити їх взаємний вплив на критерії оптимізації. Можна побачити, що при збільшенні шляху тертя  $x_1(\Delta L)$  до 18...20 мм досягається максимальний ефект масоперенесення антифрикційного матеріалу. Однак подальше зростання шляху тертя не сприяє збільшенню масоперенесення. На наш погляд, це пов'язано тим, що найбільш активно відбувається перенесення антифрикційного матеріалу на перших проходах інструменту. Подальше збільшення їх кількості не суттєво впливає на приріст матеріалу.

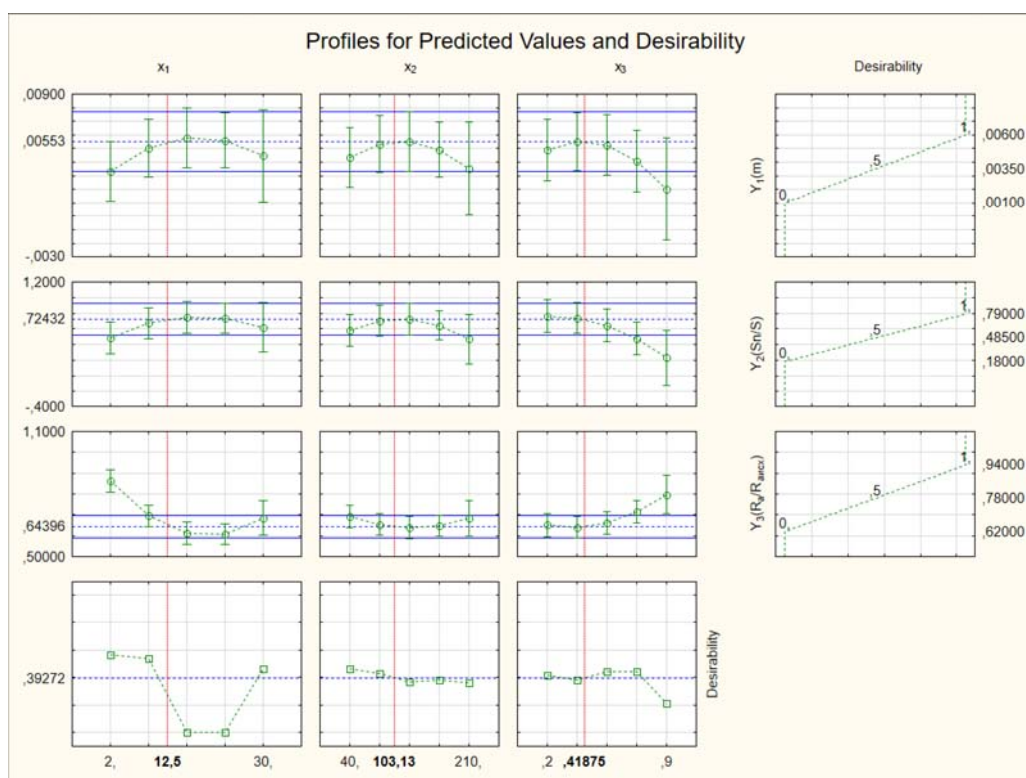


Рисунок 10 – Графіки розсіювання з гистограмами, що характеризують вплив досліджуваних факторів на якість нанесення покриттів

Джерело: розроблено авторами

В свою чергу збільшення сили, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини  $x_2(P_z)$  до величини  $20/b...28/b$  теж сприяють зростанню масоперенесення. Деяке підвищення цього технологічного параметру зменшує перенесення антифрикційного матеріалу. Можна стверджувати, що такий характер пов'язаний з процесом руйнування поверхневого шару мікронерівностей чавуну. Саме на перших проходах інструменту досягається максимальний радіус мікронерівностей, що зменшує процес стружкоутворення при мікрорізанні. Зазначимо, що збільшення масоперенесення відбувається при значенні довжини контакту  $x_3(\Delta l) = 0,3...0,5$  мм.

Чітко прослідковується пряма залежність масоперенесення антифрикційного матеріалу та площі покриття, тому можна констатувати наступні закономірності. При



значеннях  $x_1(\Delta L)$  до 18...20 мм,  $x_2(P_{\Sigma})=20/b...28/b$ ,  $x_3(\Delta l) = 0,2...0,6$  мм спостерігається найбільша площа покриття, що пояснюється вже розглянутими вище міркуваннями.

Зменшення показника  $R_a$  на досліджувальній поверхні відбувається при значеннях шляху тертя  $x_1(\Delta L)=18...22$  мм. Наступні цикли натирання не збільшують якість антифрикційного покриття. При підвищенні сили, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини  $x_2(P_{\Sigma})$ , до значень  $22/b...30/b$  спостерігається зниження показника  $R_a$ , що пояснюється інтенсивним натиранням антифрикційного матеріалу (латуні Л63) у впадини мікроступів та згладжування їх вершин. Найбільш раціональні значення довжини контакту  $x_3(\Delta l)$  з точки зору зменшення показника  $R_a$  відбувається при значеннях 0,3...0,6 мм. Це ще раз підтверджує встановлене нами твердження про суттєвий вплив вихідної поверхні мікрорельєфу на якість покриття, отриманого ФАБО [33].

Аналіз поверхонь відгуку та графіків ліній рівного виходу для обраних критеріїв оптимізації (рис.5, 7, 9), а також графіків розсіювання впливу технологічних факторів (рис.10) дозволяє визначити їх раціональні значення:  $x_1(\Delta L) = 12$  мм,  $x_2(P_{\Sigma})=21/b...28/b$ ,  $x_3(\Delta l) = 0,4$  мм.

**Висновки.** 1. Виділені та систематизовані основні технологічні фактори, що впливають на якість нанесеного покриття. Експериментально встановлено вплив технологічних параметрів процесу ФАБО на якість антифрикційного покриття.

2. Побудована статистична математична модель залежності якості антифрикційного покриття від технологічних параметрів процесу ФАБО, яка дозволяє оцінити вплив кожного з факторів на обрані критерії оптимізації.

3. Визначено оптимальні варіанти поєднання технологічних факторів, що забезпечують якість покриття. Встановлені раціональні значення режиму ФАБО та геометричних характеристик вихідної поверхні.

## Список літератури

1. Щепетов В.В., Харченко О.В., Харченко С.Д. Зносостійкі захисні покриття: за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака. Наукова думка, 2022. 122 с.
2. Nemyrovskiy Y., Shepelenko I., Medvedieva O. Improving the Durability of Agricultural Machinery Parts by Applying Antifriction Coatings. *Acta Scientific Agriculture*. 2020. Vol. 4. № 5. P. 46–57. <https://actascientific.com/ASAG/ASAG-04-0840.php>
3. Shepelenko I., Posviatenko E., Cherkun V. The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method. *Problems of Tribology*. 2019. 24(1/91), 35–39. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-35-39>
4. Mykhailo Chernovol, Shepelenko Igor, Budar Mohamed R.F. Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. 2015. Вип. 45(1). С. 10–13. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2128>
5. Солових Є.К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними та технологічними методами: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.03.07. Київ, 2013. 36 с.
6. Abdullah Rasheed A, Ihor Shepelenko, Eduard Posviatyenko. Experimental quality improvement of the application of antifriction coating. *First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials* 13-14 August 2020, Coimbatore, India. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. Vol. 1706. pp.1–11. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1706/1/012187>
7. Shepelenko I., Tsekhanov Y., Nemyrovskiy Y., Posviatenko E. Improving the Efficiency of Antifriction Coatings by Means of Finishing the Antifriction Non-abrasive Treatment. In: Tonkonogyi, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer*, Cham. 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30)
8. Shepelenko I. et al. Modeling of contact interaction of microroughnesses of treated surfaces during finishing anti-friction non-abrasive treatment FANT. *Mechatronic Systems 2*. Routledge, 2021. 237–246. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/37245/106488.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

9. Шепеленко І.В., Кириченко А.М., Магопець С.О., Красота М.В., Василенко І.Ф. Зміна шорсткості поверхні при нанесенні антифрикційних покриттів. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. 2022. Вип.52. С.156–165. <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/pdf/52/18.pdf>
10. Sun H., Tan W., Ruan Y. *et al.* Surface roughness classification using light scattering matrix and deep learning. *Sci. China Technol. Sci.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2545-8>
11. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування: автореф. дис....д-ра техн. наук: 05.02.08. Київ, 2021. 43 с.
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., 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., 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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19)
15. Шепеленко І.В., Цеханов Ю.О., Немировський Я.Б. Дослідження мікрорізання в процесі фінішної антифрикційної безабразивної обробки. *Прогресивні технології в машинобудуванні – 2020*: зб. наукових праць ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., 3 – 7 лютого 2020 р., Львів - Плай, 2020. С.162–164.
16. Shepelenko I., Tsekhanov Yu., Nemyrovskiy Ya., Posvyatenko E., Eremin P. Simulation of micro-cutting in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science* 2019. Vol. 5, no. 2. P. 43-52, <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.02.043>
17. 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>
18. 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/>
19. 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>
20. Nemyrovskiy Ya., Shepelenko I., Osin R. & Posviatenko E. Improving the processing quality of cylinder liners using combined technology. *Cutting and Tools in Technological Systems*. 2022. № 96. P. 121–130. <http://rits.khpi.edu.ua/article/view/252506>
21. 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. Технічні науки*. 2018. № 4. С. 38–42. <https://elar.khmnu.edu.ua/items/e3f20be0-836d-4efe-8c35-008bf12fe62c>
22. Solovykh E.K., Lyashenko V.A., Dmitriev Yu.V., Borisov Yu.S. Optimization of the procedure of plasma spraying of erosion-resistant coatings according to strength criteria. *Strength of Materials*. 2008. Vol. 40. Issue 6. P.699–710.
23. Клименко А., Анисимов В., Ситар В. Розробка тонкошарових покриттів на основі фенілону для захисту поверхонь від газо- та гідроабразивного зношування. *Технічні науки та технології*. 2020. № 4 (22). С. 28–34. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/227170/227173>
24. Шепеленко І.В., Гуцул В.І., Магопець М.С. Особливості розрахунку напружено-деформованого стану антифрикційних покриттів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2022)*: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня 2022 р.): у 2-х т. Чернігів, 2022. Т.1. С. 104–105.
25. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Lizunkov O., Vasylenko I., Osin R. (2023). The Stress-Deformed State of the Cylinder Liner's Working Surface. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel', J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_33)
26. Solovykh E., Shepelenko I., Chernovol M. *et al.* Multicriteria optimization of heat-resistant coatings detonation spraying technology. *Problems of Tribology*. 2023. 28(4/110). P. 36–43. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-36-4>

