

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ВИЧАВКА АНАТОЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 621.891: 621.822

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ І МАСТИЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ  
ЦИЛІНДРИЧНИХ НАПРЯМНИХ КОВЗАННЯ  
КОМБІНОВАНОЮ ОБРОБКОЮ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Хмельницький – 2025

Дисертацією є рукопис  
Робота виконана у Хмельницькому національному університеті  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Диха Олександр Володимирович,**  
Хмельницький національний університет,  
завідувач кафедри трибології, автомобілів  
та матеріалознавства

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Аулін Віктор Васильович,**  
Центральноукраїнський  
національний технічний університет,  
професор кафедри експлуатації та ремонту машин


кандидат технічних наук, доцент  
**Марченко Дмитро Дмитрович,**  
Миколаївський національний аграрний університет,  
доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських  
машин, експлуатації і технічного сервісу

Захист дисертації відбудеться "21" березня 2025 року о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 70.052.02 у Хмельницькому національному університеті за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, 3-й навчальний корпус, зала засідань.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Хмельницького національного університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1.

Автореферат розісланий " 05 " лютого 2025 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

 С. В. Смутко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку технологій, спрямованих на підвищення довговічності машин, особливу увагу слід приділяти вузлам тертя, оскільки знос їхніх поверхонь є причиною 90–95 % відмов. Широке впровадження сучасних технологічних процесів формування робочих поверхонь тертя деталей, які здатні забезпечити високі і стабільні показники експлуатаційних характеристик, підвищити надійність і безвідмовність машин, обмежується відсутністю науково-обґрунтованих розробок методів формування таких поверхонь і рекомендацій стосовно їх параметрів. Щоб збільшити довговічність деталей машин під час тертя та зношування, на їхні поверхні додатково наносять маслоутримувальні мікро- та макрорельєфи. Чим ефективніше мастильний матеріал утримується між контактуючими деталями, тим менший ступінь їх зношування. При цьому ключову роль відіграє профіль поверхні. Вирішення вказаних задач можливе в поєднанні технологічних методів інженерії поверхні та трибологічних досліджень, які дозволяють керувати властивостями поверхонь деталей шляхом їх цілеспрямованої модифікації. Циліндричні напрямні елементи вузлів технологічних і транспортних машин є одними з найбільш відповідальних спряжень, що визначають точність руху виконавчих органів. Тому розробка і вдосконалення технологічних способів підвищення їх довговічності є актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Окремі частини роботи виконано в межах планових держбюджетних досліджень Хмельницького національного університету за замовленням МОН України: «Теоретико-експериментальні методи та комп'ютерні моделі забезпечення живучості циліндричних трибосистем ковзання при нормальному і швидкісному терті (№ ДР 0116U001549), 2016; «Прогнозування зносостійкості і надійності підшипникових вузлів та оптимізація їх параметрів» (№ ДР0120U102070), 2020, в яких автор дисертації був виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є створення аналітичних та комп'ютерних методів і моделей зносостійкості і мастильної здатності циліндричних напрямних ковзання та вибір і обґрунтування технологічних способів підвищення їх довговічності.

Відповідно до мети роботи вирішувались такі основні завдання наукового дослідження:

1. Провести аналіз сучасних підходів до підвищення зносостійкості та мастильної здатності циліндричних напрямних ковзання шляхом створення ефективних маслоутримувальних профілів на робочих поверхнях з використанням сучасних зміцнювальних технологій.

2. Шляхом вирішення зносоконтактних задач отримати розрахункові залежність зносу від шляху тертя для оцінку зносостійкості напрямних ковзання з профільними маслоутримувальними канавками рівної і змінної глибини.

3. Для циліндричних напрямних ковзання при наявності перекосу осей циліндрів отримати аналітичний розв'язок для визначення параметрів контакту: тиску, переміщень в контакт, кута контакту.

4. На основі скінчено-елементної моделі спряження «клапан-напрямна» провести аналіз впливу визначальних трибологічних факторів: швидкості ковзання в контакт, кута перекоосу, коефіцієнту тертя на контактні напруження для деталей пари тертя в процесі контактної взаємодії.

5. Запропонувати спеціальний інструмент і технологію отримання маслоутримувального профілю на внутрішній поверхні напрямної клапана для підвищення зносостійкості і мастильної здатності пари «клапан-напрямна».

6. На основі комп'ютерної моделі проаналізувати вплив зміни геометрії з мастильними канавками напрямної на показники максимальних і середніх напружень та показників довговічності за критерієм зносу.

7. Визначити оптимальні технологічні параметри зміцнення штоку напрямної клапанного механізму шляхом плазмового напилення та довести її ефективність на основі експериментальних металографічних та трибологічних досліджень.

**Об'єкт дослідження** – робочі поверхні циліндричних напрямних ковзання технологічних і транспортних машин, процеси змащування та зношування деталей циліндричних трибосистем ковзання та їх зміцнення.

**Предмет дослідження** – аналітичні і комп'ютерні моделі зносостійкості і мастильної здатності циліндричних напрямних ковзання та комбіновані технології їх зміцнювальної обробки.

**Методи дослідження.** Методологія дослідження розроблена з використанням сучасних підходів і основних принципів трибології, механіки контактної взаємодії та інженерії поверхонь. У теоретичних дослідженнях застосовано методи розв'язання зносоконтактних задач і моделювання контактної взаємодії за допомогою методу скінчених елементів. Аналіз триботехнічних процесів робочих поверхонь трибосистем виконано на основі трибологічних випробувань і металографічних досліджень.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше для маслоутримуючих профілів змінної глибини, що відрізняються оптимальними показниками несучої здатності, відповідно до режиму навантаження напрямної ковзання, проведені розв'язки зносоконтактних задач і отримані алгебраїчні залежності для зносу в замкненому вигляді.

2. Отримав подальший розвиток розв'язок задачі визначення трибоконтактних параметрів для циліндричної напрямної ковзання з перекоосом осей у вигляді трансцендентного рівняння з урахуванням припущення про безперервність функцій переходу перетинів вздовж осі циліндрів.

3. Удосконалена скінчено-елементна модель спряження «клапан-напрямна», що дозволила встановити вплив визначальних трибологічних факторів швидкості ковзання, кута перекоосу, коефіцієнту тертя на контактні напруження і довговічність пари тертя.

4. Вперше за допомогою комп'ютерного експерименту для спірального маслоутримувального профілю на внутрішній поверхні напрямної клапана визначені показники несучої здатності утворених мастильних каналів за критерієм рівня максимальних контактних напружень співрозмірно до суцільного металевого контакту.

5. Отримало подальший розвиток встановлення механізму підвищення маслоємності та зносостійкості плазмового порошкового покриття при додаванні 5 % ферросиліцію за рахунок утворення в поверхневому шарі пор круглої форми (мікрорезервуарів масла) в результаті коагуляції фазових складових покриття.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у рекомендації до застосування на автотранспортних і ремонтних підприємствах запропонованих в роботі для відновлення і підвищення довговічності деталей клапанного механізму двигунів внутрішнього згорання: технологію роздавання втулок клапанів і утворення маслоутримувальних спіральних канавок за допомогою спеціального профільного інструменту-дорну; технологію відновлення і зміцнення штоків клапанів на основі розроблених прогресивних технологічних режимів плазмового напилення. Також рекомендовані до використання способи відновлення і підвищення мастильної здатності напрямних ковзання технологічних і транспортних машин представлених в патентах на корисні моделі: №№ 116536; 118570; 154090; 123693.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені у секторі автотехнічних експертиз ХНДЕКЦ (Хмельницького Науково-дослідного експертно-криміналістичного центру); на Хмельницькому комунальному підприємстві ХКП «Електротранс»; в освітньому процесі на кафедрі трибології, автомобілів та матеріалознавства Хмельницького національного університету для спеціальностей 132 «Матеріалознавство», 274 «Автомобільний транспорт», зокрема при вивченні освітніх компонент «Вузли тертя машин», «Ремонт та відновлення машин», «Основи технічної діагностики автомобіля».

