

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Шуляр Ігор Вікторович

УДК 631.791

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН З
ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОДУГОВОГО
ОКСИДУВАННЯ**

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

_____ І.В. Шуляр

Керівник роботи
Сукманюк О.М.
к.і.н., доцент

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Шуляр Ігор Вікторович. Обґрунтування технології підвищення довговічності деталей машин з використанням мікродугового оксидування.

– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

У роботі запропоновані комбіновані технології, що включають відновлення робочих поверхонь, мікродугове оксидування, як зміцнюючу обробку і технологічні прийоми фінішної обробки покриттів, що дозволяють підвищити довговічність рухомих з'єднань і деталей машин, що мають істотне значення для різних галузей машинобудування.

Показано, що наповнення оливою покриття пористістю 14...15% збільшує зносостійкість рухомого з'єднання "сталь – покриття, сформоване мікродуговим оксидуванням" в 1,7 рази, а нанесення на його поверхню пористістю 3...4% мідного шару – в 4,5 рази.

Стендові випробування шестеренних насосів НШ-32У-2 і НШ-50-2 дозволили встановити, що зносостійкість рухомих з'єднань, у яких внутрішні циліндричні робочі поверхні деталей з оксидними покриттями пористістю 14...15% наповнені оливою, вище 1,4...1,5 рази, ніж у аналогічних сполук із покриттями не наповненими оливою.

Експлуатаційні випробування показали, що після напрацювання шестеренних насосів НШ-32У-2 3500 мото-год., а НШ-50-2 5500 мото-год. зносостійкість відновлених обтисканням або аргонодуговим наплавленням рухомих з'єднань, посадочні отвори під шестірні яких мали покриття, сформовані мікродуговим оксидуванням, пористістю 14...15%, наповнені маслом, була відповідно в 1,3...1,4 рази менше, ніж у аналогічних з'єднань з покриттями не наповненими оливою.

Ключові слова: мікродугове оксидування, покриття, олива, пористість зносостійкість.

ANNOTATION

Shulyar Igor Viktorovich. Substantiation of technology for increasing the durability of machine parts using microarc oxidation. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The paper proposes combined technologies, including restoration of working surfaces, microarc oxidation, as a strengthening treatment and technological methods of finishing coatings, which increase the durability of movable joints and machine parts that are essential for various branches of mechanical engineering.

It is shown that filling with oil a coating with a porosity of 14 ... 15% increases the wear resistance of the movable joint "steel - coating formed by microarc oxidation" in 1.7 times, and applying to its surface with a porosity of 3 ... 4% copper layer - in 4 , 5 times.

Bench tests of gear pumps HIII-32Y-2 and HIII-50-2 revealed that the wear resistance of movable joints in which the internal cylindrical working surfaces of parts with oxide coatings with a porosity of 14...15% are filled with oil, above 1.4... 1.5 times more than similar compounds with coatings not filled with oil.

Operational tests showed that after the operation of the gear pumps NSh-32U-2 3500 moto-hours, and NSh-50-2 5500 moto-hours. wear resistance of restored by compression or argon arc surfacing of movable joints, landing holes for gears which had coatings formed by microarc oxidation, porosity 14 ... 15%, filled with oil, was respectively 1.3...1.4 times less than in similar connections with coatings not filled with oil.

Key words: microarc oxidation, coating, oil, porosity, wear resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	31
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В даний час алюміній та його сплави за обсягом виробництва та споживання займають друге місце у світі після сталі. Бурхливий розвиток споживання алюмінію обумовлено його властивостями, серед яких насамперед слід назвати високу міцність у поєднанні з малою щільністю, задовільну корозійну стійкість та здатність до формозміни шляхом лиття, тиску та різання. Велике значення має можливість з'єднання деталей з алюмінієвих сплавів у різні конструкції за допомогою зварювання, паяння, склеювання та інших способів, а також здатність до нанесення захисних та декоративних покриттів. Крім того, алюмінієві сплави немагнітні, відрізняються відсутністю іскроутворення, гладкістю поверхні та високими відбивною здатністю, морозостійкістю, гарною тепло- та електропровідністю [1, 2, 3].

У сільськогосподарському машинобудуванні протягом останніх 10 років застосування алюмінієвих сплавів збільшилося більш ніж 3 рази [4]. Це викликано вимогами значного підвищення технічного рівня машин шляхом реалізації переваг металу перед такими традиційними матеріалами, як сталь і чавун. Застосування алюмінієвих сплавів для виготовлення ненавантажених і малонавантажених елементів дозволяє знизити їхню масу в 3 рази, а для несучих конструкцій – в 1,5...2 рази [1, 4, 6, 8]. Зменшення власної маси сільськогосподарської техніки призводить до збільшення вантажопідйомності, зниження витрати палива, зносу шин, тиску на ґрунт та інших експлуатаційних витрат. Однак посилення умов експлуатації техніки та агресивності застосовуваних технологічних середовищ призводить до того, що зносостійкість та корозійна стійкість робочих поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів не дозволяє забезпечити необхідну довговічність.

Існуючі способи відновлення та зміцнення таких деталей, як на стадії виготовлення, так і при ремонті не позбавлені недоліків, що істотно обмежують сферу застосування того чи іншого способу. Одним з перспективних способів

зміцнення робочих поверхонь деталей, відновлених або виготовлених з алюмінієвих сплавів, значною мірою позбавленим багатьох недоліків і отримувати останнім часом все більш широке поширення, є мікродугове оксидування (МДО). Великий внесок у його розвиток і вдосконалення зробили Басинюк В.Л., Батищев О.М., Гордієнко П.С., Кузнєцов Ю.А., Людин Б.Л., Малишев В.М. , Новіков О.М., Сніжко Л.А., Сумінов І.В., Федоров В.А., Черненко В.І., Епельфельд О.В. та низку інших вчених.

До основних переваг МДО відносять: отримання багатофункціональних покриттів з високими фізико-механічними властивостями заданого складу, структури та товщини, доступність хімічних реактивів, екологічність процесу та відсутність спеціальних очисних споруд при використанні силікатно-лужних електролітів. Сформовані покриття володіють високими міцністю зчеплення з матеріалом основи, твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю, теплостійкістю та регульованою пористістю. Причому застосування МДО у комбінації зі способами відновлення робочих поверхонь дозволить як компенсувати будь-який знос, а й зміцнити внутрішні циліндричні і плоскі робочі поверхні деталей, виготовлених із алюмінієвих сплавів, чавунів і сталей. Разом з тим, при граничному мастилі або взаємодії без мастильного матеріалу, що виникають у періоди приробітку, початку або закінчення роботи машини, а також при аварійних ситуаціях, у покриттів, сформованих МДО, виявляються підвищені фрикційні властивості [13]. Це призводить до того, що деталь з покриттям викликає значний знос деталі типу «вал», що сполучається з нею, при їх взаємодії, за рахунок чого відбувається зниження зносостійкості рухомого з'єднання в цілому. Механізм формування покриттів способом МДО визначає наявність у них наскрізної пористості, яка залежить від режимів оксидування, концентрації компонентів та температури електроліту. У зв'язку з тим, що зміцнені шари хімічно інертні, саме наскрізна пористість визначатиме захисні властивості покриття під час роботи деталей в агресивних середовищах. Крім цього, в зоні фрикційного контакту взаємодіючих поверхонь відбувається значне

тепловиділення, що у ряді випадків призводить до руйнування покриття через локалізоване нагрівання в зонах наскрізних пір і зміни міцнісних властивостей його металевої основи.