27. Veselivska H.H., Student M.M., Posuvailo V.M. et al. Electrochemical Properties of Plasma-Electrolytically Oxidized Aluminum Coatings Sprayed on MA5 Magnesium Alloy. *Mater Sci*. 2023. Vol. 59. P. 49–55 <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00742-x>
28. Tian N., Zhou S., Zhang C. et al. Effect of High-Current Pulsed Electron Beam Irradiation on the Microstructure and Mechanical Properties of Multilayered TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings. *J. of Materi Eng and Perform* 2023. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08723-6>
29. Solovykh E., Shepelenko I., Solovuch A., Katerynych S. Features of ion nitriding technology multicriteria optimization. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, № (4/106). P. 13–18. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-13-18>
30. Шепеленко І.В., Дреєв О.М., Мохамед Будар Р.Ф. Визначення якості металевих покриттів. *Молодь і технічний прогрес в АПК. Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 07 – 08 травня 2020 р. Харків: ХНТУСГ, 2020. Т. 2. С.298–299.*
31. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К. Інтенсифікація процесу нанесення антифрикційних покриттів. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XXI Міжнар. наук.-техн. конф., 06 – 09 жовтня 2020 р. м.Київ: КПІ, 2020. С.94–96.*
32. Vasytkovska K.V., Leshchenko S.M., Vasytkovskyi O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 50 Issue 3. P. 13–20.
33. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Tsekhanov Y., Posviatenko E., Sardak S. Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Anti-friction Non-abrasive Treatment. In: Karabegović, I. (eds) *New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020. Vol 128. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_22).

## References

1. Schepetov, V.V., Kharchenko, O.V. & Kharchenko, S.D. (2022). *Znosostijki zakhysni pokryttia [Wear-resistant protective coatings]*. Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I. & Medvedieva, O. (2020). Improving the Durability of Agricultural Machinery Parts by Applying Antifriction Coatings. *Acta Scientific Agriculture, Vol. 4, No 5*. P. 46–57. <https://actascientific.com/ASAG/ASAG-04-0840.php> [in English].
3. Shepelenko, I., Posviatenko, E., & Cherkun, V. (2019). The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method. *Problems of Tribology, 24(1/91)*, 35–39. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-35-39> [in English].
4. Chernovol, Mykhailo, Shepelenko, Igor & Budar Mohamed R.F. (2015). Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn»*. 45(1), 10-13. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2128> [in English].
5. Solovykh, Ye.K. (2013). *Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyschennia nesuchoi zdatnosti funktsional'nykh pokryttiv konstruktyvnyh ta tekhnolohichnyh metodamy [Scientific and methodological bases of increasing the bearing capacity of functional coatings by constructive and technological methods]*. *Extended abstract of a doctoral thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Abdullah Rasheed A., Shepelenko, Ihor & Posviatyenko, Eduard (2020). Experimental quality improvement of the application of antifriction coating. *First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials* 13-14 August 2020, Coimbatore, India. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1706. pp.1–11. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1706/1/012187> [in English].
7. Shepelenko, I., Tsekhanov, Y., Nemyrovskiy, Y. & Posviatenko, E. (2020). Improving the Efficiency of Antifriction Coatings by Means of Finishing the Antifriction Non-abrasive Treatment. In: Tonkonogyi, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30) [in English].
8. Shepelenko, I. et al. Modeling of contact interaction of microroughnesses of treated surfaces during finishing anti-friction non-abrasive treatment FANT. *Mechatronic Systems 2*. Routledge, 2021. 237–246. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/37245/106488.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [in English].
9. Shepelenko, I.V. et al. (2022). Zmina shorstkosti poverkhni pry nanesenni antyfryktsiinykh pokryttiv [Changes in surface roughness when applying anti-friction coatings]. *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn»*, 52, 156–165. <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/pdf/52/18.pdf> [in Ukrainian].
10. Sun, H., Tan, W., Ruan, Y. et al. (2023). Surface roughness classification using light scattering matrix and deep learning. *Sci. China Technol. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2545-8> [in English].

11. Shepelenko, I.V. (2021). Naukovi osnovy tekhnologii nanesennia antyfraktsiynykh pokryttiv z vykorystanniam plastychnoho deformuvannia [Scientific basis of the technology of applying antifriction coatings using plastic deformation]. *Extended abstract of a doctoral thesis*. Kyiv [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> [in English].
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> [in English].
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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19) [in English].
15. Shepelenko, I.V., Tsekhanov, Yu.O. & Nemyrovskiy, Ya.B. (2020). Doslidzhennia mikrorizannia v protsesi finishnoi antyfraktsiynoi bezabrazyvnoi obrobky [Investigation of microneedling in the process of antifriction finishing without abrasive treatment]. *Progressive technologies in mechanical engineering - 2020: IX Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (3 – 7 liutoho 2020 r.) - IX International scientific and technical conference* (pp.162–164). Lviv: Plai [in Ukrainian].
16. Shepelenko, I., Tsekhanov, Yu., Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E. & Eremin, P. (2019). Simulation of micro-cutting in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 5, 2, 43-52. <https://doi.org/10.23939/ujmms2019.02.043> [in English].
17. Shepelenko, I.V., Nemyrovskiy, Ya.B. & Posviatenko, E.K. (2022). Pidvyschennia yakosti antyfraktsiynykh pokryttiv z vykorystanniam plastychnoho deformuvannia [Improving the quality of anti-friction coatings using plastic deformation]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6, 1, 24–30. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655> [in Ukrainian].
18. 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): 98–101. <https://ageconsearch.umn.edu/record/305359/> [in English].
19. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Posviatenko, E., Chernovol, 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), 14–25. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25> [in English].
20. Nemyrovskiy, Ya., Shepelenko, I., Osin, R. & Posviatenko, E. (2022). Improving the processing quality of cylinder liners using combined technology. *Cutting and Tools in Technological Systems*, 96: 121–130. <http://rits.khpi.edu.ua/article/view/252506> [in English].
21. Kosiuk, M.M., Kostiuk, S.A. & Kostiuk, M.A. (2018). Tekhnologichne zabezpechennia nanesennia antyfraktsiynoho pokryttia na nepovni sferychni poverkhni fryktsiyno-mekhanichnym sposobom [Technological support for the application of antifriction coating on incomplete spherical surfaces by friction-mechanical method]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky - Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 4, 38–42. <https://elar.khmn.edu.ua/items/e3f20be0-836d-4efe-8c35-008bf12fe62c> [in Ukrainian].
22. Solovykh, E.K., Lyashenko, B.A., Dmitriev, Yu.V. & Borisov, Yu.S. (2008). Optimization of the procedure of plasma spraying of erosion-resistant coatings according to strength criteria. *Strength of Materials, Vol. 40, Issue 6*. P. 699–710 [in English].
23. Klymenko, A., Anisimov, V. & Sytar, V. (2020). Rozrobka tonkosharovykh pokryttiv na osnovi fenilonu dlia zakhystu poverkhon' vid hazo- ta hidroabrazyvnoho znoshuvannia [Development of thin-layer coatings based on phenylene to protect surfaces from gas and water abrasion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii - Technical sciences and technologies*, 4 (22), 28–34. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/227170/227173> [in Ukrainian].
24. Shepelenko, I.V., Hutsul, V.I. & Mahopets, M.S. (2022). Osoblyvosti rozrakhunku napruzhenodeformovanoho stanu antyfraktsiynykh pokryttiv [Features of calculation of the stress-strain state of antifriction coatings]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2022): XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (26–27 travnia 2022 r.) - XII International Scientific and Practical Conference* (pp. 104–105). Chernihiv [in Ukrainian].
25. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Lizunkov, O., Vasylenko, I. & Osin, R. (2023). The Stress-Deformed State of the Cylinder Liner's Working Surface. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Piteř, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_33) [in English].
26. Solovykh, E., Shepelenko, I., Chernovol, M., Shumliakivsky, V., Solovuch, A. & Katerynych, S. (2023). Multicriteria optimization of heat-resistant coatings detonation spraying technology. *Problems of Tribology*, 28(4/110), 36–43. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-36-4> [in English].

27. Veselivska, H.H., Student, M.M., Posuvailo, V.M. *et al.* (2023). Electrochemical Properties of Plasma-Electrolytically Oxidized Aluminum Coatings Sprayed on MA5 Magnesium Alloy. *Mater Sci* 59, 49–55 <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00742-x> [in English].
28. Tian, N., Zhou, S., Zhang, C. *et al.* (2023). Effect of High-Current Pulsed Electron Beam Irradiation on the Microstructure and Mechanical Properties of Multilayered TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings. *J. of Materi Eng and Perform* <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08723-6> [in English].
29. Solovykh, E., Shepelenko, I., Solovuch, A., & Katerynych, S. (2022). Features of ion nitriding technology multicriteria optimization. *Problems of Tribology, Vol. 27, № 27(4/106)*, P. 13–18. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-13-18> [in English].
30. Shepelenko, I.V., Driev, O.M. & Mokhamed Budar R.F. (2020). Vyznachennia iakosti metalevykh pokryttiv [Determining the quality of metal coatings]. *Youth and technical progress in agriculture. Innovative developments in the agricultural sector: Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (07 – 08 travnia 2020 r.) - International Scientific and Practical Conference* (pp. 298–299). Kharkiv: KhNTUSH [in Ukrainian].
31. Shepelenko, I.V., Nemyrov'skyj, Ya.B. & Posviatenko, E.K. (2020). Intensyfikatsiia protsesu nanesennia antyfraktsiynnykh pokryttiv [Intensification of the process of applying anti-friction coatings]. *Progressive engineering, technology and engineering education: XXI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (06 – 09 zhovtnia 2020 r.) - International scientific and technical conference* (pp. 94-96), Kyiv: KPI [in Ukrainian].
32. Vasylykivska, K.V., Leshchenko, S.M., Vasylykovskiy, O.M. & Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH – Agricultural Engineerin, Vol. 50, Issue 3*. P. 13–20 [in English].
33. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Tsekhanov, Y., Posviatenko, E. & Sardak, S. (2020). Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Anti-friction Non-abrasive Treatment. In: Karabegović, I. (eds) *New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 128*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_22) [in English].

**Ihor Shepelenko**, Prof., DSc, **Mykhailo Chernovol**, Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Prof., DSc., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD of tech. sci., **Michael Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Yakiv Nemyrovskiy**, Prof., DSc., **Volodymyr Shumliakivsky**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine*

### **Searching for optimal parameters of finishing antifriction non-abrasive treatment of cylinder liners of motor tractor engines**

This paper presents the results of research aimed at improving the quality of antifriction coatings obtained by finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT). It has been previously established that the formation of an antifriction coating during FANT largely depends on the technological parameters that determine the conditions of contact between the tool and the surface being treated. The study of the peculiarities of surface contact, their regularities, as well as the main parameters of the FANT process, makes it possible to improve the quality of the antifriction coating, and therefore the operational properties of the part.

The aim of the presented research is to evaluate the influence of technological factors of the FANT process on the quality of antifriction coatings and to obtain their rational values. The indicators of the quality of the antifriction coating are its continuity, surface roughness and mass transfer of the antifriction material. The optimisation parameters are the main modes of FANT and the geometrical characteristics of the initial surface to be treated. To determine the influence of the selected factors on the indicators characterising the quality of the antifriction coating, a central composite plan matrix was implemented, which allowed us to obtain mathematical models of the influence of factors on the adopted response functions. The processing of the experimental data was carried out using the STATISTICA 12.0 software package.

As a result of the multifactorial experiment, statistical models were obtained that allow assessing the impact of the studied factors on the optimisation criteria. The significance of the obtained coefficients was checked using the Student's criterion, and the adequacy of the obtained equations was checked using the Fisher's criterion. A detailed analysis of the Pareto map and tabular results of the experiment allowed to establish the influence of the research factors on the optimisation criteria. The obtained mathematical models made it possible to determine the optimal combination of technological factors that ensure the quality of the coating, as well as to establish the rational values of FANT modes and geometric characteristics of the output surface.

**antifriction coating, cylinder liners, automotive and tractor engines, coating quality, multicriteria optimisation, technological parameters, geometric characteristics of the surface**

*Одержано (Received) 23.10.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023*