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи, представлені на захист, є авторськими здобутками. Постановка задачі, формулювання завдань дослідження та аналіз отриманих результатів виконані у співпраці з науковим керівником. У роботах, опублікованих у співавторстві, з робіт, опублікованих у співавторстві, використано результати отримані автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Апробацію основних положень, ідей та висновків дисертаційної роботи здійснено на науковому семінарі кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства Хмельницького національного університету. Наукові результати роботи також були представлені на: Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Миколаїв, НУК, 2011 р.); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Підвищення надійності машин та обладнання» (м. Кіровоград, КНТУ, 2012 р.); Міжнародній науковій конференції «Енерго- та ресурсозбереження і трибологія» (в рамках МНПК «Ольвійський форум-2012: Стратегії України в геополітичному просторі») (м. Миколаїв, ЧДУ ім. П. Могили, 2012 р.); II Промислово-інвестиційному форумі «Інноваційні технології в машинобудуванні» (м. Запоріжжя, 2022 р.); VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та аспірантів «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кіровоград, КНТУ, 2014 р.); III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (м. Житомир, ЖНАУ, 2017 р.);

Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кропивницький: ЦНТУ, 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту» (м. Кропивницький, ЦНТУ, 2022 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України» (м. Кам'янське, ДДТУ, 2023 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем : Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems» (м. Кропивницький, ЦНТУ, 2024 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Прикладна механіка» (м. Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024 р.).

**Публікації.** Наукові результати опубліковано у 24 публікаціях, з яких одна стаття у періодичному науковому виданні держави, яка входить до ОЕСР та ЄС, 11 наукових статей у фахових наукових журналах України, 9 праць в матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, 3 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 109 найменування, розміщених на 13 сторінках та 2 додатків, розміщених на 17 сторінках. Роботу викладено на 230 сторінках, з них 180 сторінок основного тексту, на яких розміщено 107 рисунків та 24 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

**У першому розділі** проаналізовано стан сучасних досліджень щодо технологічних методів інженерії поверхні для підвищення ефективності циліндричних напрямних ковзання технологічних і транспортних машин, в тому числі для деталей клапанного механізму. Сформульовані задачі дослідження.

Проаналізовані питання створення ефективних конструкцій напрямних ковзання машин, відзначено, що велика увага приділяється проблемі зносу елементів напрямних ковзання та зниження коефіцієнту тертя. Розглянуто сучасні підходи до розрахункової оцінки циліндричних напрямних ковзання, вирішення контактних задач.

Показано, що ефективність роботи клапанного механізму двигуна значною мірою залежить від зносостійкості направляючої клапана. Проблема дослідження механізмів зношування деталей клапанного механізму залишається вельми актуальною внаслідок потреби невпинного вдосконалення конструкції і підвищення довговічності двигунів внутрішнього згорання. Відзначено, що для аналізу і прогнозування довговічності вузлів тертя деталей клапанного механізму широко використовують розрахункові оцінки напруженого і

теплового стану, переважне місце при цьому займають чисельні методи, зокрема метод скінчених елементів.

**У другому розділі** розглянута методологія розрахунково-експериментальної оцінки зносостійкості і триботехнічної надійності вузлів тертя машин. Визначені основні теоретичні і експериментальні методи дослідження зносостійкості і мастильної здатності циліндричних напрямних ковзання.

Для аналізу і підвищення зносостійкості деталей клапанного механізму обґрунтований вибір і наведені основні характеристики конструкційних матеріалів. Для виготовлення впускних і випускних клапанів рекомендується використовувати сталі 40X та 40XH відповідно. Для виготовлення напрямних клапанів використовується бронза БрО5Ц5С5, яка має високі зносостійкі характеристики та допускає роботу з малими зазорами.

Для відновлення і підвищення зносостійкості напрямних елементів клапанного механізму використаний технологічний комплекс, який включає: установку для плазмового напилення, механізми кріплення, переміщення плазмотрона та обертання деталей, систему вентиляції для видалення газів і пилю виробництва ХКП «Електротранс» (м. Хмельницький). Випробування на зносостійкість покриття, нанесеного плазмовим методом із використанням самофлюсівних порошків (ПГ-10Н-01), проводились на машині тертя СМЦ-2.

Металографічні дослідження матеріалів проводились за допомогою скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP. Визначення мікротвердості поверхні здійснювалось за методом Вікєрса на приладі ПМТ-3.

Для визначення оптимальних технологічних процесу підвищення зносостійкості елементів циліндричних напрямних ковзання застосовано метод планування факторного експерименту. Основною метою проведення повного факторного експерименту було визначення залежності мікротвердості зміцненої поверхні від технологічних параметрів: сили струму, дистанції напилення, витрат матеріалу. Перевірка однорідності дисперсії здійснювалась із застосуванням статистичних критеріїв Фішера.

**У третьому розділі** визначені трибоконтатні характеристики: контактний тиск і площу контакту для напрямних з маслоутримувальними канавками. Розв'язана контактна задача по визначенню кута контакту і контактних переміщень для циліндричної напрямної ковзання з перекосом осей.

Для підвищення довговічності деталей машин при терті і зношуванні на їх поверхню додатково наносили маслоутримувальні мікро- і макро рельєфи. Створені при обробці канавки на поверхні виконували функцію резервуарів для утримання і розподілу масла. Для напрямних ковзання запропонований профіль маслоутримувальних канавок із змінною глибиною від максимальної в центрі несучої поверхні до нуля на границі поверхні тертя. Такий профіль має оптимальну маслонесучу здатність і мінімальні витікання мастильного матеріалу. Маслоутримувальний макропрофіль на поверхні тертя отримують шляхом формування канавок пластичною деформацією за допомогою індентора у вигляді сталеві кульки радіусом  $r$  (рис. 1) або конуса з кутом при вершині  $2\alpha$ , закріплених в пристрої обертового руху.

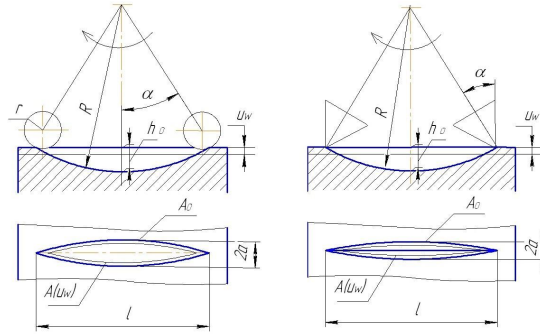


Рис. 1. Форма і розміри канавок утворених кульковим і конічним індентором

З урахуванням зносу контактної поверхні  $u_w$  (рис. 1) геометричні параметри круглої канавки відповідно зменшується:

$$a_w = \sqrt{2r(h_0 - u_w)}; \quad l_w = 2\sqrt{2R(h_0 - u_w)}; \quad (1)$$

Реальна площа контакту  $A_r$  маслостримувального макропрофілю в процесі зношування збільшується, а контактний тиск відповідно зменшується до номінального значення:

$$A_r = L \cdot b - 4nR \sqrt{\frac{r}{R}} \left[ \sqrt{u_w (h_0 - u_w)} + h_0 \arcsin \sqrt{1 - \frac{u_w}{h_0}} \right]. \quad (2)$$

З урахуванням реальної площі контакту маслостримувального макропрофілю в процесі зносу контактний тиск визначається:  $\sigma_r = \frac{Q}{A_r}$

Результати розрахунків геометричних параметрів маслостримувального макропрофілю і контактного тиску залежно від величини зносу  $u_w$  показані на рис. 2.