Зменшення наскрізної пористості покриттів можливо здійснити рахунок зміни режимів МДО, складу і температури електроліту [9]. Зниження фрикційних властивостей покриттів можна досягти за рахунок нанесення на їх поверхню шарів технічно чистої міді або наповнення пор зміцненого шару маслом, які при граничному мастилі або взаємодії рухомих з'єднань без мастильного матеріалу будуть виступати як тверде або рідке мастило, відповідно. Нанесення мідного шару можна проводити за рахунок використання явища вибіркового перенесення (ВП). ВП - це утворення в зоні тертя, що відбувається в мастильному середовищі, тонкої мідної плівки з низьким опором зсуву та отримання практично беззносних рухомих з'єднань деталей машин. Питання про зниження зносу деталей машин при терті розглядали у своїх роботах Гаркунов Д.М., Крагельський І.В., Радін Ю.А., Суслов П.Г., Поляков А.А., Ахматов А.С. І., закордонні вчені Боуден Ф., Тайбор Д. та багато інших. Однак, у науковій літературі стосовно робочих поверхонь деталей, зміцнених МДО, практично відсутні теоретичні основи та технологічні рекомендації з цієї тематики. Тому їх розробка дозволить суттєво підвищити зносостійкість рухомих з'єднань та корозійну стійкість робочих поверхонь деталей машин із такими покриттями.

У зв'язку з цим зниження зношування та, як наслідок, підвищення довговічності деталей машин є однією з важливих та актуальних наукових проблем як для підприємств, що виготовляють, так і експлуатують сільськогосподарську техніку. Багаторазове збільшення вартості запасних частин та їхня невисока якість також стимулюють роботи в цьому напрямку.

запропоновані комбіновані технології, що включають відновлення робочих поверхонь, мікродугове окисдування, як зміцнюючу обробку і технологічні

прийоми фінішної обробки покриттів, що дозволяють підвищити довговічність рухомих з'єднань і деталей машин, що мають істотне значення для різних галузей машинобудування

Мета та завдання дослідження Мета роботи - розробити комбіновану технологію зміцнення поверхонь для підвищення їх зносостійкості на основі мікродугового оксидування.

Завдання досліджень:

1. Провести аналіз способів поверхневого зміцнення деталей;
2. Розробити програму та методику досліджень;
3. Провести експериментальні дослідження.

Об'єкт дослідження – процес мікродугового оксидування поверхні в технології зміцнення поверхні.

Предмет дослідження – залежність параметрів мікродугового оксидування поверхні на фізико-механічні та триботехнічні властивості сформованого шару.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження проводилися в реальних умовах з урахуванням загальноприйнятих і приватних методик, розроблених автором. Аналіз літературних джерел здійснювався аналітико-монографічним методом. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою методів математичної статистики з використанням прикладних програм.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грабар І.Г., Федорчук А.М., Примак М.А., Кулак Д.А., **Шуляр І.В.** Стійкість до абразивного зношування покриття на основі порошку STELLITE 6. Матеріали МНПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв». Харків: ДБТУ, 2021. 551-553.

2. Сукманюк О.М., **Шуляр І.В.**, Росковинський Д.О. Технологічні прийоми підвищення довговічності деталей машин, зміцнених мікродуговим оксидуванням. Збірник тез доповідей XXII Міжнародної наукової конференції

"Сучасні проблеми землеробської механіки". 16–18 жовтня 2021 року. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут». Київ. Ніжин. 2021. С. 206-209.

3. Сукманюк О.М., **Шуляр І.В.** Застосування мікродугового оксидування для відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «*Техніка та технології в агропромисловому виробництві*» (присвячена 55-й річниці заснування інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету) 07-08 жовтня 2021 року. Полтава. 2021. С. 164-168.

Практичне значення одержаних результатів. Практичний інтерес для сільськогосподарських підприємств представляє технологія зміцнення поверхонь тертя сільськогосподарських машин.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 46 сторінок комп'ютерного тексту, містить 18 рисунків та 10 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

На сучасному етапі розвитку науки і техніки для створення різних конструкцій машин і механізмів, а також їх ремонту потрібно застосовувати матеріали, що володіють високими фізико-механічними властивостями, які здатні протистояти зношуванню при різних режимах роботи вузлів тертя та агресивних середовищ. Для забезпечення роботи рухомих з'єднань деталей машин використовують різні мастильні матеріали, що дозволяють уникати при терті прямого контакту поверхонь, що взаємодіють. Однак відомо, що при експлуатації техніки 85...90% машин виходять з ладу не через поломки деталей, а внаслідок зношування їх робочих поверхонь. При цьому на частку внутрішніх циліндричних поверхонь припадає більша частина всіх робочих поверхонь, що зношуються. Причому значну кількість виробів часто складають дорогі корпусні деталі складної форми, які виготовляють із чавунів або алюмінієвих сплавів. Крім цього, дані метали з додаванням антифрикційних матеріалів використовуються для виготовлення підшипників ковзання, які знайшли широке застосування в сучасній сільськогосподарській техніці.

У сільськогосподарському машинобудуванні протягом останніх 10 років застосування алюмінієвих сплавів збільшилося більш ніж 3 рази [4]. Це викликано вимогами значного підвищення технічного рівня машин шляхом реалізації переваг металу перед такими традиційними матеріалами, як сталь і чавун. Застосування алюмінієвих сплавів для виготовлення ненавантажених і малонавантажених елементів дозволяє знизити їхню масу в 3 рази, а для несучих конструкцій – в 1,5...2 рази [1, 4, 6]. Зменшення власної маси сільськогосподарської техніки призводить до збільшення вантажопідйомності, зниження витрати палива, зносу шин, тиску на ґрунт та інших експлуатаційних витрат. Робочі поверхні деталей, виготовлених із зазначених матеріалів, внаслідок різних видів механічного та корозійно-механічного зношування, а

також агресивності застосовуваних технологічних середовищ, зазнають значних зносів, що призводять до втрати працездатного стану, найчастіше до вироблення виробами ресурсу, який гарантують заводи виробники техніки.

У зв'язку з вище викладеним щодо наукових досліджень було обрано:

1) підтискні та підшипникові обойми шестеренних насосів НШ-50-2, виготовлені з ливарного алюмінієвого сплаву АК9М2 згідно ДСТУ;

2) корпуси шестеренних насосів НШ-32У-2, виготовлені з ливарного алюмінієвого сплаву АК7ч згідно ДСТУ;

3) втулки шестеренних насосів НШ-32У-2 виготовлені з антифрикційного алюмінієвого сплаву АОЗ-7 згідно ДСТУ;

4) кришки розподільних шестерень двигунів ЗМЗ-53, виготовлені з ливарного алюмінієвого сплаву АК9год згідно ДСТУ;

5) опори граблін жниварок для збирання трав кормозбиральних комбайнів КСК-100 та КПКУ-75, виготовлені із сірого чавуну СЧ18 згідно ДСТУ.

Хімічний склад перелічених металів, згідно з ДСТУ, представлений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад алюмінієвого сплаву, що застосовується для виготовлення піджимних та підшипникових обойм шестеренних насосів НШ-50-2

Марка сплаву	Масова частка, %								
	основні компоненти						домішок не більше		
	алюміній	магній	кремній	марганець	мідь	титан	цинк	свинець+олово	хром
АК9М2	основа	0,2...0,8	7,5...10	0,1...0,4	0,5...2,0	0,05...0,20	1,2	0,15	0,1

Таблиця 1.2 – Хімічний склад алюмінієвих сплавів, що застосовуються для виготовлення деталей шестеренних насосів НШ-32У-2

Марка сплаву	Масова частка, %											
	основних компонентів						домішок, не більше					
	алюмінію	магнію	кремнію	марганцю	міді	олова	марганцю	міді	цинку	титану + цирконію	свинцю + олова	заліза
АК7ч	основа	0,2...0,4	6,0...8,0	–	–	–	0,5	0,2	0,3	0,15	0,06	–
АО3-7	основа	–	0,6...1,2	0,5...0,8	7,0...8,5	2,5...3,5	–	–	0,2	–	–	0,5

Таблиця 1.3 – Хімічний склад алюмінієвого сплаву, застосовуваного виготовлення кришок розподільних шестерень двигунів ЗМЗ-53

Марка сплаву	Масова частка, %									
	основні компоненти					домішок не більше				
	алюмінію	магнію	кремнію	марганцю	цирконію + титану	міді	нікелю	свинцю	олова	берилію
АК9ч	основа	0,17...0,3	8,0...10,5	0,2...0,5	0,15	0,3	0,1	0,05	0,01	0,10

Таблиця 1.4 – Хімічний склад чавуну, що застосовується для виготовлення опор граблин жниварок кормозбиральних комбайнів КСК-100 та КПКУ-75.

Марка чавуну	Масова частка компонентів, %				
	вуглець	кремній	марганець	фосфор	сірка
				не більше	
СЧ18	3,4...3,6	1,9...2,3	0,5...0,7	0,2	0,15

Фотографії зношених деталей, що наочно характеризують їх технічний стан, представлені на рисунках 1.1-1.4.

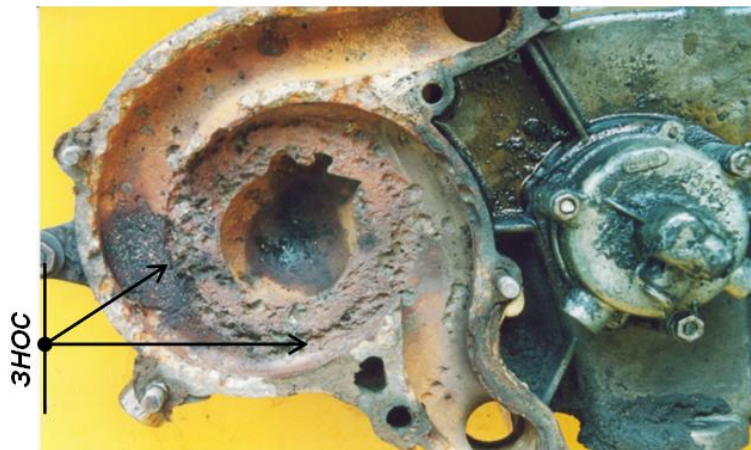


Рис. 1.1. Зношена поверхня під крильчатку водяного насоса кришки розподільних шестерень двигуна ЗМЗ-53 з алюмінієвого сплаву АК9Ч

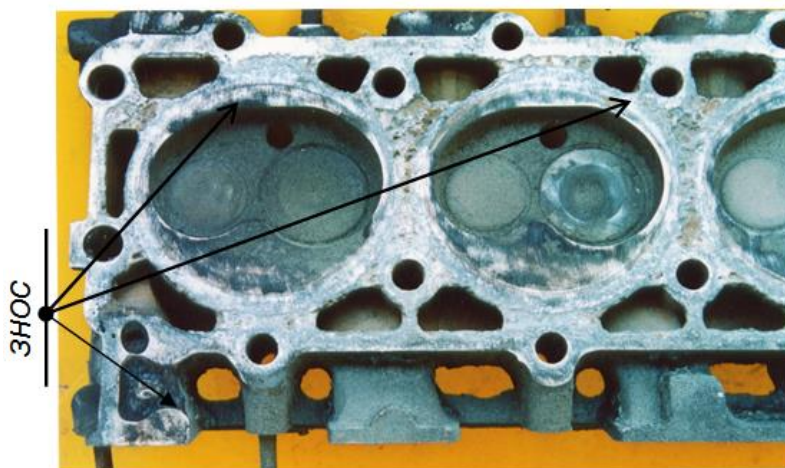


Рис. 1.2 Зношена поверхня площини прилягання головки циліндрів до блоку циліндрів двигуна ЗМЗ-53 з алюмінієвого сплаву АК9Ч

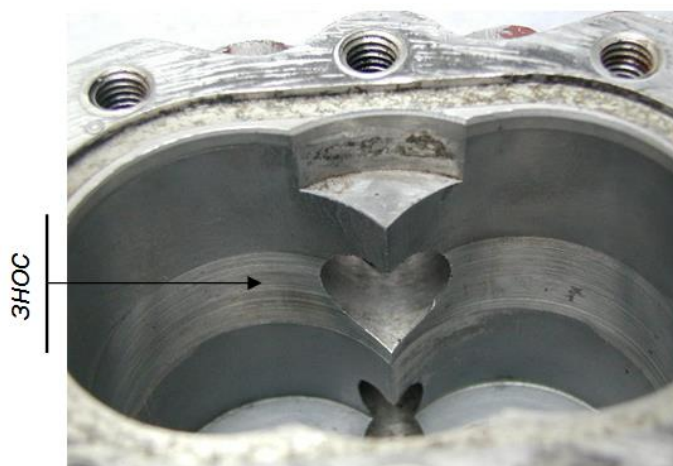


Рис. 1.3. Зношені колодязі корпусу шестеренного насоса НШ-32У-2

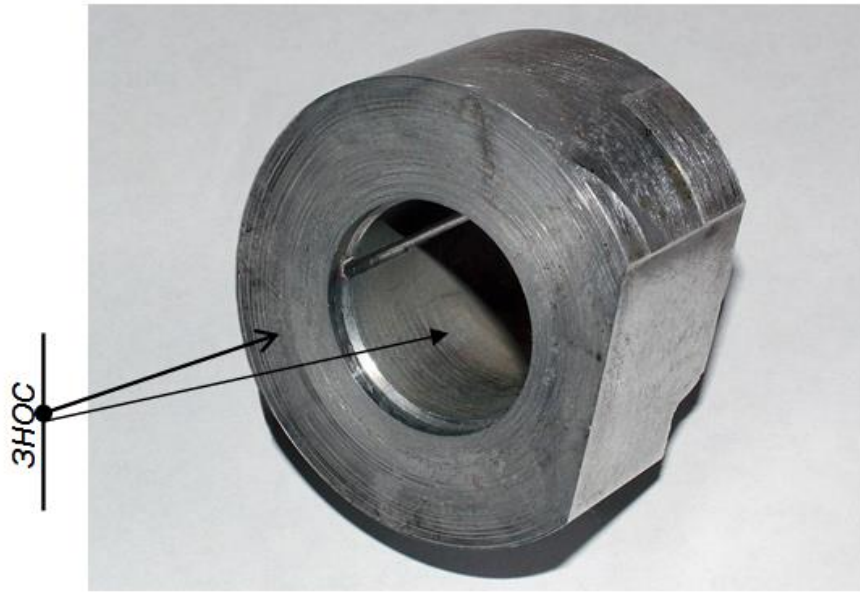


Рис. 1.4. Зношена втулка шестеренного насоса НШ-32У-2

Для отримання достовірної інформації про знос перерахованих деталей була продефектована вибірка виробів у кількості від 50 до 60 штук кожного найменування. Вибір площин вимірювання здійснювався згідно з ДСТУ. Вимірюванням піддавали:

- 1) напівотвори під цапфи шестерень піджимних та підшипникових обойм шестеренних насосів НШ-50-2;
- 2) колодязі корпусів шестеренних насосів НШ-32У-2;
- 3) отвори під цапфи шестерень втулок шестеренних насосів НШ-32У-2;
- 4) поверхні під крильчатку водяного насоса кришок розподільних шестерень двигунів ЗМЗ-53;
- 5) отвори під грабліни опор жниварок для збирання трав кормозбиральних комбайнів КСК-100 та КПКУ-75.

Обробку одержаних статистичних даних проводили з використанням ПК. Результати представлені у табл. 1.5.

Аналіз даних показав, що від 70 до 100% продефектованих робочих поверхонь деталей вимагають свого відновлення. При цьому їх максимальне зношування коливається від 0,3 мм до 3,6 мм (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Статистичні показники, отримані в результаті розрахунку

Найменування зношеної поверхні та деталі	Теоретичний закон розподілу (ТЗР) зносів	Параметри ТЗР					
		середньоквадратичне відхилення (σ)	коефіцієнт варіації (V)	знос мінімальний (I мін), мм	знос середній (I ср), мм	знос максимальний (I макс), мм	відхилення, %
1	2	3	4	5	6	7	8
Напівотвори під цапфи шестерень підтискних обойм шестеренних насосів НШ-50-2	ЗРВ	0,715	0,512	0,220	1,397	3,0	16,62
Напівотвори під цапфи шестерень підшипникових обойм шестеренних насосів НШ-50-2	ЗРВ	0,110	0,461	0,045	0,239	0,50	14,30
Колодязі корпусів шестеренних насосів НШ-32У-2	ЗРВ	0,140	0,515	0,035	0,272	0,50	14,50
Отвори під цапфи шестерень втулок шестеренних насосів НШ-32У-2	ЗНР	0,075	0,418	0,020	0,180	0,30	13,09
Поверхні під крильчатку водяного насоса кришок розподільних шестерень двигунів ЗМЗ-53	ЗНР	0,520	0,230	0,820	2,920	3,59	4,79
Отвори під грабліни жниварок для збирання трав кормозбиральних комбайнів КСК-100 та КПКУ-75	ЗРВ	0,175	0,406	0,950	1,327	1,69	10,20

У практиці ремонтного виробництва для відновлених зношених внутрішніх циліндричних та плоских робочих поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів та чавунів застосовуються такі способи: ремонтні розміри, виготовлення та постановка додаткових ремонтних деталей, пластичне деформування, полімерні матеріали, склади холодного молекулярного зварювання, гальванічні покриття, наплавлення, пай, методи напилення. Великий внесок у розвиток відновлення робочих поверхонь деталей зробили Батіщев А.М., Бурумкулов Ф.Х., Голубев І.Г., Катц Н.В., Курчаткін В.В., Лі Р.І., Лялякін В.П., Патон Б.Є., Пучин Є.А., Серебровський В.І., Чорноіванов В.І., Юдін В.М. та багато інших вчених. Однак, у них разом з позитивними моментами мають місце і суттєві недоліки: неможливість обробки невеликих посадкових отворів, токсичність, низька міцність зчеплення покриттів, схильність до втомного фарбування, невисока зносо- та корозійна стійкість, питання екологічної безпеки. Ці недоліки, що зустрічаються разом або окремо у перерахованих способах

відновлення зношених деталей, вибраних для проведення досліджень, а також безперервно посилені умови експлуатації та агресивність технологічних середовищ, що застосовуються, не завжди забезпечують необхідну довговічність техніці, що використовується підприємствами АПК України.

Розвиток науки привело до створення нових технологічних способів поверхневого зміцнення деталей машин, основне завдання яких полягає в отриманні поверхневих шарів з високими фізико-механічними властивостями, міцно зчепленими з металевою основою і володіють високими зносо- та корозійною стійкістю, що є найважливішими характеристиками експлуатації. Зміцнені поверхневі шари створюють необхідний бар'єр, що захищає робочі поверхні деталей від впливу абразивних частинок, механічних навантажень та агресивності технологічних середовищ, що застосовуються.

У той же час, ефективних технологічних методів зміцнення внутрішніх циліндричних і плоских робочих поверхонь деталей машин не так багато. Серед широко використовуваних способів зміцнення таких поверхонь можна виділити поверхневе пластичне деформування, електролітичне хромування, дифузійну металізацію, індукційно-плазмове нанесення покриттів і т.д. (Рисунок 1.5). Проте зміцнені шари, отримані вище перерахованими способами, який завжди задовольняють вимогам, які пред'являють нині робочих поверхонь деталей машин. Досить часто їх міцність зчеплення з металевою основою виявляється невисокою або саме покриття має недостатню міцність, зносостійкість і корозійну стійкість.

Все зростаючим вимогам, що висуваються в даний час до зміцнювальних покриттів та їх властивостей, найбільше задовольняють керамічні покриття, які мають високі службові властивості, а також стійкі до окислення, термоударів і вібрацій [5, 12]. Поряд з технологіями напилення та іншими способами їх нанесення, все більш активно розробляються електролізні процеси формування зміцнювальних покриттів на основі оксиду алюмінію Al_2O_3 і композиціям на його основі з електролітів при високих значеннях напруги (рис.1.5). Їх

використання передбачає простоту реалізації при мінімумі витрат та дотриманні вимог екологічної безпеки [11]. Одним із сучасних та перспективних способів отримання оксидокерамічних покриттів є МДО, яке є якісно новим щаблем на шляху розвитку та вдосконалення електрохімічної обробки матеріалів і дозволяє значно підвищити міцнісні та захисні властивості робочих поверхонь деталей [7,9].

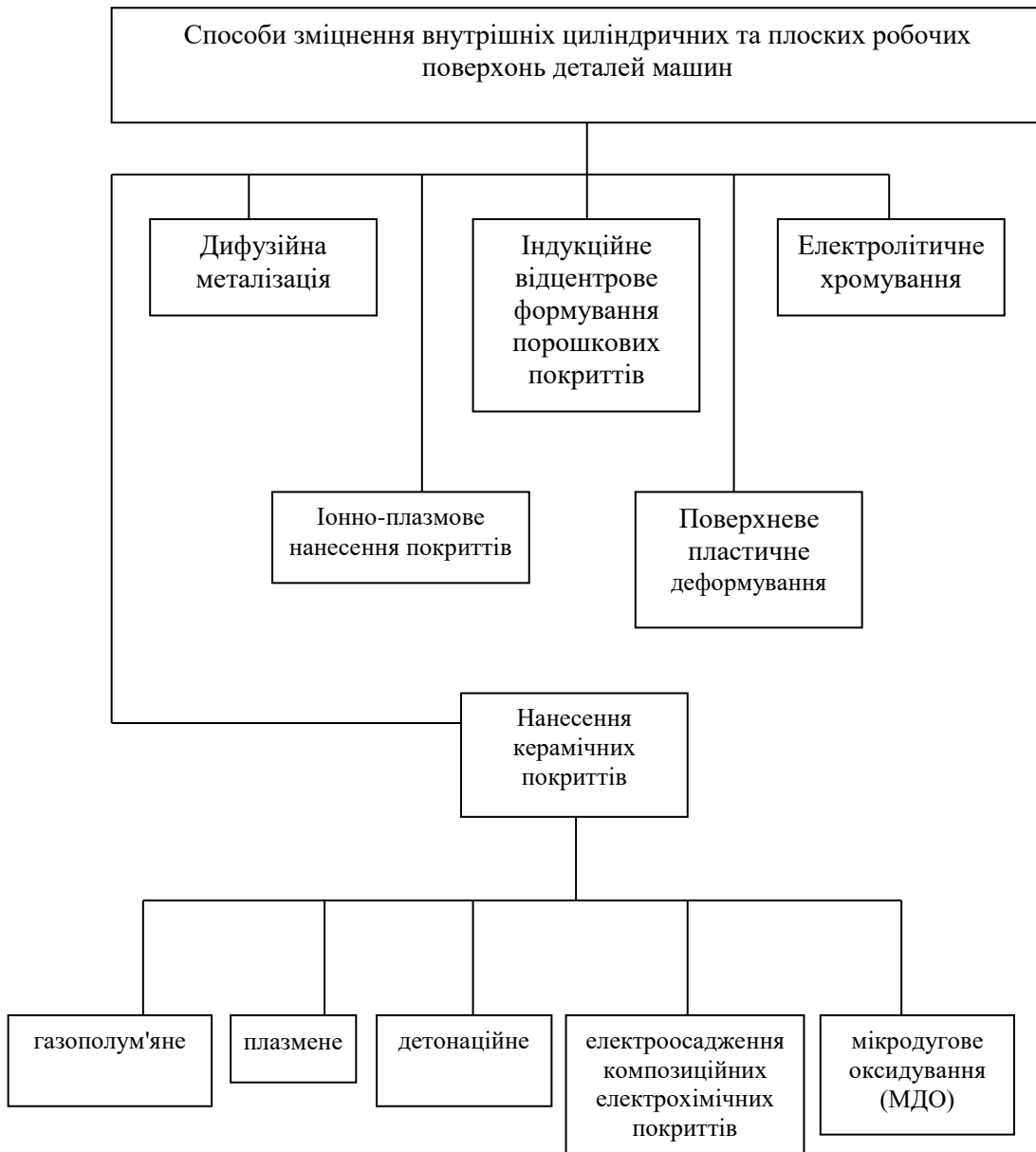


Рисунок 1.5 - Способи зміцнення внутрішніх циліндричних та плоских робочих поверхонь деталей машин

Технологія МДО порівняно добре відпрацьована для групи про вентильних металів та його сплавів – титану, магнію, танталу та інших, але передусім –

алюмінію. Вентильними вважаються метали, на яких оксидні плівки, сформовані електрохімічним шляхом, мають уніполярну або асиметричну провідність у системі «метал – оксид – електроліт». Причому позитивний потенціал на металі, у якому утворена анодна оксидна плівка, відповідає замикає або зворотному напрямку, тобто. система працює аналогічно до напівпровідникового вентиля. Спосіб немає багатьох недоліків, властивих іншим технологіям поверхневого зміцнення. До його основних переваг відносять: отримання багатофункціональних покриттів заданого складу, структури та товщини; регулювання швидкості формування зміцненого шару; доступність хімічних реактивів; екологічність процесу, що виражається у відсутності токсичних компонентів та спеціальних очисних споруд для відпрацьованих електролітів у разі застосування силікатно-лужних електролітів [3, 8, 11]. Підтвердженням того, що покриття, сформовані МДО, мають унікальний комплекс властивостей, служить той факт, що в останнє десятиліття число робіт з їх вивчення та практичного застосування в різних галузях збільшилося на порядок.

Сутність МДО полягає в тому, що під дією високої напруги, що прикладається між що знаходиться в електроліті деталлю і металевим катодом (корпусом електролітичної ванни або електродом) на її поверхні виникають мігруючі точкові мікродугові розряди (МДР), термічний, плазмохімічний і гідродинамічний вплив виробу у міцно зчеплене керамічне покриття (рисунок 1.6).

Відмінна особливість МДО - участь в отриманні покриття поверхневих мікродугових розрядів, що дуже істотно і специфічно впливають на фазо- і структуроутворення. В результаті склад і будова одержуваних оксидокерамічних шарів суттєво відрізняються, а їх властивості значно вищі порівняно з традиційним анодуванням. Інший відмінною особливістю МДО є те, що оксидний шар, що формується з його допомогою, росте в обидві сторони щодо дійсного розміру зміцнюваної деталі. У зв'язку з цим МДО можна використовувати у двох варіантах:

1) зміна стану, структури та властивостей поверхні, тобто.

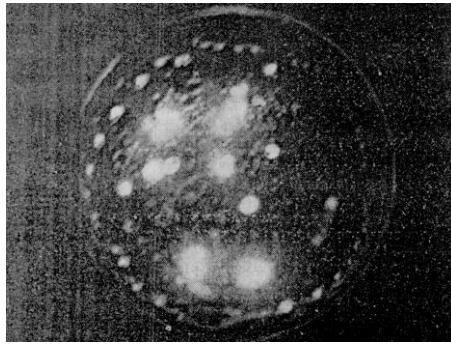


Рис. 1.6. Мікродугові розряди на поверхні деталі з алюмінієвого сплаву зміцнення без збільшення товщини;

2) нанесення покриття, тобто. зміцнення із збільшенням товщини.

У роботах, присвячених застосуванню МДО у ремонтному виробництві, найбільшого поширення набуло другий напрям, застосування якого у чистому вигляді (без комбінування зі способами збільшення поверхні) дозволяє компенсувати знос до 0,1 мм. Використання комбінованих технологій, що включають збільшення поверхні з метою компенсації зносу одним з відомих способів і подальше зміцнення відновленої поверхні МДО, значно розширює його технологічні можливості. У тому числі можна обійти обмеження щодо оксидування тільки вентильних металів. В даний час розроблені технології, в яких застосовується попереднє нанесення на вироби з «невентильних» металів (наприклад, сталей) алюмінієвмісних композицій з подальшим їх зміцненням МДО.

Аналіз технологічних схем формування покриттів показав, що в даний час найбільшого поширення набуло анодно-катодне (АК) МДО. У цьому випадку на поверхні оксидується деталі поперемінно виникають то анодні, то катодні мікродугові розряди. Катодні МДР мають більшу потужність, а температура плазми, що утворюється при їх горінні, приблизно на 1000°C вище, ніж при горінні анодних МДР. В результаті катодні МДР підігрівають покриття, що полегшують запалення і сприяють стійкому горінню анодних МДР. Все це призводить до того, що покриття, сформовані АК МДО, за товщиною і фізико-

механічними властивостями значно перевершують покриття, сформовані анодним або катодним МДО.

Існують різні типи джерел електричного живлення для реалізації МДО, хоча найбільшого поширення набули пристрої, що формують необхідні електричні параметри процесу на струмах промислової частоти. Використання високочастотних імпульсних джерел живлення сприяє зниженню енерговитрат та суттєвому скороченню тривалості МДО. Однак у цьому випадку потрібно набагато складніше та дороге обладнання.

Склад електроліту для МДО підбирають, виходячи з хімічного складу вентильного сплаву, що зміцнюється, і призначення покриття, тобто. з того, які характеристики потрібні в першу чергу - зносостійкість, корозійно-захисна здатність, теплостійкість, електроізоляційні властивості та інші або поєднання будь-яких властивостей.

Для МДО розроблено чимало типів електролітів (таблиця 1.6). Однак найбільш широко застосовується у ремонтному виробництві є силікатно-лужний електроліт типу «КОН- Na_2SiO_3 » завдяки своїй дешевизні, екологічності та здатності утворювати з алюмінієвими сплавами покриття з високою твердістю та хімічною інертністю].

Таблиця 1.6 – Електроліти, що застосовуються для МДО

Електроліт	Компоненти електроліту
1. Силікатно-лужний	КОН или NaOH + Na_2SiO_3
2. Фосфатно-алюмінатний	Na_3PO_4 + NaAlO ₂
3. Борно-лужний	КОН или NaOH + H_3BO_3
4. Силікатно-молібдатно-лужний	КОН или NaOH + Na_2SiO_3 + $(\text{NH}_4)_2\text{MO}_4$
5. Силікатно-фосфатно-лужний	КОН или NaOH + Na_2SiO_3 + Na_3PO_4

Одним із критеріїв підбору співвідношення компонентів електроліту є мінімальний час запалення МДР за певної щільності струму. У зв'язку з тим, що паралельно з утворенням бар'єрної анодної оксидної плівки йде її розчинення та виділення на поверхні оксидованого металу гідратованих продуктів

електрохімічного розчинення алюмінієвого сплаву, які можуть залишати дефекти в оксидокерамічному покритті та перешкоджати запаленню МДР, дана обставина є важливою. МДО. У роботах проводили оптимізацію складу силікатно-лужного електроліту типу "KOH- Na_2SiO_3 " з мінімізації часу запалення МДР та отримання покриттів високої твердості. Вони показано, що цього доцільно використовувати електроліт $\text{KOH}=3$ г/л, $\text{Na}_2\text{SiO}_3=12$ г/л, інше - дистильована вода.

Варіюючи концентрацією компонентів електроліту типу «KOH- Na_2SiO_3 », зокрема, концентрацією Na_2SiO_3 , можна використовувати його не тільки для зміцнення, але і відновлення деталей з алюмінієвих сплавів зі зносом до 0,1 мм на бік. Перед оксидуванням свіже приготовлений електроліт протягом нетривалого часу доцільно опрацювати, тобто формувати в ньому покриття на зразку, площа якого близько до площі оксидованої деталі. Під час опрацювання компоненти електроліту остаточно перемішуються, крім того, збільшується його довговічність. Оскільки електроліти типу «KOH- Na_2SiO_3 » мають рН близько 10, то для утилізації достатньо розбавити їх у 10...15 разів водою для того, щоб вони повністю відповідали вимогам санітарних норм (рН 6,5...8,5). Після цього їх можна скидати в каналізаційний стік без жодної додаткової очистки.

Покриття, сформовані МДО, складаються з трьох шарів – поверхневого, зміцненого та перехідного, причому всі вони мають кристалічну будову. Поверхневий шар – пухкий та піноподібний, що складається з оксиду кремнію, алюмосилікатів та муліту, характеризується низькою зносостійкістю. Зміцнений шар має пористу структуру, в якій тверді кристали з мікротвердістю 18...24 ДПа розташовані в м'якій аморфоподібній зв'язці мікротвердістю близько 8 ГПа. Він характеризується високими щільністю, твердістю, зносостійкістю, складається з і оксидів алюмінію (Al_2O_3) і поділяється на зовнішній і внутрішній (щодо дійсного розміру деталі до оксидування). Перехідний шар знаходиться між матеріалом основи (деталі) та зміцненим шаром покриття, його товщина

становить 3...5 мкм. Він включає в свій склад незначну кількість і оксидів алюмінію та ортоклаз.

В даний час найбільшого поширення набув ванний спосіб формування оксидних покриттів, який не позбавлений недоліків, пов'язаних з підтриманням необхідної температури, раціональним використанням електроліту, а також захистом поверхонь деталі, що не оксидуються. У зв'язку з цим перспективним представляється проточне оксидування. Його суть полягає в тому, що за допомогою нескладних пристроїв зміцнювані поверхні деталі стають стінками електролітичної комірки, через яку лугостійким насосом прокачується електроліт. До переваг проточного МДО відносять: інтенсивне перемішування електроліту і поповнення його новими збагаченими порціями, що призводять до поліпшення якості та фізико-механічних властивостей покриттів, що формуються; збільшення терміну служби електроліту та інтервалів часу між його замінами; зменшення обсягу використовуваного електроліту; стабільність процесу одержання покриттів.

При МДО також доцільно повітряне барботування (зрошення бульбашками повітря) електроліту та поверхні оксидованої деталі для вирівнювання температурного режиму електроліту, його перемішування та подачі свіжого електроліту в зону горіння МДР.

Висновки по розділу

Таким чином, можна зробити висновок, що МДО є одним з найбільш перспективних способів поверхневого зміцнення деталей і в даний час набуває все більш широкого поширення. Оксидокерамічні покриття формують переважно на вентильних металах, найбільшого поширення серед яких у сільськогосподарському машинобудуванні набули алюмінієві сплави.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В основу проведених досліджень покладено порівняльні випробування, що проводяться в близьких до ідентичних умовах швидкісних і навантажувальних режимів взаємодії поверхонь, що труться, в реальних вузлах.

Зносостійкість визначали в умовах граничного мастила відповідно до ДСТУ за групою А на машині тертя СМТ-1М, що відтворює схему тертя при обертанні контртіла у вигляді втулки щодо нерухомого зразка у вигляді кільця. Зразки для досліджень (рис. 2.1) виготовляли з алюмінієвого сплаву Д16. Після цього на внутрішніх поверхнях способом МДО формували покриття, які потім шліфували до видалення пухкого шару і шорсткості $R_a=1,20\dots1,25$ мкм. Далі на поверхню оксидного покриття пористістю 3-4% фрикційно-механічним способом наносили мідний шар. Зміцнений шар пористістю 14-15% наповнювали маслом. Пористість покриттів змінювали варіюючи температурою електроліту. Матеріалом для виготовлення контртіл служила сталь 45, загартована до HRC 40 ... 45, і має шорсткість робочої поверхні $R_a = 0,63$ мкм. Вибір матеріалів для досліджень ґрунтувався на тому, що покриття на сплаві Д16 мають найкращі фізико-механічні властивості, а сталь 45 широко поширена в машинобудуванні для виготовлення деталей типу «вал», робочі поверхні яких мають зазначені параметри термообробки і шорсткості.

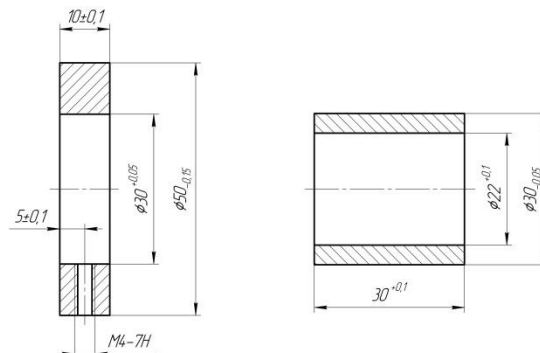


Рис. 2.1. Загальний вид зразка (а) та контртіла (б) для дослідження зносостійкості сполук

Випробовувалися такі сполуки: «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4%», «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14...15%», «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14...15% наповнене оливою», «Сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 3 ... 4% з мід-ним шаром».

Змащування контактуючих поверхонь забезпечували рівномірною подачею до зони тертя олії індустриальної-20 ДСТУ з крапельниці з періодичністю 0,2 мл/хв. Точну подачу олії регулювали за допомогою дозуючого крана. Для прискорення зношування масло додавали абразив, в якості якого використовували кварцовий пісок, відповідний ГОСТ 2138, дисперсністю 5 мкм. Концентрація абразиву становила $3 \pm 0,5\%$ маси масла. Підтримку абразиву у зваженому стані здійснювали постійним перемішуванням з використанням мішалки.

Випробування проводили за кімнатної температури. Перед проведенням досліджень здійснювали припрацювання випробуваного з'єднання при плавному зміні навантаження від 20 до 200 Н з інтервалом 20 Н, завершення якої фіксували стабілізації коефіцієнта тертя в зоні контакту. Випробування проводили у триразовій повторності для кожного з'єднання.

Навантаження здійснювали через важільну систему машини тертя. При цьому навантаження підбирали таким чином, щоб забезпечити контактний тиск з'єднання 4 МПа. Швидкість ковзання у своїй становила 1,0 м/с. Знос визначали щодо зміни маси зразків та контрзразків з використанням аналітичних ваг АДВ-200М. Похибка при зважуванні становила трохи більше 0,002 гр.

Перед вимірюваннями зразок і контртіло ретельно промивали в бензолі протягом 10 хв., після чого сушили в сушильній шафі СНОЛ-3,5 при температурі 60...70°C протягом 40 хв. з наступним охолодженням повітря. Після проведення вимірювань постановку досліджуваних зразка та контртіла на машину тертя проводили за збігом заздалегідь нанесених міток. Зношування визначали через

кожні 10 годин випробувань. Загальна тривалість випробувань кожного з'єднання становила 60 годин.

Швидкість зношування з'єднання визначали за такою формулою:

$$V = \frac{I_K + I_O}{T}, \frac{\text{мг}}{\text{год}}, \quad (2.1)$$

де I_K – знос контртіла, мг;

I_O – знос зразка, мг;

T – тривалість випробувань, год.

Зносостійкість сполук обчислювали за формулою:

$$U = \frac{1}{V}, \frac{\text{год}}{\text{мг}} \quad (2.2)$$

Мета даних досліджень полягала у встановленні впливу, який надає агресивне середовище на металеву основу (алюмінієвий сплав) та оксидне покриття. Експеримент проводився за допомогою лабораторного автоклаву А-10 МІНІ польського виробництва фірми «SMS» (рис. 2.1), конструкція якого дозволяє підтримувати задану температуру та атмосферний тиск середовища.

Випробування проводили згідно з ДСТУ. Для проведення експериментів використовували корозійні розчини з різним вмістом хлористого натрію NaCl кваліфікації ЧДА, які додавали 0,5% концентрованої оцтової кислоти CH_3COOH . Решта становила дистильована вода.

Дослідження проводили на різних режимах (таблиця 2.1), використовуючи зразки зі сплаву АК9ч (рисунок 2.2) без зміцнення та зміцненням МДО на раціональних режимах з різною пористістю. Вибір ґрунтувався на тому, що цей матеріал широко застосовують для виготовлення деталей системи охолодження та головок блоків двигунів циліндрів автомобілів.

Перед проведенням експерименту різьбові отвори у зразках зачищали та ізолювали епоксидним клеєм ЕДП ТУ 84-606. Зразки знежирювали ацетоном ДСТУ. Випробувані зразки ізолювали стрічкою ФУМ за допомогою синтетичних ниток ДСТУ. Після цього їх розміщували у пристосуванні таким чином, щоб

вони рівномірно омивались середовищем і не контактували між собою та з автоклавом. Потім поміщали в автоклав [7].



Рис. 2.2. Загальний вигляд лабораторного автоклаву А-10 MINI

Таблиця 2.1 – Умови проведення автоклавних досліджень

№ режиму	Концентрація NaCl, %	Температура середовища, °С
1	3	20
2	10	20
3	10	90
4	17	90

Для визначення впливу агресивного середовища на зразки їх вилучали з автоклаву один раз на добу протягом усієї тривалості експозиції, яка становила 600 год. Зміна лінійних розмірів зразків контролювалася за допомогою важільного мікрометра МР-25 ДСТУ та вихрострумового товщиноміра ВТ-201.

Для встановлення впливу, який наповнює пор покриття, сформованого МДО, маслом на довговічність насосів, проводили їх прискорені стендові випробування. Дослідженням піддавали насоси з втулками та обоймами, що сполучаються внутрішні циліндричні поверхні яких мали покриття, сформовані МДО, наповнені маслом, порівняно з лише зміцненими деталями. Крім цього, аналогічні дослідження проводили на колодязях корпусу шестеренного насоса НШ-32У-2. Випробування проводили відповідно до рекомендацій керівного документа РД 70.0009.006-85 «Вказівки за методами прискорених випробувань відновлених деталей для основних марок тракторів, комбайнів та інших машин», розроблених ВНВО «Ремдеталь», на стенді КІ-4815М-03, що служить для

випробування агрегатів гідроприводів сільськогосподарської техніки. Режими випробувань насосів НШ-32У-2 та НШ-50-2 представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими випробувань шестеренних насосів НШ-32У-2 та НШ-50-2

Показники	Значення
1. Номінальний тиск, МПа	14,0±0,5
2. Частота обертання валу приводу насоса, хв ⁻¹	1920±10
3. Температура робочої рідини, °С	50±5
4. Тривалість випробувань, год.	30

Перед проведенням досліджень здійснювали припрацювання досліджуваних сполук при плавній зміні тиску від 2,0 до 14,0 МПа протягом 1 години.

Щоб прискорити стендові випробування, до робочої рідини (мінеральна олива М10Г2) додавали абразивний матеріал, приготований з кварцового піску дисперсністю 5...20 мкм - 70% і 30...40 мкм - 30%. Вибір абразиву пояснюється тим, що ґрунтовий пил складається з частинок глинозему та кварцу та становить основну частку природних механічних домішок у гідравлічних системах тракторів. Концентрація абразивного матеріалу в маслі становила 1 г/л, зважений стан якого досягався його постійним перемішуванням у робочій рідині. Перед випробуваннями з гідравлічної системи подачі олії було видалено фільтри.

Як експлуатаційний показник роботи насосів використовували дійсну об'ємну подачу робочої рідини на один оборот валу насоса, яку визначали за формулою:

$$V_d = \frac{Q_d \cdot 1000}{\sum n}, \frac{\text{см}^3}{\text{об.}}, \quad (2.3)$$

де Q_d – обсяг відліку робочої рідини;

$\sum n$ - Кількість оборотів.

Для насосів об'єм відліку робочої рідини вибирався рівним 130 л. (за паспортом на стенд КІ-4815М-03ПС), а кількість обертів фіксувалася на табло лічильника. Об'ємну подачу насосів визначали на чистому маслі при температурі робочої рідини 50±5°С і номінальному тиску 14,00,5 МПа.

Після кожних 5 годин випробувань насоси розбирали та проводили необхідні вимірювання. Зношування внутрішніх циліндричних поверхонь прижимних і підшипникових обойм під цапфи шестерень, а також знос аналогічних поверхонь підтискних обойм, пов'язаних з головками зубів шестерень визначали мікрометричним глибиноміром ГМ-100 кл. 1 ДСТУ. Зношування внутрішніх циліндричних поверхонь втулок під цапфи шестерень визначали нутроміром індикаторним НІ-50-0,002, а колодязів корпусу - НІ-100-0,002 ДСТУ. Знос цапф і вінців шестерен відповідно мікрометрами МР50 і МР75 згідно ДСТУ.

Оцінку зносостійкості сполук деталей при випробуваннях проводили за інтенсивністю зношування, яку визначали за формулою:

$$J = \frac{I_C}{L}, \frac{м}{м}, \quad (2.4)$$

де I_C - сумарний знос досліджуваної деталі у поєднанні з шестірнею, м;

L - шлях тертя в поєднанні, що відповідає зносу I_B , м.

Зносостійкість сполук розраховувалася за формулою:

$$U = \frac{J_y}{J_{yH}}, \quad (2.5)$$

де J_y – інтенсивність зношування з'єднання шестірні та зміцненої деталі не наповненої оливою;

J_{yH} – інтенсивність зношування з'єднання шестірні та зміцненої деталі наповненої оливою.

Мета даних випробувань полягала у порівняльній оцінці:

1) зносостійкості рухомих сполук, що містять деталі, внутрішні циліндричні робочі поверхні яких мали покриття, сформовані МДО, з нанесеним мідним шаром, а також наповнені оливою, порівняно з аналогічними, без модифікування зміцненого шару;

2) корозійної стійкості відновлених робочих поверхонь деталей, зміцнених МДО, із покриттями мінімальної пористості, порівняно з аналогічними, що не мають захисного покриття.

Випробування проводили за умов рядової експлуатації. Швидкісні та навантажувальні режими взаємодії робочих поверхонь, а також корозійні середовища відповідали рекомендаціям заводів виробників. Для отримання достовірних даних на випробування встановлювали щонайменше п'ять експериментальних деталей.

Після проведення випробувань знос внутрішніх циліндричних робочих поверхонь деталей визначали за допомогою індикаторного нутроміра, а знос робочих поверхонь відповідних деталей типу «вал» визначали важільною скобою згідно з ДСТУ. Оцінку корозійних уражень робочих поверхонь деталей проводили візуально та за допомогою мікроскопа МІМ-6.

Абсолютна похибка окремих вимірів визначається за такою формулою:

$$\Delta y_i = \bar{y} - y_i, \quad (2.7)$$

де \bar{y} - середнє значення, визначаємо по формулі:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.8)$$

Помилка вибіркової середньої визначається за формулою:

$$s_y = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (2.9)$$

де n – число дослідів;

s – стандартне відхилення, що визначається за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2.10)$$

Відносна помилка вибіркової середньої:

$$s_y \% = \frac{s_y}{y} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Довірчий інтервал для середнього значення визначали за такою формулою:

$$\Delta y_i = \pm t_{\alpha} s_y + \delta , \quad (2.12)$$

де t_{α} - коефіцієнт Стюдента для 95% рівня значущості та $n-1$ ступеня свободи;

δ - похибка приладу, що приймається.

Повторність дослідів визначали за формулою:

$$\frac{\gamma_{\alpha}}{\nu} = \frac{t_{\alpha}(n)}{\sqrt{q}} \quad (2.13)$$

Після перетворення отримаємо:

$$q = \left(\frac{t_{\alpha}(n)\nu}{\gamma_{\alpha}} \right)^2 , \quad (2.14)$$

де γ_{α} - відносна помилка; ν - коефіцієнт варіації; $t_{\alpha}(n)$ - коефіцієнт Стюдента; q – повторність дослідів.

Задаючись величинами відносної помилки і вірогідності α , за величиною $\frac{\gamma_{\alpha}}{\nu}$ визначалося необхідне число повторностей.

Висновки по розділу

Розроблено програму, в якій наведено послідовність вирішення сформульованих у розділі 1 завдань наукового дослідження. Подано обладнання та відомості, відпрацьовані методи проведення експериментальних наукових досліджень.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Для підвищення зносостійкості рухомих з'єднань деталей машин з покриттями, сформованими МДО, найбільший практичний інтерес представляє дослідження їх триботехнічних характеристик, найбільш повне уявлення про які можна отримати, маючи дані про дослідження їх зношування. З отриманих результатів були виділені дані, пов'язані з початковим зносом (за перші 10 годин випробувань). Склад електроліту і режими МДО, режими фрикційно-механічного нанесення мідного шару і змащування поверхонь, що контактують, а також масло для наповнення покриттів були аналогічні тим, що використовувалися при проведенні експериментів.

Аналіз отриманих даних показав:

- початкове зношування рухомих сполук «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4%» та «сталь – покриття, сформоване МДО пористістю 14...15%» відрізняється незначно (не більше 2...3%) і відповідно становить від 15,5 до 14,9 мг. Вочевидь, що надмірна пористість (14...15%) не має істотного впливу початковий знос. У рухомого з'єднання сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 14 ... 15% наповнене маслом" цей показник знижується і становить вже 10,6 мг. Очевидно цьому сприяє утворення масляної плівки між випробуваними зразками. Масло в даному випадку виступає з пор покриття внаслідок різкого підвищення температури в зоні тертя на початку випробувань і сприяє зниженню інтенсивності зношування. Найменшим приробітковим зносом (6,5 мг) має рухоме з'єднання «сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 3 ... 4% з мідним шаром». Очевидно, що цьому сприяє мідь, яка знижує коефіцієнт тертя між зразком та контртілом.

- найнижча швидкість зношування після приробітку спостерігалася у рухомого з'єднання «сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 3 ... 4% з мідним шаром». Вона виявилася в 6,7 рази нижче, ніж у рухомого з'єднання

"сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 3 ... 4%". Наповнення покриттів пористістю 14 ... 15% маслом знизило швидкість їх зношування в 16 рази. Наявність у покриття пористості 14...15% порівняно з пористістю 3...4% негативного впливу на швидкість зношування досліджуваних сполук не мала. Навіть навпаки, незначно (на 10%) покращило цей показник. Це пов'язано з тим, що для проведення вимірювань випробування періодично зупиняли, і рахунок зменшення температури в зоні тертя повітря в порах покриття стискалося, в результаті чого масло частково проникало в зміцнений шар. Після відновлення випробувань відбувався зворотний ефект, що викликає самозмащення рухомого з'єднання в зоні тертя.

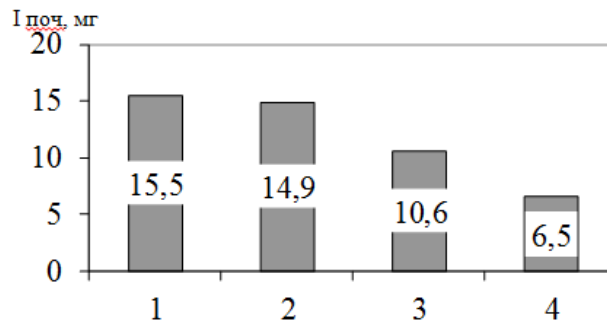


Рис. 3.1. Співвідношення початкових зносів рухомих з'єднань: «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4%» (1), «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14...15%» (2), «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14...15% наповнене маслом» (3), «сталь – покриття, сформоване МДО пористістю 3...4% з мідним шаром» (4)

Зносостійкість досліджуваних рухомих сполук:

1) "сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 3 ... 4%":

$$U = \frac{1}{0,40} = 2,50 \frac{год}{мг}$$

2) "сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 14 ... 15%":

$$U = \frac{1}{0,36} = 2,78 \frac{год}{мг}$$

3) "сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 14 ... 15% наповнене маслом":

$$U = \frac{1}{0,24} = 4,17 \frac{\text{год}}{\text{мг}}$$

4) "сталь - покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4% з мідним шаром":

$$U = \frac{1}{0,09} = 11,1 \frac{\text{год}}{\text{мг}}$$

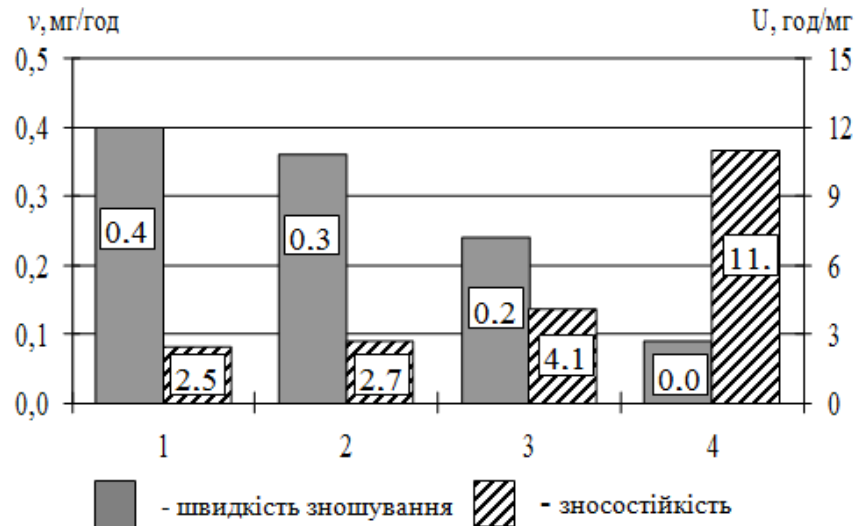


Рис. 3.2. