

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики**

**Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем**

**Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису**

**СЮРАВЧИК ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ**

**УДК 621.891**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Підвищення зносостійкості циліндропоршневої групи  
автотракторних дизелів**

**208 “Агроінженерія”**

**Подається на здобуття освітнього ступеня магістр**

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ **В.І. Сюравич**

**Керівник роботи**

**Міненко С.В.**

**кандидат технічних наук**

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Сюравчик Володимир Ігорович. Підвищення зносостійкості циліндропоршневої групи автотракторних дизелів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

За результатами проведених досліджень оптимізовано склад металевих плазмових покриттів по твердості і когезійній міцності. Розроблене покриття має склад 24...36% Fe + 24% Ni + 41...51% Cr, яке забезпечує поряд із твердістю достатню адгезійно-когезійну міцність комбінованого покриття і дозволяє досягнути інтенсивність зношування меншу за гальванічне покриття хрому як при молекулярно-механічному, так і при абразивному зношуванні при неперевершенні рівня зносу гільзи циліндру.

Експериментальними дослідженнями на машині тертя підтверджена правильність структурно-енергетичного підходу до оптимізації складу дисперсно-армованого покриття по термічних внутрішніх напругах, а дослідження у ДВЗ довели працездатність таких плазмових покриттів складу молібден - оксид алюмінію.

Проведеними дослідженнями встановлено, що розроблена технологія дозволяє суттєво підвищити зносостійкість циліндропоршневої групи автотракторних двигунів і може бути рекомендована для застосування в ремонтні майстерні сільськогосподарських підприємств.

*Ключові слова: зносостійкість, циліндропоршнева група, двигун, покриття,*

## ANNOTATION

**Syuravchyk Volodymyr Ihorovych. Increasing the wear resistance of the cylinder-piston group of tractor diesels. – *Qualification work on the rights of the manuscript.***

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agricultural Engineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

According to the results of the conducted researches the composition of metal plasma coatings on hardness and cohesive strength is optimized. The developed coating has a composition of 24 ... 36% Fe + 24% Ni + 41 ... 51% Cr, which provides, along with hardness, sufficient adhesive-cohesive strength of the combined coating and allows to achieve a wear intensity less than the galvanic coating of chromium as in the molecular mechanical and abrasive wear with not exceeding the level of wear of the cylinder liner.

Experimental studies on the friction machine confirmed the correctness of the structural-energy approach to optimizing the composition of the disperse-reinforced coating by thermal internal stresses, and studies in the internal combustion engine proved the efficiency of such plasma coatings of molybdenum - alumina.

Studies have shown that the developed technology can significantly increase the wear resistance of the cylinder-piston group of tractor engines and can be recommended for use in repair shops of agricultural enterprises.

*Keywords: wear resistance, cylinder-piston group, engine, coating.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ЧИННИКИ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЦПГ ДВЗ.....	7
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	17
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30

## ВСТУП

На сьогоднішній день основним триботехнічним засобом підвищення довговічності ЦПГ ДВЗ є застосування гальванічного зносостійкого хромування робочої поверхні компресійних поршневих кілець. Проводиться також робота по застосуванню і дослідженню зносостійкості газотермічних покриттів різноманітного складу й інших методів зміцнення поверхні [1–5].

Дослідженнями [6; 7] показано, що із загального числа відмов тракторів та інших машин сільськогосподарського призначення, на долю двигунів цих машин припадає від 30 до 65%. Механічні втрати в поршневих двигунах внутрішнього згорання складають від 10 до 36% індикаторної потужності, 50...80% цих втрат пов'язано з тертям деталей ЦПГ. У свою чергу, найбільша частина втрат на тертя деталей ЦПГ (близько 80%) пов'язана з тертям поршневих кілець [8; 9]. Як наслідок, деталі ЦПГ, і особливо поршневі кільця, виявляються найменш довговічними деталями ДВЗ

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – підвищити надійність двигунів внутрішнього згорання за рахунок застосування зміцнюючі технологій для деталей циліндропоршневої групи.

Відповідно до сформульованої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- На основі аналізу літературних джерел визначити основні чинники зношування деталей ЦПГ ДВЗ;
- Розробити обладнання, оснастку та методику проведення досліджень;
- Підібрати оптимальний склад порошку для підвищення зносостійкості поверхонь тертя складових частин циліндропоршневої групи автотракторних двигунів.

**Об'єкт дослідження:** процес зношування деталей циліндропоршневої групи автотракторних двигунів

**Предмет дослідження:** закономірності впливу матеріалу, складу зносостійких покриттів та способу їх нанесення на зносостійкість деталей циліндропоршневої групи.

**Методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням загальнонаукових методів пізнання, методів діагностики технічного стану об'єктів, прикладної фізики, трибології та механіки. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою прикладних комп'ютерних програм.

**Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Сюравчик В. І.** Зношування сполучень «поршень-кільце-циліндр» та допустимі значення їх зносу. Збірник тез V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С. 284.

2. **Сюравчик В. І.** Вплив форсування ДВЗ на зношування деталей ЦПГ. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 196.

3. **Сюравчик В. І.** Дослідження механізму тертя та зношування в умовах роботи ДВЗ. IX Міжнародної науково-технічної конференції *«Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»*, 5-24 жовтня 2020 року, смт. Глеваха Київської області, Національний науковий центр «ІМЕСГ» НААН України. м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Видавничий центр НУБіП України, 2020.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи можуть бути впроваджені в ремонтних майстернях сільськогосподарських підприємствах України.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 18 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 31 сторінка комп'ютерного тексту, містить 3 таблиці і 11 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### ОСНОВНІ ЧИННИКИ ЗНОШУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЦПГ ДВЗ

На сьогоднішній день основним триботехнічним засобом підвищення довговічності ЦПГ ДВЗ є застосування гальванічного зносостійкого хромування робочої поверхні компресійних поршневих кілець. Проводиться також робота по застосуванню і дослідженню зносостійкості газотермічних покриттів різноманітного складу й інших методів зміцнення поверхні [1–5].

Дослідженнями [6; 7] показано, що із загального числа відмов тракторів та інших машин сільськогосподарського призначення, на долю двигунів цих машин припадає від 30 до 65%. Механічні втрати в поршневих двигунах внутрішнього згоряння складають від 10 до 36% індикаторної потужності, 50...80% цих втрат пов'язано з тертям деталей ЦПГ. У свою чергу, найбільша частина втрат на тертя деталей ЦПГ (близько 80%) пов'язана з тертям поршневих кілець [8; 9]. Як наслідок, деталі ЦПГ, і особливо поршневі кільця, виявляються найменш довговічними деталями ДВЗ [10; 11].