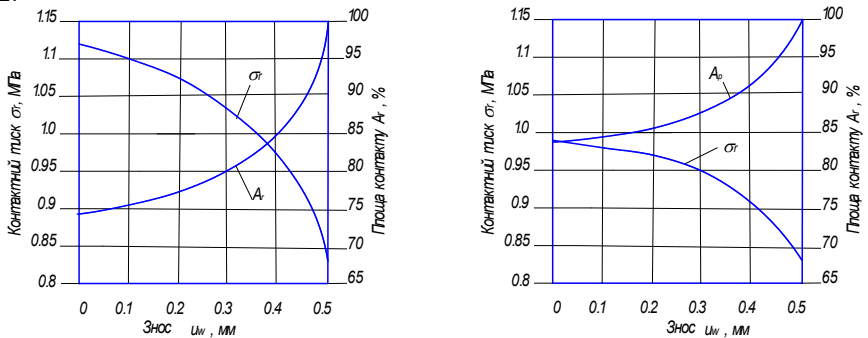


Рис. 2. Залежність площі контакту і контактного тиску від зносу маслостримувального профілю, формованого кульковим і конічним індентором

Приймалась модель зношування напрямної ковзання у вигляді безрозмірних комплексів: контактний тиск і швидкості ковзання.



$$I = \frac{du_w}{ds} = c_w \left( \frac{f\sigma}{HB} \right) \left( \frac{Vb}{v} \right), \quad (3)$$

де  $u_w$  – нормальний лінійний знос напрямної;  $S$  – шлях тертя;  $f$  – коефіцієнт тертя в парі повзун-напрямна;  $\sigma$  – нормальний контактний тиск;  $HB$  – твердість матеріалу напрямної;  $V$  – швидкість ковзання;  $b$  – номінальна ширина напрямної;  $v$  – кінематична в'язкість оливи;  $c_w$  – коефіцієнт зносостійкості.

З (1) залежність зносу від напівширини канавки буде:  $u_w = h_0 - \frac{a^2}{2r}$ .

Або в диференціальній формі:  $\frac{du_w}{ds} = -\frac{a}{r} \frac{da}{ds}$ . Контактний тиск на поверхні напрямної з круглими канавками з кроком  $k$  буде:

$$\sigma = \frac{Q}{L} \left( \frac{k}{bk - \pi a^2 \sqrt{R/r}} \right). \quad (4)$$

Після підстановок у модель зношування і перетворень маємо звичайне диференціальне рівняння з розділюючимися змінними:

$$\left( \frac{Qc_w k f V b r}{L H B v} \right) ds = a (\pi a^2 \sqrt{R/r} - bk) da. \quad (5)$$

Інтегруючи це рівняння, після відповідних алгебраїчних перетворень і спрощень отримали вираз для розрахунку зносу напрямної з канавками змінної глибини круглого перетину:

$$u_w = \left( \frac{Qc_w k f V b}{L H B v} \frac{1}{bk - \pi r h_0 \sqrt{\frac{R}{r}}} \right) s. \quad (6)$$

За аналогічною методикою вираз для зносу напрямної з канавками змінної глибини трикутного перетину:

$$u_w = \left( \frac{Qc_w k f V b \cdot \text{tg} \alpha}{L H B v} \frac{1}{bk - h_0^2 \sqrt{2R \text{ctg} \alpha}} \right) s. \quad (7)$$

Розрахунок зносу напрямних ковзання за запропонованими методиками показав, що знос напрямної з круглим профілем маслоутримувальних канавок більший порівняно з напрямними, модифікованими маслоутримувальними канавками з трикутним профілем.

Проведений розрахунок циліндричної напрямної ковзання з урахуванням перекосу осей. Схема взаємодії валу і циліндричної опори показаний на рис. 3.

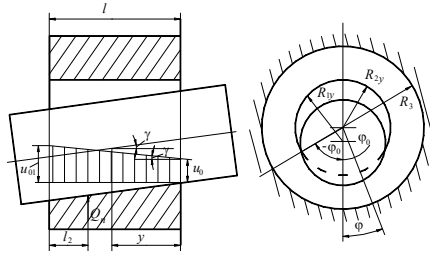


Рис. 3. Схема силової взаємодії валу та напрямної при перекосі осей

Для розв'язання контактної задачі при перекосі циліндрів використано метод еквівалентної податливості. Розподіл максимальних тисків уздовж валу приймався лінійним. На основі прийнятих припущень визначалась залежність контактних тисків  $\sigma(\varphi, y)$  та навантаження  $Q_y$  від геометричних та фізичних параметрів у кожному перерізі. Межі області контакту знаходились з умови рівноваги валу під дією зовнішніх сил та контактних тисків:  $Q_n = \int_0^l Q_y dy$ . В результаті контактні тиски визначались за формулою:

$$\frac{Q_n(k_1 + k_2)}{R_2} = \int_0^l \Delta_y \left[ (\varphi_{oy} \sec \varphi_{oy}) - (\varphi_{uy} \sec \varphi_{uy} - \sin \varphi_{uy}) \right] dy, \quad (8)$$

де

$$\sec \varphi_{oy} = A_y, \quad \varphi_{oy} = \operatorname{arcsec} A_y, \quad \sin \varphi_{oy} = \sqrt{1 - A_y^{-2}}, \quad A_y = \frac{u_{oy} + \Delta_y + \delta_y}{\Delta_y},$$

$$\sec \varphi_{uy} = B_y, \quad \varphi_{uy} = \operatorname{arcsec} B_y, \quad \sin \varphi_{uy} = \sqrt{1 - B_y^{-2}}, \quad B_y = \frac{\Delta_y + \delta_y}{\Delta_y}.$$

Рівняння (8) дозволяє визначити контактний тиск у будь-якому перерізі сполучення з урахуванням заданих умов. Взяття інтеграла у випадку елементарних функцій є складним. Для використання загального рішення доцільно застосовувати чисельний алгоритм.

**В четвертому розділі** на основі побудованої скінчено-елементної моделі спряження «клапан-напрямна» проведений аналіз впливу визначальних трибологічних факторів: швидкості ковзання в контакті, кута перекосу, коефіцієнту тертя на контактні напруження в процесі контактної взаємодії.

Об'єктом досліджень була прийнята збірна solid-модель клапану разом з напрямною (рис. 4) у складі головки блоку циліндрів. Для аналізу умов експлуатації клапанного механізму та їх впливу на трибологічні характеристики будувалась скінчено-елементна розрахункова модель даного вузла за допомогою прикладної програми Ansys. Фрикційний контакт штоку клапана з напрямною показаний на рис. 5.

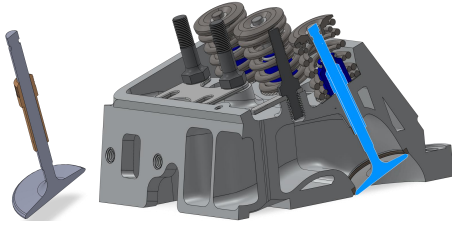


Рис. 4. Клапан з напрямною у зборі

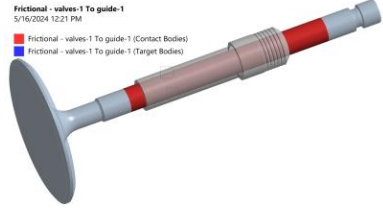
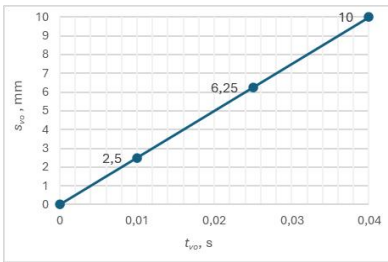
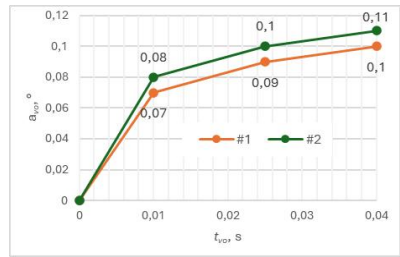


Рис. 5. Фрикційний контакт штоку клапана з напрямною

На рис. 6 показані прийняті параметри кінематики руху клапанного механізму: тривалість відкриття клапана 0,04 с, що відповідає обертам двигуна 600...800 об/хв; хід штоку 10 мм; кут перекосу є ступінчастим і аналізується при двох його варіантах (крива 1 та 2 на рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. Кінематика руху клапана: а) хід штоку; б) кут перекосу

Кут перекосу виникає в результаті тиску кулачка на наконечник клапана: повертаючись, розподільчий вал окрім нормальних зусиль створює також тангенціальні. Згідно з графіком кута перекосу крива 1 має максимальне значення  $0,1^\circ$  станом на кінець експерименту. Крива 2 є більш інтенсивною та викликає вищі значення напружень. Приріст середніх напружень становить 25–30 % для поверхні клапана та 30–40 % для напрямної.

Аналіз впливу коефіцієнту тертя на величину контактних напружень (рис. 7) показав, що збільшення коефіцієнту тертя викликає збільшення контактних напружень як для клапану, так і для напрямної, що не протерічить усталеним принципам зносоконтактної взаємодії у фрикційному контакті.

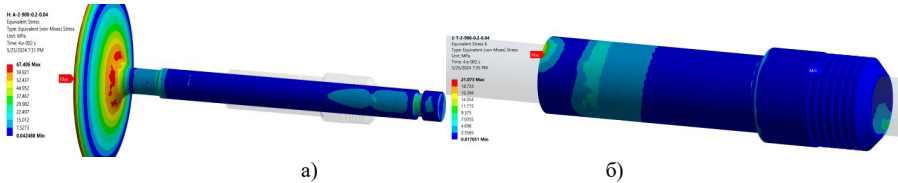


Рис. 7. Карти напружень по Мізесу моделей клапану і напрямної

На рис. 8 наведена діаграма ресурсних випробувань клапанного механізму для різної комбінації вихідних даних умов роботи по: матеріалам, куту перекосу, температурі поверхні, коефіцієнту тертя, числа обертів. За критерій ресурсу

прийнята кількість циклів  $N$ , які здатні витримати клапан та напрямна у кожному режимі.

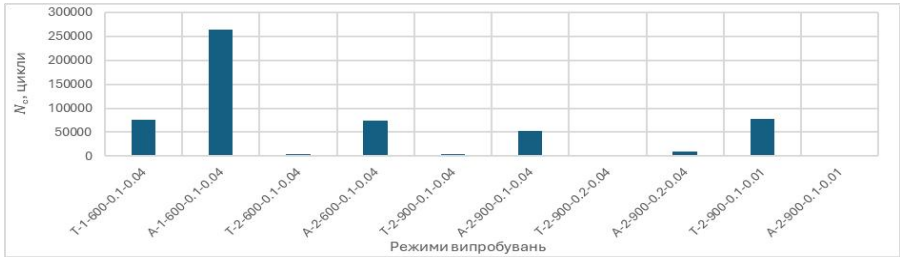


Рис. 8. Результати ресурсних випробувань клапанного механізму:

T – матеріал клапану (A – 40XH (AISI 321) або T – Ti-6Al-4V;

1 – номер кривої кута перекоосу; 600 (900) – температура на поверхні головки клапана; 0,1 (0,2) – коефіцієнт тертя; 0,04 (0,01) – тривалість відкриття клапана

В результаті найвища довговічність отримана для умов, які відповідають найменшому значенню контактних напружень відповідно до наведеного вище аналізу впливу експлуатаційних факторів.

Для відновлення, підвищення мастильної здатності і зносостійкості запропоновано створення спеціального спірального маслоутримувального профілю. Для цього використаний спеціальний інструмент-накатка фірми TOKAR із швидкорізальної сталі.

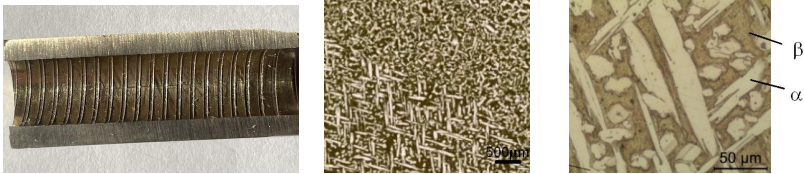


Рис. 9. Мастильні канавки на напрямній і структура деформованої бронзи

Мікрофотографії показують, що зміцнений пластичним деформуванням поверхневий шар мідного сплаву (бронзи) складається з  $\alpha$ -фази та  $\beta$ -фази (рис. 9), і що  $\alpha$ -фаза має довгу острівну форму, типову для деформованої бронзи. Для дослідження ефективності запропонованого мастильного профілю були проведені випробування на зносостійкість напрямних втулок. Для цього був розроблений спеціальний стенд для випробувань клапанного механізму, показаний на рис. 10.

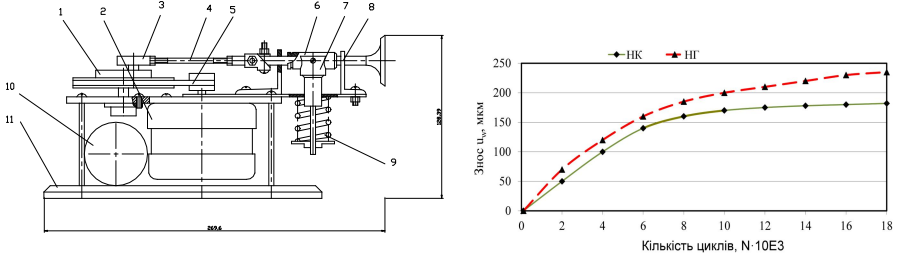


Рис. 10. Стенд для випробувань на знос клапанного механізму та результати випробувань

Результати випробувань на знос напрямних втулок із спіральними маслоутримувальними канавками (рис. 10) підтвердили їх ефективність. Величина зносу втулок з канавками для всього часового діапазону випробувань в середньому на 20 % менша ніж величина зносу втулок без канавок.

Для дослідження впливу маслоутримувального профілю втулки напрямної на трибоконтактні характеристики пари тертя була побудована скінченно-елементна модель спряження «напрямна-клапан» з мастильними канавками. Методом екструзії тіла solid-моделі отриманий з кроком 3 мм канал шириною 1,5 мм та глибиною 0,05 мм (рис. 11).

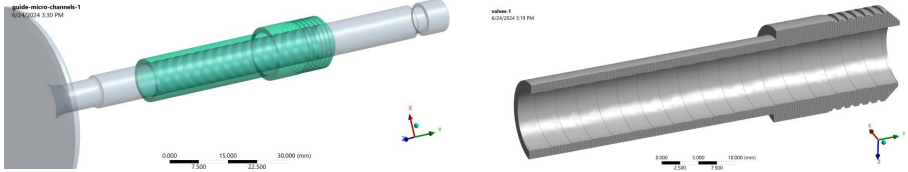


Рис. 11. Solid-модель напрямної з мастильними каналами

Було проведено дослідження товщини мастильного шару (зазору) в парі «клапан-напрямна». На рис. 12 представлено величину товщини шару, встановлено, що протягом усього експерименту зберігається сталий зазор у впадинах, про що свідчить синій колір шкали. Порівняння напружень на поверхні виступів каналів зі всією поверхнею показало на їх практичну однаковість. Це свідчить про те, що впадини заповнені маслом сприймають напруження аналогічні твердому металевому контакту на виступах, що підтверджує їх високу несучу здатність.

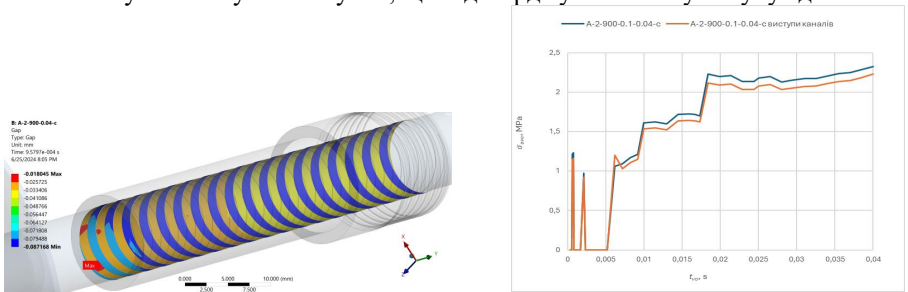


Рис. 12. Карта товщини мастильного шару і порівняння напружень на поверхні виступів каналів з поверхнею отвору напрямної

Результати впливу мастильного профілю напрямної клапана на рівень напружень в спряженні свідчать про зниження контактних напружень на напрямній в середньому на 20 %. Враховуючи, що контактні напруження є визначальним фактором процесу зношування констатуємо про позитивний вплив мастильного профілю на зносостійкість.

**У п'ятому розділі** запропонована технологія плазово-порошкового наплення штоків напрямного механізму клапанів. В якості вихідних матеріалів для нанесення покриття вибрано порошок марки ПГ-10Н-01, основою якого є нікель. Будова порошку у вихідному стані та вигляд процесу нанесення покриття

представлено на рис. 13. Обробка проводилась на базі установки «Київ-7», яка знаходиться на підприємстві «ХКП "Електротранс" м. Хмельницького».

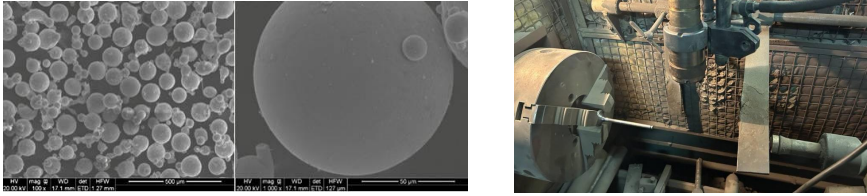


Рис. 13. Порошок ПГ-10Н-01 і вигляд процесу напилення

Для визначення оптимальних технологічних параметрів плазмового напилення за критерієм максимальної твердості був проведений повний факторний експеримент за допомогою програми Statistica. Як вихідні фактори оптимізації були прийняті: сила струму, дистанція напилення та витрати порошку. Графіки функцій відгуку для мікротвердості від комбінації визначальних факторів, показані на рис. 14. Аналіз отриманих графіків показує, що фактори експерименту мають визначений екстремальний вплив на мікротвердість.

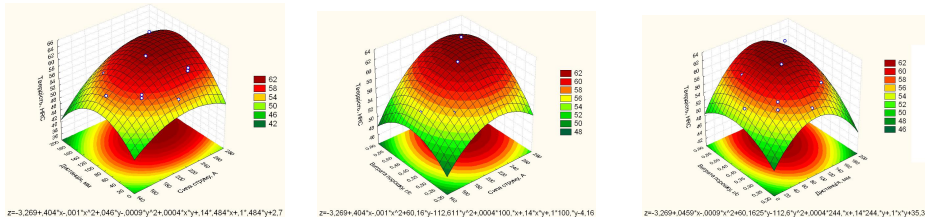


Рис. 14. Графіки функцій відгуку та апроксимуючі кореляційні функції

Для визначення оптимальних значень визначальних факторів була проведена сплайн-апроксимація результатів плану за критерієм максимальної мікротвердості. Встановлено, що для досягнення оптимальних значень мікротвердості необхідні наступні параметри: сила струму 244 А, дистанція напилення 100 мм та витрати порошку 0,48 г/с.

Після нанесення плазмового покриття досліджено мікроструктуру та властивості отриманого шару.

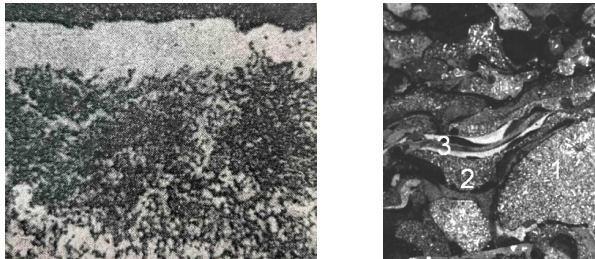


Рис. 15. Мікроструктура плазмового покриття NiCrBSi та його складові

Зміцнений шар, як показано на рис. 15 щільно покриває поверхню деталі, має товщину 280...300 мкм і складається з частинок неправильної геометричної форми, але зерниста структура зберігається. Сформовані покриття мають складну структуру, де виявлені нерозплавлені та недеформовані частинки (1), нерозплавлені, але пластично деформовані частинки (2), а також розплавлені частинки (3).

На рис. 16 наведені результати дослідження мікротвердості покриття, яке показало, що твердість покриття є значно вищою, ніж у не напиленої поверхні. Встановлено, що проведення рекристалізаційного відпалу після напилення підвищує твердість нанесеного покриття майже на 100...120 HV та ефективно впливає на зносостійкість покриття.

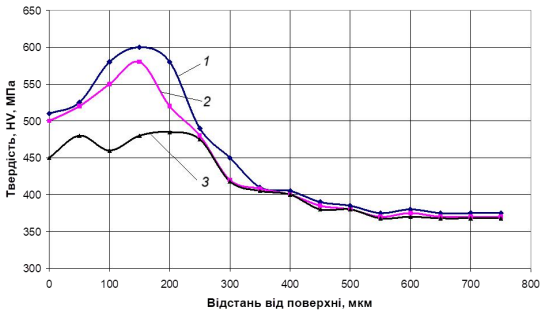


Рис. 16. Мікротвердість плазових покриттів системи Ni-Cr-B-Si:  
 1 – покриття системи Ni-Cr-B-Si з порошку ПГ-10Н-01 після термічної обробки;  
 2 – покриття системи Ni-Cr-B-Si з порошку ПГ-10Н-01 без відпалу;  
 3 – сталь 40Х без покриття

Для покращення властивостей покриття в було запропоновано додавати до складу порошку 5 % ферросиліцію. Результати мікродосліджень показали що це позитивно впливає на покращення маслоємності контактної поверхні штоку. На рис. 17 показана мікроструктура поверхні покриття з додаванням ферросиліцію, де збільшилась кількість пор які виступають як масляні резервуари.

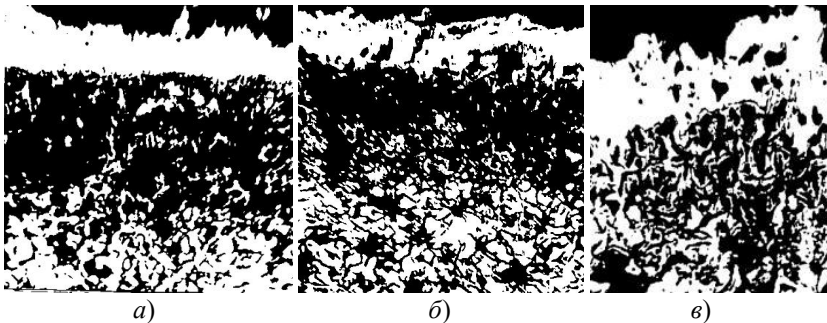


Рис. 17. Мікроструктура поверхні клапанау:  
 а) покриття отримане з порошку ПГ-10Н-01;  
 б) покриття з порошку ПГ-10Н-01 з додаванням 2 % ферросиліцію,  
 в) покриття з порошку ПГ-10Н-01 з додаванням 5 % ферросиліцію

На рис. 18 наведені результати досліджень зносостійкості матеріалу штоку клапана, отримані на машині тертя СМЦ-2. Випробування показали, що вищу зносостійкість мають зразки з покриттям, що піддавалось термічній обробці.

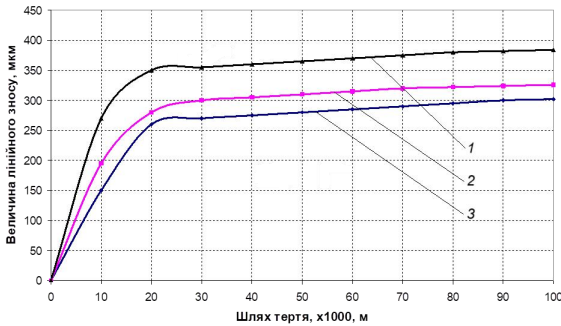


Рис. 18. Зносостійкість плазових покриттів з порошку системи Ni-Cr-B-Si:  
 1 – сталь 40X без покриття;  
 2 – покриття системи Ni-Cr-B-Si з порошку ПГ-10Н-01 без відпалу;  
 3 – покриття системи Ni-Cr-B-Si з порошку ПГ-10Н-01 після термічної обробки

За результатами мікроструктурного аналізу обґрунтовано адгезійний механізм зношування нанокристалічної фази нанесеного покриття: продукти зносу при цьому розміщуються на поверхні частинок порошку та в проміжках між ними, забруднюючи поверхню та підвищуючи знос.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасних досліджень показав, що технологічні методи інженерії поверхні стають альтернативою конструктивним змінам, внесеним для підвищення ефективності циліндричних напрямних ковзання технологічних і транспортних машин, в тому числі для деталей клапанного механізму.

2. Для напрямних ковзання запропонований профіль маслоутримувальних канавок із змінною глибиною, що має оптимальну маслонесучу здатність і мінімальне витікання мастильного матеріалу. Наведений розрахунок зносоконтактних параметрів та моделювання зносу напрямних ковзання з маслоутримувальними канавками змінної глибини круглого і трикутного профілю.

3. Отримане рішення задачі про перекос в напрямній ковзання з урахуванням припущення про те, що кожен переріз за жорсткістю характеристик перебуває в стані плоскої деформації, а безперервність функцій переходу від перерізу до перерізу забезпечується геометричною безперервністю валу і втулки вздовж осі циліндрів.

4. На основі побудованої скінчено-елементної моделі спряження «клапан-напрямна» проведений аналіз впливу визначальних трибологічних факторів: швидкості ковзання в контакт, температури, кута перекосу, коефіцієнту тертя на контактні напруження як для кожної деталі пари тертя, так і в процесі контактної взаємодії.

5. Запропонований спеціальний інструмент і технологія отримання маслоутримувального профілю на внутрішній поверхні напрямної клапана, який збільшує маслосумісність поверхні, а отже, покращуються умови змащення в парі тертя «клапан-напрямна». Результати випробувань на знос напрямних втулок із спіральними маслоутримувальними канавками показали, що величина зносу втулок із канавками в середньому на 20 % менша ніж величина зносу втулок без канавок.



6. На основі скінчено-елементної моделі проаналізована довговічність пари «клапан-напрямна» з маслоутримувальними канавками. Визначено скільки циклів здатна витримати контактна поверхня напрямної у кожному з режимів. Отримано, що завдяки скороченню значення максимальних напружень на 16,7 % фактичний ресурс напрямної з канавками зріс у понад 6 разів.

7. Показано ефективність використання покриттів з самофлююсівних порошоків на основі нікелю для підвищення зносостійкості штоку клапанного механізму. Для плазмового напилення на основі планування факторного експерименту встановлені оптимальні технологічні параметри за критерієм мікротвердості: сила струму 244 А, дистанція напилення 100 мм та витрати порошку 0,48 г/с.

8. Мікроструктурний аналіз дозволив визначити структуру та фазовий склад напиленого порошку та запропонувати шляхи підвищення його твердості та зносостійкості: покриття після напилення піддавали рекристалізаційному відпалу при 590 °С для збільшення кількості кристалічної фази в структурі (збільшення кількості карбідів хрому Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> нітридів бору Ni<sub>3</sub>B, силіцидів хрому Cr<sub>3</sub>Si), внаслідок чого твердість підвищилась на 100...120 HV.

9. За результатами мікроструктурного аналізу обґрунтовано адгезійний механізм зношування нанокристалічної фази нанесеного покриття: продукти зносу розміщуються на поверхні часточок порошку та в проміжках між ними, забруднюючи поверхню та підвищуючи знос. Доведено позитивний вплив від введення до основного порошку при плазмовому напиленні 5 % феросиліцію, що сприяє зменшенню інтенсивності зношування за рахунок покращення маслоємності поверхні тертя.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *У періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР та ЄС*

1. Dykha A., Zaspа Y., Vychavka A. Tribo-acoustic analysis of the processes of dynamic friction. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2017. Vol. 19, No 2. P. 11–14. [https://www.academia.edu/35187468/MOTROL\\_Commission\\_of\\_Motorization\\_and\\_Energetics\\_in\\_Agriculture\\_2017\\_Vol\\_19\\_No\\_2](https://www.academia.edu/35187468/MOTROL_Commission_of_Motorization_and_Energetics_in_Agriculture_2017_Vol_19_No_2) (Проведені експериментальні дослідження процесів тертя і зношування в умовах динамічних навантажень зразків).

### *У фахових виданнях*

2. Диха О. В., Бабак О. П., Посонський С. Ф., Вичавка А. А. Модифікація поверхневої будови трибосполучень комбінованою електрофізичною обробкою. Наукові нотатки. 2011. № 31. С. 124–128. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2011\\_31\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2011_31_24) (розроблені режимі електроконтактного зміцнення циліндричної напрямної ковзання).

3. Диха О., Вичавка А. Розрахунок зносу напрямної ковзання з маслоутримуючими канавками трикутного профілю. Проблеми трибології. 2016. 3, 92–97. <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/92> (побудована розрахункова схема, визначені вихідні рівняння, наведений приклад розрахунку напрямної).

4. Диха О., Вельбой В., Вичавка А. Вплив тертя на трибоконтактні параметри напрямних ковзання технологічного обладнання. Проблеми трибології. 2016. № 4, С. 17–24. <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/17> (проаналізовані характеристики тертя в циліндричних напрямних ковзання технологічного устаткування для пластичного деформування).

5. Диха О. В., Вичавка А. А., Вельбой В. П. Моделі зношування напрямних ковзання з маслоутримувальними профілями змінної глибини. Проблеми трибології (Problems of Tribology). 2017. № 1 С. 68–78. <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/582> (побудовані алгебраїчні залежності для розрахунку зношування напрямних ковзання із канавками змінної глибини).

6. Диха О., Вичавка А., Дитинюк В. Визначення зносу і технологія обробки мастильних канавок круглого профілю. Проблеми трибології. 2017. № 84(2). С. 86–92. <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/602> (отримані залежності для контактних параметрів і зносу поверхонь із маслоутримувальними канавками круглої форми).

7. Диха О. В., Посонський С. Ф., Маковкін О. М., Вичавка А. А. Розрахункова оцінка зносостійкості матеріалів напрямних ковзання. Наукові нотатки. 2017. № 58. С. 119–124. [https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/issue/view/45/51](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/45/51) (розроблена комплексна методика розрахунку зносу напрямних ковзання з урахуванням геометричного профілю мастильних канавок).

8. Makovkin O.M., Vychavka A.A., Valchuk I.K. Uninterrupted control of coating thickness during the wear process of vehicle units. Problems of Tribology. 2023. 28(4/110), 52–57 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-52-57> (модернізована система вимірювань зносу на універсальній машині тертя).

9. Dykha O., Dytyniuk V., Hrypynska N., Vychavka A. Optimization of technological parameters at discrete strengthening of steel cylindrical surfaces. Problems of Tribology. 2024. 29(1/111), 45–52. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-45-52> (на основі факторного експерименту визначені оптимальні параметри режиму зміцнення поверхні).

10. Vychavka A., Dykha O., Hetman M. Analysis of tribological aspects during operation and repair of internal combustion engine valve mechanism parts. Problems of Tribology. 2024. 29(2/112), 37–49. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-112-2-37-49> (проведений аналіз технологій ремонту і відновлення деталей клапанного механізму).

11. Holenko K., Vychavka A., Dykha M., Dytyniuk V. Finite-element analysis of contact characteristics and friction modes of the "valve-guide" of the internal combustion engine. Problems of Tribology. 2024. 29(3/113). 43–55. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-113-2-43-55> (побудована скінчено-елементна модель напрямної клапанного механізму і визначений вплив факторів на напружений стан).

12. Вичавка А., Диха О. Визначення контактного тиску в циліндричній напрямній ковзання з перекосом осей. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2024. 341(5), 490–496. <https://doi.org/10.31891/rke6mj38> (визначений вплив розмірів напрямної і кута перекоосу на величину максимальних контактних тисків у циліндричній напрямній ковзання).

### *Матеріали і тези конференцій*

13. Диха О.В., Посонський С. Ф., Диха М. О., Вичавка А. А. Прогресивні технології зміцнювальної обробки зносостійких технологічних поверхонь. Інноваційні матеріали в машинобудуванні: матеріали Міжн. наук.-практ. конф., Запоріжжя, ЗНТУ, 2011. С. 119–121 (*визначені режими зміцнення циліндричної деталі електрофізичною обробкою*).

14. Диха О. В., Вичавка А. А. Контактні характеристики маслоутримувального профілю для плоских напрямних ковзання. Підвищення надійності машин та обладнання: збірник тез VI Всеукр. наук.-практ. конф., Кіровоград, КНТУ, 2012. С. 68–70 (*отримані розрахункові залежності для фактичної площі контакту в напрямній*).

15. Диха О. В., Вичавка А. А. Формування зносостійких маслоутримувальних профілів на плоских поверхнях деталей машин. Університетська наука: збірник тез Міжн. наук.-техн. конф., Маріуполь, ДВНЗ «ПДТУ», 2012. С. 291 (*запропонований пристрій для обробки маслоутримувального профілю*).

16. Диха О. В., Бабак О. П., Вичавка А. А. Дослідження режиму тертя у напрямних ковзання поступального руху. Енерго- та ресурсозбереження і трибологія: тези Міжн. наук. конф., Миколаїв, ЧДУ ім. П. Могили, 2012. С. 36 (*проведені випробування на тертя для зворотньо-поступального руху*).

17. Вичавка А. А., Бабак О. П., Посонський С. Ф. Підвищення мастильної здатності деталей за допомогою обкатування поверхні роликками. Підвищення надійності машин і обладнання: тези VIII Всеукр. наук.-практ. конф., Кіровоград, КНТУ, 2014. С. 96–98 (*модернізована конструкція роликового накатника*).

18. Диха О. В. Вичавка А. А. Дослідження характеристик тертя напрямних ковзання машин. Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь: тези III Всеукр. наук.-практ. конф., Житомир, ЖНАУ, 2017. С. 191–194 (*отримані залежності коефіцієнту тертя від величини навантаження*).

19. Бабак О. П., Посонський С. Ф., Вичавка А. А. Дослідження зносостійкості конструкційних матеріалів деталей автомобільної промисловості. Підвищення надійності машин і обладнання: матеріали Міжн. наук.-практ. конф., Кропивницький, ЦНТУ, 2020. 116–119 с. (*розроблена методика випробувань на знос*).

20. Вичавка А. А., Диха О. В., Ковтун О. С. Відновлення та підвищення зносостійкості клапанів ДВЗ плазмовим напиленням. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: матеріали VI Міжн. наук.-практ. конф., Кропивницький, ЦНТУ, 2024. С. 14–16 (*отримана і проаналізована структура плазмового покриття*).

21. Диха О., Вичавка А., Диха М., Дитинюк В. Ремонт клапанів ГРМ автомобільного двигуна напиленням зносостійкого покриття. Прикладна механіка: праці I Міжн. наук.-техн. конф., Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя. 2024. С. 92–94 [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/45237/7/Zbirnyk\\_tez\\_2024\\_bez\\_obkladynky.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/45237/7/Zbirnyk_tez_2024_bez_obkladynky.pdf) (*визначені і обґрунтовані режими відновлення штоку клапана двигуна*).

### Патенти

22. Пат. 116536 Україна, МПК В23Р6/02 (2006.01), В05D 5/00. [Спосіб](#) відновлення напрямних ковзання полімерним антифрикційним матеріалом / О. В. Диха, В. П. Вельбой, А. А. Вичавка ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – и 201612345 ; заявл. 05.12.2016 ; опубл. 25.05.2017. Бюл № 10. 3 с. (*описана технологія отримання зносостійкого шару на напрямній*).

23. Пат. 118570 Україна, МПК В24В 39/04 (2006.01). [Спосіб](#) формування маслоутримувального макропрофілю / О. В. Диха, В. П. Вельбой, А. А. Вичавка; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – и 201702553 ; заявл. 20.03.2017 ; опубл. 10.08.2017. Бюл № 15. 3 с. (*розроблена конструкція пристрою для обробки мастильних канавок*).

24. Пат. 123693 Україна, МПК В23Р 8/02 (2006.01). Напрямна ковзання / О. В. Диха, В. П. Вельбой, О. П. Бабак, А.А. Вичавка ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – и 2017 07578 ; заявл. 17.07.2017 ; опубл. 12.03.2018. Бюл № 5. 3 с. (*запропонована нова конструкція напрямної ковзання*).

### АНОТАЦІЯ

**Вичавка А. А. Підвищення зносостійкості і мастильної здатності циліндричних напрямних ковзання комбінованою обробкою.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2025.

У результаті виконання дисертаційної роботи було розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення зносостійкості і мастильної здатності циліндричних напрямних ковзання шляхом створення ефективного маслоутримувального профілю і зміцнення робочих поверхонь плазмовим напиленням. Метою роботи було створення аналітичних та комп'ютерних моделей зносостійкості і мастильної здатності пар тертя циліндричних напрямних ковзання та вибір і обґрунтування технологічних способів підвищення їх довговічності. Для напрямних ковзання запропонований профіль маслоутримувальних канавок із змінною глибиною від максимальної в центрі несучої поверхні до нуля на границі поверхні тертя. Наведений розрахунок зносоконтактних параметрів та моделювання зносу напрямних ковзання з маслоутримувальними канавками змінної глибини круглого і трикутного профілю. На основі прийнятих припущень у загальному вигляді представлено рішення для визначення кута контакту у циліндричній напрямній ковзання з перекосом осей циліндрів у вигляді трансцендентного рівняння. На основі побудованої скінчено-елементної моделі спряження «клапан-напрямна» проведений аналіз впливу визначальних трибологічних факторів: швидкості ковзання в контакті, температури, кута перекосу, коефіцієнт тертя на контактні напруження як для кожної деталі пари тертя, так і в процесі контактної взаємодії.

Запропонований спеціальний інструмент і технологія отримання маслоутримувального профілю на внутрішній поверхні напрямної клапана. Результати випробувань на знос напрямних втулок із спіральними маслоутримувальними канавками підтвердили їх ефективність за критерієм зносостійкості. За допомогою Solid-моделі проаналізований вплив зміни геометрії з мастильними канавками отвору напрямної на показники максимальних і середніх напружень в контактні «напрямна-клапан». Визначено скільки циклів здатна витримати контактна поверхня напрямної у кожному з режимів. Показана ефективність використання покриттів з самофлюсуючих порошків на основі нікелю для підвищення зносостійкості важко навантажених деталей. Мікроструктурний аналіз дозволив визначити структуру та фазовий склад напиленого порошку та запропонувати шляхи підвищення його твердості та зносостійкості.

**Ключові слова:** напрямна ковзання, маслоутримувальний профіль, зносоконтактна задача, перекося осей, коефіцієнт тертя, комп'ютерне моделювання, контактні напруження, клапанний механізм, плазмове напилення, покриття, мікротвердість, знос, мікроструктура

## ABSTRACT

**Ychavka A.A. Increasing the wear resistance and lubricity of cylindrical sliding guides by combined processing.** – Manuscript.

Thesis for the candidate's degree in technical sciences by speciality 05.02.04 – Friction and Wear in Machines. – Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, 2025.

As a result of the dissertation work, the current scientific and applied problem of increasing the wear resistance and lubricity of cylindrical sliding guides was solved by creating an effective oil-retaining profile and strengthening the working surfaces by plasma spraying. The purpose of the work was to create analytical and computer models of the wear resistance and lubricity of friction pairs of cylindrical sliding guides and to select and justify technological methods for increasing their durability.

Analysis of modern research has shown that technological methods of surface engineering are becoming an alternative to constructive changes made to increase the efficiency of cylindrical sliding guides of technological and transport machines, including for valve mechanism parts.

For sliding guides, a profile of oil-retaining grooves with a variable depth from maximum in the center of the bearing surface to zero at the boundary of the friction surface is proposed. It has been established that such a profile has optimal oil-retaining capacity and minimal leakage of lubricant. The calculation of wear-contact parameters and modeling of wear of sliding guides with oil-retaining grooves of variable depth of a round and triangular profile are presented.

It is established that the solution of the problems of skew in the sliding support is based on the assumption that each section in terms of stiffness

characteristics is in a state of plane deformation, and the continuity of the transition functions from section to section is ensured by the geometric continuity of the shaft and sleeve along the axis of the cylinders. Based on the assumptions made, the solution is presented in general form for determining the contact angle in the form of a transcendental equation.

Based on the constructed finite element model of the "valve-guide" coupling, an analysis of the influence of the determining tribological factors: sliding speed in contact, temperature, skew angle, friction coefficient on contact stresses both for each part of the friction pair and in the process of contact interaction is carried out.

A special tool and technology for obtaining an oil-retaining profile on the inner surface of the valve guide is proposed, which increases the oil capacity of the surface, and therefore, improves the lubrication conditions in the friction pair "valve-guide". The results of wear tests of guide bushings with spiral oil-retaining grooves confirmed their effectiveness according to the wear resistance criterion. The wear value of bushings with grooves for the entire time range of tests is on average 20 % less than the wear value of bushings without grooves.

Using the Solid model, the influence of changing the geometry with lubricating grooves of the guide hole on the indicators of maximum and average stresses in the "guide-valve" contact was analyzed. It was determined how many cycles the contact surface of the guide can withstand in each of the modes. It was obtained that due to the reduction in the value of maximum stresses by 16.7 %, the actual resource of the guide with grooves increased by more than 6 times.

The effectiveness of using self-fluxing nickel-based powder coatings to increase the wear resistance of heavily loaded parts is shown. For plasma spraying, based on the planning of a factorial experiment, optimal technological parameters were established according to the microhardness criterion: current strength 244 A, spraying distance 100 mm and powder consumption 0.48 g/s. Microstructural analysis allowed us to determine the structure and phase composition of the sprayed powder and suggest ways to increase its hardness and wear resistance. The positive effect of introducing 5 % ferrosilicon into the main powder during plasma spraying has been proven, which contributes to the formation of pores in the surface layer as lubricating reservoirs to increase the oil capacity of the surface and reduce friction and wear.

The practical significance of the results obtained lies in the recommendation for use at motor transport and repair enterprises of the methods proposed in the work for the restoration and increase of the durability of the valve mechanism parts of internal combustion engines.

**Keywords:** sliding guide, oil retaining profile, wear-contact problem, axis misalignment, friction coefficient, computer modeling, contact stresses, valve mechanism, plasma spraying, coating, microhardness, wear, microstructure.

Підписано до друку 23.01.2025. Формат 30×42/4.  
Ум. друк. арк. – 0,9. Обл.-вид. арк. – 1,0.  
Наклад 100 прим. Зам. № 8/25, 2025

---

Редакційно-видавничий відділ ХНУ.  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1.  
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.