Інтенсивність зношування поршневих кілець залежить від конструкції та швидкості поршня, геометрії і епюри радіальних тисків поршневих кілець, їх рухливості і розташування замків, потужності двигуна і його навантаження, якості і кількості кілець, мастила і абразиву, що надходять у зону тертя, матеріалів сполучених деталей і інтенсивності їх охолодження, тиску газів, температури, сил інерції і так далі [6; 12–14]. У найбільш важких динамічних і температурних умовах працює верхнє компресійне кільце.

ДВЗ, особливо тракторні, працюють в умовах значної запиленості повітря (до  $1,52 \text{ г/м}^3$ ). Попадання абразивних часток (і часток зносу) в зону тертя обумовлює абразивний знос поверхонь кільця і гільзи циліндра [6; 13–18], причому найбільш небезпечним для деталей ЦПГ є пил з розмірами часток від 15 до 25 мкм [19–20].

В процесі горіння палива в камері згоряння двигуна утворюються водяні пари, вуглекислота, чадний газ, сірчистий ангідрид, оксиди азоту, деякі органічні кислоти і інші сполуки [6; 14; 15; 20]. Перебуваючи в газоподібному стані, ці сполуки спричиняють корозійну дію на деталі ЦПГ (хімічна або газова корозія). Проте, корозійна активність продуктів згоряння зростає у багато разів після взаємодії їх із водою, що утворюється в результаті конденсації водяної пари на деталях ЦПГ. Внаслідок ряду хімічних перетворень в циліндрах двигуна утворюються вугільна, сірчиста, сірчана і азотна кислоти, які інтенсивно руйнують металеві поверхні. Корозія в цьому випадку має електрохімічний механізм [3].

Дія агресивного середовища на деталі ЦПГ приводить до накопичення на їх поверхні продуктів корозії – переважно оксидів [4; 5]. При відносному переміщенні кільця в гільзі циліндра відбувається відшарування продуктів корозії – корозійно-механічне зношування [6-20]. Величина корозійно-механічного зносу деталей ЦПГ залежить від якості палива, головним чином від вмісту в ньому сірки, процесу і повноти згоряння палива, температури рідини, що охолоджує двигун, температури дзеркала циліндра, поршня і кілець, способу і якості змащування деталей ЦПГ, а головним чином – від матеріалу деталей ЦПГ та їх корозійності і зносостійкості.

У роботі [17] зроблено спробу визначення переважаючого виду зношення основних деталей тракторних дизелів, але при цьому дослідники зіштовхнулися з рядом труднощів. По-перше, вагомість видів зносу деталей двигунів залежить від типів тракторів. По-друге, більшість чинників, від яких залежить швидкість зносу деталей, змінюються в широких межах у залежності від кліматичного регіону, у якому використовуються трактори. По-третє, у процесі удосконалювання дизелів постійно змінюється ступінь їх форсування, питома матеріалоемність, конструкції основних і допоміжних агрегатів. Крім того, відбувається зміна якості застосовуваних палив і масел.



Ці зміни можуть не тільки вплинути на швидкість зносу основних деталей дизелів, але і докорінно змінити співвідношення різних видів зносу в загальному зносі деталей. Отже, необхідно проводити широкі дослідження з виявленням співвідношень видів зносу основних деталей для дизелів різних конструкцій, для різних типів тракторів і кліматичних регіонів. Така робота була виконана для найбільше масових тракторів: гусеничних класу 3 і колісних класу 1,4. Паралельно був виконаний великий обсяг стендових випробувань на одноциліндрових установках і розгорнутих двигунах, при яких імітувалися ті або інші види зносу, а також були проведені експлуатаційні випробування в літніх і зимових умовах. Виміри розмірів зносу в стендових і експлуатаційних умовах проводили методами мікрометражу, штучних баз і радіоактивних ізотопів.

За аналізом отриманих результатів загальний знос деталі був представлений як сума основного члена (множення середньої за рік роботи двигуна швидкості молекулярно-механічного зносу на річний наробіток двигуна) і додаткових. Додаткові члени являли собою множення відповідних коефіцієнтів прискорення зносу на наробіток двигуна при абразивному і корозійно-механічному зносі, а також множення середніх величин зносу деталі за один холодний пуск двигуна, один холодний пуск із підігрівом і один теплий пуск на число таких пусків за рік.

За результатами досліджень, у котрих також фіксувалися роки випуску тракторів (рівень конструктивної досконалості двигуна) і умови експлуатації (нормальні, за яких дотримувалися правил використання й обслуговування дизелів, і рядові, що реально існують удалині від станцій обслуговування) автори роблять наступні висновки. Абразивний знос був і поки залишається для деталей основних типів дизелів сільськогосподарського призначення переважним видом зносу. При цьому його питома вага в нормальних умовах експлуатації знизилася за останні сорок років із 70 до 50% за рахунок застосування вискоелективних агрегатів для очищення повітря. У рядових умовах експлуатації питома вага

абразивного зносу складає біля 60%, що пояснюється в більшості досліджуваних випадків наявністю підсосів нефільтрованого повітря.

Другим за вагомою для рядових умов експлуатації є знос деталей у процесі пуску і прогріву дизелів, який за своїм характером можна вважати корозійним. Його питома вага досягає 20%, хоча для нормальних умов його розмір переміщується на третє місце, укладаючи порядку 10%. Питома вага молекулярно-механічного зносу складає для нормальних умов експлуатації порядку 15%, причому його вагомість збільшується в міру удосконалення дизелів за рахунок форсування і поліпшення очищення повітря, палива і мастила. У рядових умовах його вагомість складає 8%. Вагомість корозійно-механічного зносу при роботі також збільшується в міру удосконалення дизелів і складає порядку 5% для нормальних і порядку 4% для рядових умов експлуатації. Ці висновки добре узгоджуються з результатами аналогічних іспитів автомобільних дизелів [6; 8].

За сучасними уявленнями в середній частині ходу поршня, де він переміщується із найбільшою відносно циліндра швидкістю, тертя кільця об гільзу циліндра здійснюється в гідродинамічному режимі змащування [8–15]. У такому режимі змащування прямих контактних взаємодій поверхонь немає. Можливі типи зношування – поверхневе втомне зношування і кавітаційне зношування (рідинна ерозія) [6].

Проте, поблизу верхньої мертвої точки, де швидкість руху кільця відносно циліндра близька до нуля, змащування стає неефективним і не запобігає контакту поверхні металів кільця і гільзи циліндра. У таких умовах – в режимах напіврідинного, граничного і навіть сухого тертя – виявляються можливими різні типи зношування. Між окремими областями виникають металеві зв'язки (містки зварювання), які при переміщенні кільця відносно гільзи циліндра деформуються і руйнуються із відокремленням частинок металу сполучених поверхонь. Такий вид руйнування, залежно від його масштабу і форми прояву, називають

механічним зносом, мікроконтактним схоплюванням, схоплюванням I або II роду [15; 21].

За недостатньому змащуванні зростає небезпека схоплювання спряжених поверхонь [19; 20]. Такі умови виникають кожного разу при пуску двигуна, особливо холодного, коли сполучені поверхні кільце-гільза і кільце-поршень випробовують граничне тертя і навіть тертя без змащування [20]. Деякі автори [19; 12] вважають, що припрацювання завжди супроводжується адгезійним зносом (схоплюванням), оскільки в цей період сполучені поверхні стикаються не за всією площею, а по окремих мікровиступах. При цьому необхідно відзначити, що явище схоплювання найвластивіше верхньому компресійному кільцю, що пояснюється умовами його роботи і особливостями змащування.

У поверхневих шарах матеріалів пар тертя “кільце - циліндр” під дією навантаження і сил тертя виникають знакозмінні напруги з високою швидкістю зміни, які спричиняють втому матеріалу в поверхневому шарі деякої товщини. Аналогічний ефект спричиняє дія швидкої зміни температур (для кожного ходу поршня перепад температур на верхньому кільці досягає  $\pm 30$  °С, а іноді  $\pm 50$  °С) – розпушування матеріалу поверхневих шарів. Переміщення кільця по циліндру супроводжується відокремленням частинок поверхні – має місце втомне зношування [6; 13].

Перераховані типи зношування поршневих кілець відзначають С.В. Венцель, К. Енгліш, А.А. Дерябін, А.Д. Шерман, Г.Г. Зундема і інші автори [4–8]. Звичайною для експлуатаційних умов є суперпозиція декількох видів зношування. В питанні, який вид зносу деталей ЦПГ двигуна є домінуючим, немає єдиної думки [1; 5]. Це пояснюється різноманітністю типів і конструкцій двигунів, умов і режимів їх роботи.

Так, М.А. Грігор'єв, В. Валь, Г.С. Лосавіо, А.А. Гурєєв та ін. [6–8; 2–4] вважають, що знос поршневих кілець носить, головним чином, абразивний характер. У роботі [5] показано, що для деяких двигунів абразивний знос складає 60...80% сумарного зносу гільз циліндрів і поршневих кілець. Подібні оцінки

містяться і в інших роботах [7; 9; 11]. П. Ёхрен вважає, що пошкодження поршневих кілець, що зустрічаються на практиці, спричиняються циклічними термічними і механічними навантаженнями [13].

Інші автори [2; 4; 5] відзначають важливість урахування корозійно-механічного зношування. У цій якості часто розглядають пусковий знос – знос кілець в періоди пуску і прогрівання двигунів [5; 6]. Мей відзначав, що основний знос деталей двигуна відбувається не при експлуатації під повним навантаженням, а в періоди пуску і при зупинках [6]. Цьому виду зносу також сприяє експлуатація за знижених температур і малих навантаженнях із частими зупинками. Знос деталей ЦПГ – складний багатоплановий процес. Так, мікроконтактне схоплювання супроводжується абразивним зносом за рахунок вирваних частинок металу [9], а окислення в деяких випадках локалізує процес мікроконтактного схоплювання в тонкому поверхневому шарі [1].

Зносостійкість торцевих поверхонь компресійних поршневих кілець визначає довговічність сполучення “кільце-канавка поршня”, граничний стан якого приводить до поломки кільця. Це обумовлено не лише жорсткими умовами роботи поршневих кілець, що розглянуто вище, але і деякими особливостями роботи сполучення [3; 4; 6].

Сила тертя кільця по канавці при перевалці поршня пропорційна тиску, що надається на торці кільця газами. Маса і пружність кільця можуть сприяти зміні притиску кілець до стінки канавки. Найбільший тиск газу надають на верхнє поршневе кільце, що працює в умовах корозійного і абразивного зносу, визначуваного температурним режимом і складом газів.

Знос спряження поршня із верхнім компресійним кільцем при експлуатації двигунів характеризується рядом особливостей [5]: у чавунних поршнях збільшення зазору в сполученні відбувається в рівній мірі із-за зносу кільця і канавки; в алюмінієвих поршнях швидкість зносу сполучення приблизно в 3 рази більша, ніж в чавунних, причому 70% збільшень зазору

припадає на знос чавунного кільця і 30% на знос алюмінієвої канавки, тобто твердіше чавунне кільце зношується швидше, ніж м'яка алюмінієва канавка.

Поверхня нижнього торця кільця має нерівномірну будову. Задирка з боку робочої поверхні відокремлена від всієї поверхні поясом, що складається з продуктів окислення [3]. Останнє свідчить про наявність між торцем кільця і канавкою абразивних часток. Інколи зустрічаються фігури, названі хвилями пластичності [6], які притаманні корозійно-механічному зношуванню чавунів.

Основна поверхня торця має блискучі металеві островці, оточені рихлістю. При великому збільшенні на такій травленій поверхні є видимими ділянки фосфідної евтектики, графіту і перлиту, оточені зруйнованим металом. Така структура, аналогічна описаній в роботі [7], є наслідком електрохімічної корозії.

Поряд з пилом, що надходить з повітрям, продуктами утворення нагару, гребенями оксидів алюмінію і іншими механічними частками [5] важливе значення для зносу торцевих поверхонь кільця мають продукти руйнування хромового покриття поганої якості.

За оцінкою довговічності поршневих кілець і розробці вимог до швидкості зносу їх поверхні особливе значення має величина граничного зносу. Очевидно, що ця величина має бути обумовлена такою зміною характеристик двигуна, за яких його подальша експлуатація недоцільна.

Розгляд всього комплексу характеристик – зниження потужності, компресії, підвищення витрат палива, мастила, прорив картерних газів – показує, що найбільш корелює із зносом кілець і легко реєструється витрата мастила на чад. Це підтверджується дослідженнями диференційованої оцінки витрат мастила у ДВЗ через основні механізми-споживачі, що мають загальну систему змащування [8].

Огляд досліджень, проведених світовими фірмами-виготовлювачами ДВЗ і деталей ЦПГ показує, що при номінальній частоті обертання колінвалу і потужності дизеля, що становить 90% експлуатаційної, в ЦПГ витрачається 55...75% від загальної витрати мастила, у турбокомпресорі 15...25%, у

клапанному механізмі 8,5...14%, у пневмокомпресорі 5...5,5% і на вентиляцію картера витрачається 1...1,5%. Саме вдосконалення деталей ЦПГ, зокрема поршневих кілець, дозволило понизити витрати мастила на чад в тракторних дизелях в 3...4 рази за останні 30 років. На практиці ця характеристика давно застосовується експлуатаційниками для практичної оцінки стану поршневих кілець, і емпіричним шляхом конструктори двигунів і фахівці з експлуатації виявили і внесли до документації граничні величини зносу кілець по тепловому зазору замка кільця і зазору кільце-канавка поршня (для тракторних двигунів 4...5 мм і 0,4...0,5 мм відповідно), перевищення яких збільшує витрати мастила на чад у 2,5...3,0 рази [9].

Статистична оцінка зносу поршневих кілець тракторних і комбайнових двигунів на підставі даних про знос і напрацювання, одержаних на машиновипробувальних станціях і ремонтних підприємствах різних кліматичних зон, проведена в роботі [4]. Отримані дані ілюструють залежність зносу верхніх компресійних кілець по торцевій і робочій поверхнях від напрацювання двигуна, показують, що знос спряжень “алюмінієва канавка поршня – хромоване по робочій поверхні поршневе кільце – чавунна гільза циліндру” доходить до своїх граничних значень за 7...8 тисяч мотогодин наробітку, дозволяють співвіднести знос поршневих кілець і витрати мастила на чад у міру проходження двигуном свого моторесурсу і виявляють зростання витрат мастила на чад в залежності від радіального і торцевого зносу кілець.

Отримані у роботі [4] результати визначають необхідні вимоги по стійкості поверхні поршневих кілець при нормальному зношуванні для перевершення ресурсу роботи у 7...8 тисяч мотогодин – заходи по окремому зміцненню торцевої поверхні верхнього компресійного кільця і збільшення товщин вживаного електролітичного хромового покриття на робочій поверхні до 0,4 мм.

Триботехнічне рішення проблеми підвищення зносостійкості деталей в даний час проводиться двома способами: зміцненням їх поверхні термічними, хіміко-термічними, механічними, радіаційними і іншими методами зміни

структури і складу поверхні [1–9] і нанесенням покриттів. Покриття дозволяють створити на поверхні деталі шар матеріалу із підвищеною твердістю, низьким коефіцієнтом тертя і високими механічними властивостями. Це призводить до зниження деформаційної складової тертя і зносу, що уповільнює формування тріщин і утворення часток зносу [7; 4]. Покриття ефективно знижують окислювальний, адгезійний і абразивний знос [7; 9].

Найширше у двигунобудуванні застосовуються електролітичні зносостійкі хромові покриття [2], які з 1960-х років швидко розширили свої основні області застосування: захист від зносу і корозії, відновлення зношених деталей машин і захисно-декоративна обробка деталей. Крім деталей машин зносостійкі хромові покриття обов'язково застосовуються на міряльному і різальному інструменті і різьбових калібрах, на прес-формах, матрицях і пуансонах, на поршневих кільцях і гільзах циліндрів, підвищуючи зносостійкість від 4 до 10 разів.

Особливістю електролітичних хромових покриттів є здатність змінювати в залежності від умов електролізу свою структуру з різними типами кристалічних решіток (ОЦК, гексагональна, типу  $\alpha$ -Mn, ГЦК), з мікрովключеннями кисню, водню, гідридів і оксидів, з різними внутрішніми напругами і з можливістю включення у склад покриття різних мікрочастинок твердих фаз від оксидів алюмінію до штучних алмазів. У свою чергу це дозволяє у широких межах змінювати основні властивості хромового покриття, включаючи твердість, зносостійкість і навіть модуль пружності (від 8 до 23 ГПа), який звичайно прийнято вважати постійною характеристикою матеріалу. Це і визначає актуальність досліджень, що проводяться по сьогоднішній день, з теорії, технології, структури, властивостей і застосування електролітичних хромових покриттів.

Значні переваги електролітичного хромування – високий рівень міцності зчеплення і низька температура процесу, при якому деталь нагрівається до

температур не вище 60 °С, що цілком виключає структурні зміни і деформації форми деталі. Недоліки електролітичного хромування – низький вихід хрому по струму, що призводить до великого розходу електроенергії і низької швидкості осаджування, і проблеми, пов'язані із наводнюванням деталі, токсичністю процесу, очищенням електроліту і стічних вод.

Не менш інтенсивно ведеться робота по дослідженню можливостей застосування у двигунобудуванні практично всіх видів зносостійких покриттів [4-11]. Так, нанесення боридних покриттів на вуглецеву сталь підвищує зносостійкість у 8 разів [9], покриття титаном і кобальтом нержавіючих сталей знижує знос у 8...10 разів [17], плазмове покриття Ni-Cr-B-Si підвищує довговічність штампової сталі в умовах абразивного зносу в 50...80 разів [1]. Є зведення [2] про підвищення опору адгезійному зносу сталей із боридними покриттями в 100...1000 разів. До позитивних ефектів при використанні покриттів ставиться також локалізація температурного поля в зоні фрикційного контакту при терті [3].

### **Висновки по розділу 1**

Для забезпечення роботи поршневих кілець у форсованих термонапружених двигунах рішення проблеми полягає у виборі матеріалу покриття робочої поверхні кільця з високим рівнем зносостійкості і термостійкості, врівноваженим малим зносом контртіла тертя – гільзи циліндру, а також у виборі способу зміцнення торцевих поверхонь кільця.



## РОЗДІЛ 2

### ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досліджень використовувалися порошки молібдену, нікелю, хрому, заліза марок і суміші на їх основі. Характеристики матеріалів для нанесення плазмового покриття, представлено в табл. 2.1.

Оскільки склад стандартних порошків для напилення складається з фракцій від 0,009 до 0,5 мм, тому перед застосуванням проводили поділ по фракціях на спеціальній установці (рис. 2.1).

Таблиця 2.1 – Властивості матеріалів плазмових покриттів

Матеріал	Залізо	Нвкель	Хром	Молібден	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Марки матеріалів	ПЖ	ПН	ПХ	ПМ	Г-00
Густина матеріалу порошку, г/см <sup>3</sup>	7,86	8,96 / 7,8*	7,16	10,2 / 8,9*	3,97 / 3,2*
Температура плавлення порошку, °С	1538	1455	1903	2617	2050
Параметр важкості розплавлення, 10 <sup>10</sup> ×кДж <sup>2</sup> ×кг <sup>-1</sup> ×м <sup>-3</sup>	2,08	1,55	2,13	1,554	6,88
Коефіцієнт акумуляції тепла, Вт·м <sup>-2</sup> ·К <sup>-1</sup> ·с <sup>0,5</sup>	108	190	138	190	56
Коефіцієнт термічного розширення, 10 <sup>6</sup> К <sup>-1</sup>	11,0	13,0 / 8,9*	6,2	5,1	6,0
Відносне подовження (пластичність), %	7,0	42,0	1,5	2,0	—
Загальна поруватість покриття з порошків, %	10,5*	12,5*	10,0*	11,0*	8...15*
Міцність зчеплення покриття на сталі, МПа	79,6*	5,7...67*	6,7...28*	21...31*	15...28*
Мікротвердість, ГПа	2,4...2,6*	1,3...1,9*	4,8...7,5*	4,17...4,6*	8,2...15*

\* – значення для матеріалу покриття із вказаного порошку.

Підготовка поверхні проводилася дробоструминевою обробкою сталевую крихтою розміром 0,3...1,0 мм (рис. 2.2).



Рис. 2.1. Установа для поділу порошоків на фракції

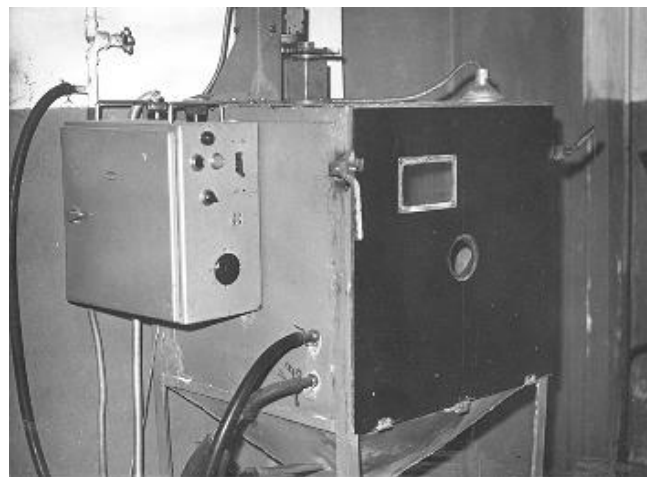


Рис. 2.2. Дробоструменева установка для обробки оправок з поршневыми кільцями перед напилюванням

Для визначення міцності зчеплення покриттів з поверхнею використовувалась методика прямого відриву (рис. 2.3 – 2.5).



Рис. 2.3. Штифтовий чавунний зразок для визначення міцності зчеплення покриття

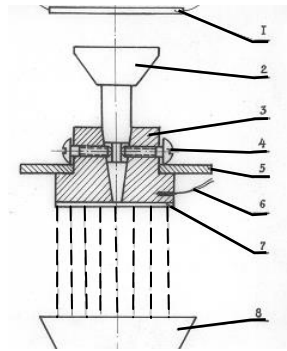


Рис. 2.4. Схема фіксації штифта і нанесення покриття на зразок для визначення міцності зчеплення: 1 – нагрівач; 2 – штифт; 3 – зразок; 4 – фіксуєчий гвинт; 5 – державка; 6 – терпара; 7 – покриття; 8 – плазмотрон

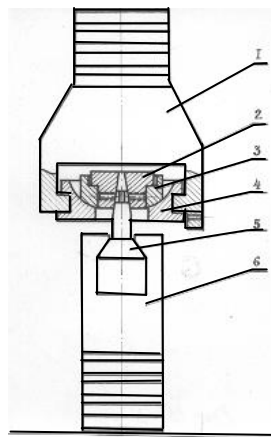


Рис. 2.5. Пристосування для визначення міцності зчеплення покриття на розривній машині: 1, 6 – губки; 2 – зразок з покриттям; 3 – вкладиш; 4 – шаровий підшипник ковзання; 5 – штифт

Застосовувалася також методика зазначена на рис. 2.6.

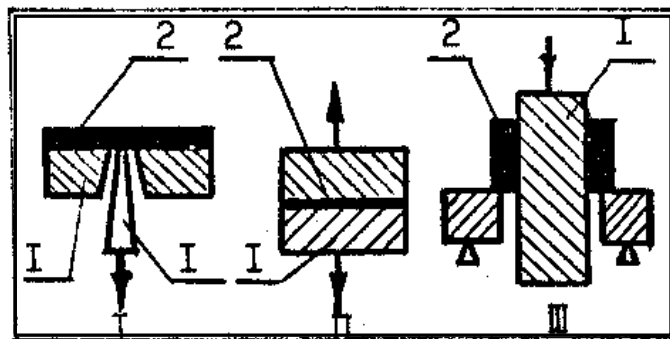


Рис. 2.6. Застосовані схеми вимірів міцності зчеплення покриття з основою: I – на відрив методом штифтів; II – на відрив склеєних зразків; III – на зсув; 1 – підкладка; 2 – покриття.

Опромінювання досліджуваних поршневих кілець проводили на імпульсному лазері “Квант-16” при енергії імпульсу 16...23 Дж, на безперервному CO<sub>2</sub> – лазері “Спектрофізикс” моделі 973 і на CO<sub>2</sub> – лазері ЛТ100 при потужності опромінення 1...4,8 кВт. Співвідношення газів He:N<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> = 1:10:100. При опромінюванні використовували допоміжні пристосування радіатор для відсікання проміню і оптичний блок із дзеркалом для повороту проміню і лінзою для фокусування променя на поршковому кільці. Діаметр плями опромінення варіювався до 3 мм. Кільця закріплювались у спеціальному механізмі з можливістю обертання з різною швидкістю руху поверхні кільця під плямою опромінювання.

В дослідженнях застосовувались режими опромінення як з оплавленням поверхні, так і без оплавлення, при кожному режимі контролювався температурний вплив процесу на геометричні розміри, форму і пружність поршневого кільця.

Мікротвердість визначалася на приладі ПМТ-3, металографія на мікроскопі МІМ-7А, шліфи протравлювали у 5% розчині HNO<sub>3</sub> з добавкою пікринової кислоти, рентгенограми знімали на приладі ДРОН-3 у Cr<sub>Kα</sub> – опромінюванні. Мікрорентгеноспектральний аналіз на вміст кремнію проводили на приладі GXR-5 фірми “Джеол”. Для вивчення тонкої структури зон опромінення застосовувались також методи електронної мікроскопії із скануванням і локального хімічного аналізу.

Інтенсивність зношування покриттів визначали на машині тертя СМЦ-2. Зовнішній вигляд машини тертя, вузла тертя, тіла і контртіла тертя, а також приклад реєстрації моменту тертя, захоплення і припалювання приведені на рис. 2.7.

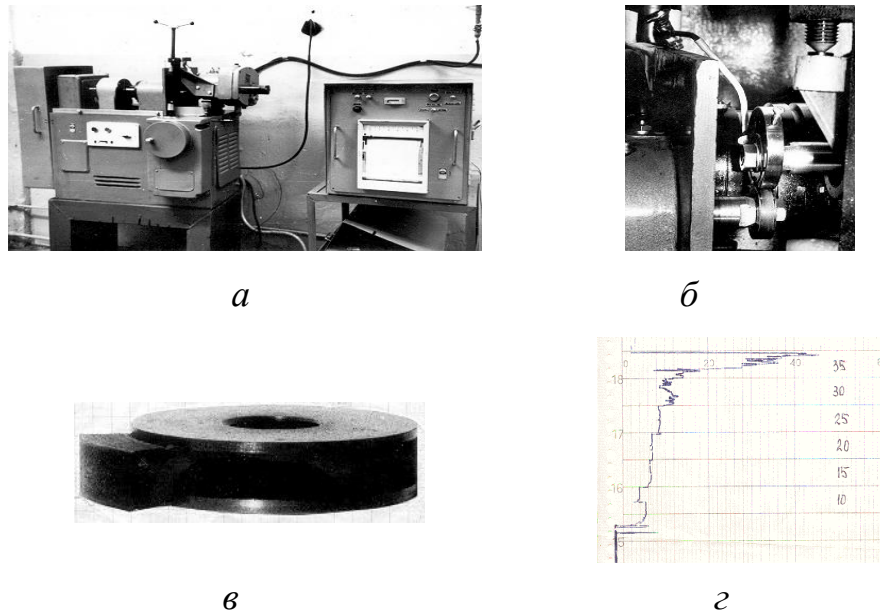


Рис. 2.7. Обладнання для проведення досліджень механічного зношування, захоплення і задиру покриттів та зміцненої поверхні матеріалів поршневих кілець: *а* – машина тертя СМЦ-2; *б* – вузол тертя; *в* – ролик з плазмовим покриттям і колодка – контртіло; *г* – приклад діаграми реєстрації моменту тертя і захоплення

Моделювання захоплення і припалювання покриття проводилося на машині тертя СМЦ-2 із безперервною реєстрацією температури тертьової поверхні і коефіцієнту тертя. Після прироблення і встановлення стабільного мінімального моменту тертя припиняли подачу мастила і збільшували початкове навантаження на 0,5 МПа через кожні 20 хвил. (час обумовлений встановленням постійної температури в зоні тертя). Появу припалення реєстрували по різкому зростанню температури і коефіцієнту тертя. Тоді останнє значення навантаження при даній швидкості вважали критичним.

Для проведення досліджень із верхнього компресійного поршневого кільця вирізували зразки довжиною 8 мм. Вихідною рахувалася поверхня хромового покриття готового поршневого кільця, що на остаточній стадії механічного опрацювання кілець піддавалася хонінгуванню. Повторною рахувалася ця ж поверхня після роботи в двигуні. Електронномікроскопічні

дослідження проводилися на електронному мікроскопі ЕММА-2 при напрузі прискорення 75 кВ по стандартній методиці при збільшенні 7000.

Визначення кристалічної структури і фазового складу поверхневих прошарків товщиною 100 – 1000 ангстрем проводилося на електронографі ЕР-100 у режимі роботи на відбиток при напрузі прискорення 100 кВ. Щоб виявити фази більш глибоких прошарків, після дифракційних зйомок поверхні тертя на неї алмазною пірамідою наносили риски глибиною 2...8 мкм. Пошарове хімічне протравлювання прошарків навмисно виключали через можливу вибірність травлення стосовно різних фаз.

## **Висновки по розділу 2**

В другому розділі магістерської роботи представлено розроблену методику дослідження триботехнічних характеристики зміцнених деталей циліндропоршневої групи автотракторних двигунів.

## РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження мікротвердості по глибині азотованої зони на молібденовому покритті робочої поверхні кільця і на чавуні торцевої поверхні приведено на рис. 3.1. Виміри мікротвердості цієї зони показали значення 11,9 ГПа для молібдену і 6,3 ГПа для чавуну. За шаром нітридів слідує зона внутрішнього азотування з твердим розчином азоту у молібдені і залізі відповідно, мікротвердість якої монотонно знижується із глибиною. Після глибини 150...200 мкм мікротвердість зрівнюється з такою для основного матеріалу.

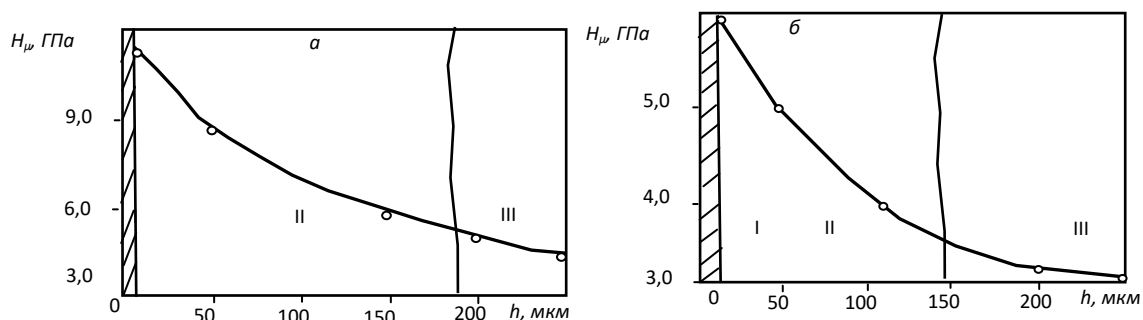


Рис. 3.1. Розподіл мікротвердості по глибині зміцненої зони за 3 години азотування: *а* – молібденове плазмове покриття; *б* – чавун; I – надтонкий шар нітридів; II – дифузійний шар; III – незміцнений шар основного матеріалу

Контроль основних параметрів поршневих кілець показав, що іонне азотування при вказаних вище параметрах робить незначний вплив на службові характеристики поршневого кільця, залишаючи пружність, провіт, викривлення і розміри поршневих кілець у межах норми, що дає можливість застосування цієї операції як фінішної.

Таке ж вагоме підвищення зносостійкості в умовах молекулярно-механічного зношування дає іонне азотування молібденового покриття, причому дифузія азоту у цьому випадку прискорюється за рахунок нерівноважності структури плазмово-напиленого покриття і його відносно великої поруватості.

Як показують наші дослідження (табл. 3.1), іонне азотування молібденового покриття збільшує його зносостійкість в порівнянні з хромовим гальванічним покриттям

Таблиця 3.1 – Механічне зношування чавуну і запропонованого покриття

№	Матеріал і вид зміцнення ролика	H <sub>ц</sub> ролика, ГПа	Матеріал колодки	Швидкість ковзання					
				1,3 м/с		2,13 м/с		4,16 м/с	
				Рол	Кол	Рол	Кол	Рол	Кол
1	Незміцнений СЧ	3,0	СЧ	6,9 / 0,83	4,6 / 0,55	5,9 / 0,7	3,5 / 0,41	5,2 / 0,6	2,9 / 0,36
2	Незміцнений СЧ	3,0	АЛ-2	2,1 / 0,23	1,5 / 0,16	3,1 / 0,33	1,6 / 0,18	14 / 1,54	16 / 1,76
3	СЧ + іонне азотування	5,5	СЧ	6,1 / 0,73	0,6 / 0,07	3,7 / 0,44	1,1 / 0,13	2,7 / 0,32	1,9 / 0,23
4	СЧ + іонне азотування	5,5	АЛ-2	1,0 / 0,12	0,5 / 0,05	1,1 / 0,12	0,8 / 0,09	11 / 1,21	12 / 1,31
5	СЧ + хром гальванічний	9,5	СЧ	5,3 / 0,64	4,3 / 0,52	3,7 / 0,44	2,1 / 0,25	7,6 / 0,91	6,0 / 0,72
6	СЧ + молібден	4,5	СЧ	6,9 / 0,83	2,9 / 0,35	5,4 / 0,65	2,7 / 0,32	9,4 / 1,13	5,9 / 0,71
7	СЧ + молібден плазмовий + іонне азотування	7,5	СЧ	1,2 / 0,14	1,6 / 0,19	1,3 / 0,15	1,3 / 0,15	3,2 / 0,38	3,8 / 0,45

Таблиця 3.2 – Результати випробувань

№	Покриття верхнього поршневого кільця	Радіальний знос кільця, мм	Радіальний знос гільзи циліндру, мм
1	Серійні кільця, покриття – хром гальванічний	0,12	0,08
2	Дослідні кільця, покриття – молібден плазмовий	0,16	0,13
3	Дослідні кільця	0,11	0,08



Збільшення твердості покриття при іонному азотуванні не дає можливості проявлення ефекту шаржування, що зменшує зношування молібденового покриття після азотування на 25...30%.

Результати дослідження абразивного зношування торців поршневих кілець після іонного азотування, отримані у стендових випробуваннях того ж двигуна, представлені на рис. 3.2.

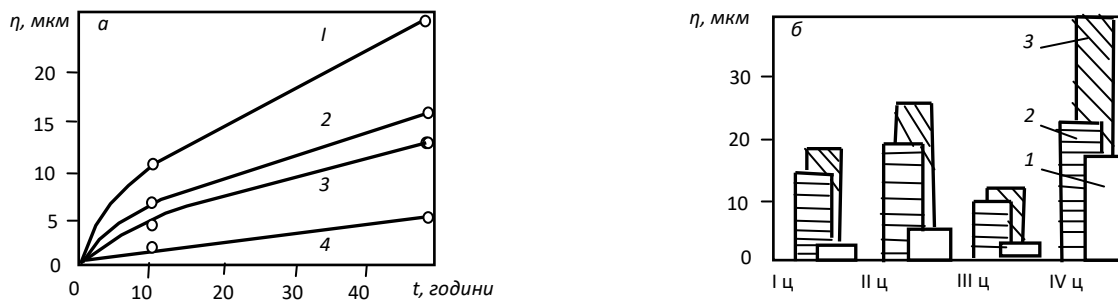


Рис. 3.2. Зношування серійних і дослідних поршневих кілець і канавок: *а* – залежність зносу від *t* – 1 і 2 –зношування серійних і зміцнених поршневих кілець, 3 і 4 –зношування канавок поршня; *б* – діаграма зношування: 1 – канавка; 2 – кільце; 3 – сумарний знос трибоспряження, I і III цил. – азотовані кільця, II і IV цил. – серійні кільця

Сірий чавун поршневих кілець має низьку зносотривкість і схильний до корозії, завдяки грубозернистій структурі і поруватості, тому для одержання дрібнозернистої структури поверхні і підвищення твердості компресійних кілець нами зроблено спробу застосувати лазерне опромінювання за низьких температур без зміни форми і пружності кілець. Поверхнева поруватість плазмових покриттів дозволяє зберегти мастило при високій температурі, тому на кільцях термонапружених двигунів почали застосовувати замість гальванічного хрому газотермічні покриття, з яких найкращі трибологічні властивості має молібденове. Проте його велика пористість (10...12%) призводить до шаржування покриття твердими частинками повітряного пилу і

збільшення зносу, що примушує дослідників розробляти різні способи часткового запаювання таких покриттів, у тому числі лазерним опромінюванням [8].

Інтенсивність зношування  $I_h$ , досліджували на машині тертя СМЦ-2.

Досліджували наступні варіанти комплектів поршневих кілець:

I – серійний комплект (верхнє кільце з Cr гальванічним покриттям, нижнє із сірого чавуну без покриття);

II – дослідний комплект (верхнє кільце з Cr гальванічним покриттям, нижнє із сірого чавуну, опроміненого лазером);

III – дослідний комплект (верхнє кільце з Mo плазмовим покриттям, нижнє із сірого чавуну);

IV – дослідний комплект (верхнє кільце з опроміненим лазером Mo плазмовим покриттям, нижнє із сірого чавуну).

Визначали наступні характеристики:  $W_r$  – знос кільця по радіальній товщині;  $W_c$  – знос циліндра у відповідному робочому поясі;  $W_h$  – знос кільця по висоті.

Аналіз результатів досліджень зношування зразків (рис. 3.3) показує, що лазерне опромінювання чавуну, створюючи структуру гартування і збільшуючи твердість з 3 до 7 ГПа, призводить до значного підвищення зносостійкості у 1,7 – 4,8 рази, причому цей ефект більше виявляється на низьких швидкостях ковзання. Характерно, що такий же ефект зменшення зносу показує контртіло із сірого чавуну, що свідчить про перспективність застосування лазерної обробки для загального підвищення довговічності двигунів. Лазерне опромінювання молибденового покриття, збільшуючи його твердість з 4,5 до 7 ГПа, також підвищує його зносостійкість у 1,9 – 4,5 рази, причому цей ефект краще виявляється при зростанні швидкості ковзання як на самих покриттях, так і на контртілі із сірого чавуну. Характерно, що зносостійкість опроміненого молибденового покриття стає навіть вищою, ніж у гальванічного хрому,

незважаючи на те, що твердість останнього дорівнює 9,5 ГПа. Це також краще виявляється при збільшенні швидкості ковзання.

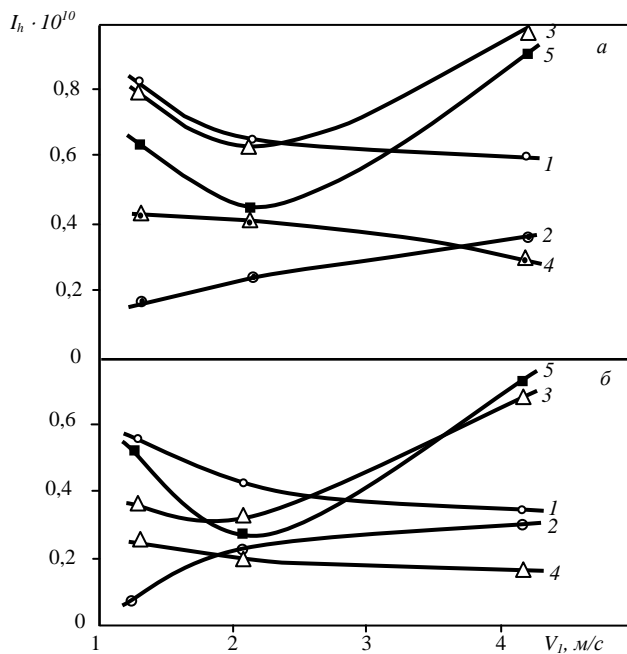


Рис. 3.3. Залежність інтенсивності зношування зразків (а) і контртіла (б) від швидкості ковзання: 1 – сірий чавун; 2 – оброблений лазером сірий чавун; 3 – Мо плазмовий; 4 – Мо плазмовий, опромінений лазером; 5 – Cr гальванічний

Остаточний висновок про перспективність лазерної технології для підвищення трибологічного рівня ЦПГ було зроблено за результатами серії стендових випробувань двигунів (рис. 3.4). Застосування лазерного зміцнення зменшує зношування верхнього компресійного кільця по висоті і циліндра у верхньому робочому поясі на 26...51% (варіант II).

Результати цих досліджень дозволяють рекомендувати до застосовувати такі кільця без зниження моторесурсу у важконавантажених термонапружених дизельних двигунах, де гальванічні хромові покриття у частині випадків тужавіють і руйнуються, не забезпечуючи вимог по надійності.

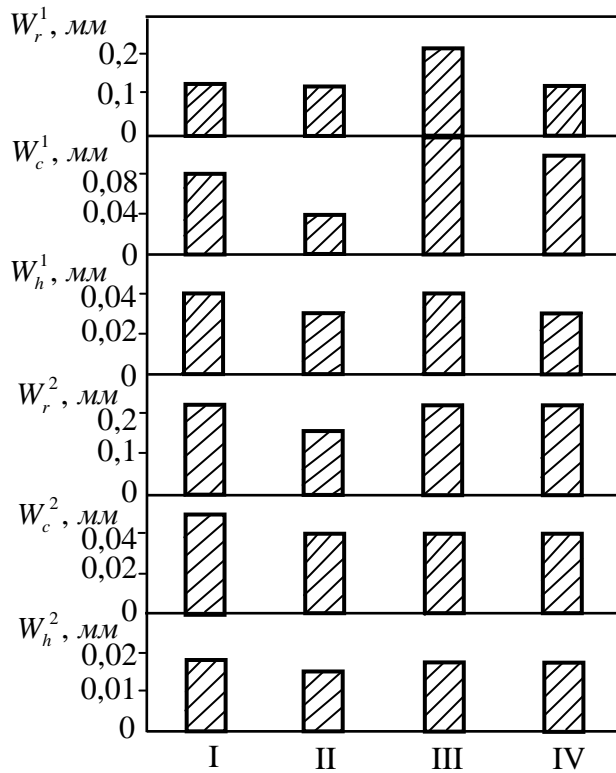


Рис. 3.4. Зношування вузла тертя кільце-циліндр з різними типами верхніх ( $W^1$ ) і нижніх ( $W^2$ ) компресійних кілець

### Висновки по розділу 3

Проведеними дослідженнями встановлено, що розроблена технологія дозволяє суттєво підвищити зносостійкість циліндропоршневої групи автотракторних двигунів і може бути рекомендована для застосування в ремонтні майстерні сільськогосподарських підприємств.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень оптимізовано склад металевих плазмових покриттів по твердості і когезійній міцності. Розроблене покриття має склад 24...36% Fe + 24% Ni + 41...51% Cr, яке забезпечує поряд із твердістю достатню адгезійно-когезійну міцність комбінованого покриття і дозволяє досягнути інтенсивність зношування меншу за гальванічне покриття хрому як при молекулярно-механічному, так і при абразивному зношуванні при неперевершенні рівня зносу гільзи циліндру.

Експериментальними дослідженнями на машині тертя підтверджена правильність структурно-енергетичного підходу до оптимізації складу дисперсно-армованого покриття по термічних внутрішніх напругах, а дослідження у ДВЗ довели працездатність таких плазмових покриттів складу молібден - оксид алюмінію.

Проведеними дослідженнями встановлено, що розроблена технологія дозволяє суттєво підвищити зносостійкість циліндропоршневої групи автотракторних двигунів і може бути рекомендована для застосування в ремонтні майстерні сільськогосподарських підприємств.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Перч В. Д. Мгновенная сила трения поршневого уплотнительного кольца. *Двигателестроение*. 1984. № 3. С. 7–9.
2. Митин С. А. Долговечность двигателей. Ленинград: Машиностроение, 1976. 288 с.
3. Григорьев М. А. Износ и долговечность автомобильных двигателей. Москва: Машиностроение, 1976. 248 с.
4. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев : Техника, 1970. 395 с.
5. Economon P. An investigation into the lubrication of piston rings. *Daros information*. 1990. № 1. P. 3–10.
6. Гаркунов Д. Н. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. Москва : Машиностроение, 1977. 215 с.
7. Jorgen P. Gestaltfestigkeitsuntersuchungen an Kolben ringen im Ottomotor MTZ. *Экспресс-инф. ВИНТИ, ПГД*. 1982. № 42. P. 165–167.
8. Plant R. Developments recents en matiere de segmentation resultats d'experience et comportement en senice. *Ingenieurs de l'automobile*. 1980. Vol. 53, № 6. P. 73–76. Пер. ВЦП № Г–16976.
9. Об износе автомобильных двигателей. *Автомобильная промышленность*. 1997. № 3. С. 4–7.
10. Савельев Г. С. Спектральный метод определения пусковых износов карбюраторных двигателей. *Автомобильная промышленность*. – 1998. – № 9. – С. 5–6.
11. Голубец В. М. Влияние диффузионного борирования на износостойкость среднеуглеродистой стали. *Физико-химическая механика материалов*. 2017. Т. 38, № 4. С. 88–91.
12. Eyre T. S. Effect of boronizing on adhesivewear of titanium alloys. *Tribol. Ant.* 1977. Vol. 10, № 5. P. 281–285.

13. Gregory J. C. The best of both worlds. *Chartered Mech. Eng.* 1977. Vol. 24, № 7. P. 41–47.
14. Wear-resistant coating formation by spark treatment. *Functional Materials.* – 2001. – 8, №. 1. – P. 140–144.
15. Clark J. Topographical features observed in a scanning electron microscopy study of aluminium alloy surfaces in sliding wear. *Wear.* Vol. 69, № 1. P. 1–23.
16. Sahanmir S. Wear mechanisms of boundary lubricated surfaces. *Wear.* 1981. Vol. 73, № 1. P. 169–183.
17. Синергетика и фракталы в материаловедении. Москва : Наука, 1994. 383 с.
18. Suh N. P. Implications of the delamination theory on wear minimization. *Wear.* 1977. Vol. 44, № 1. P. 127–134.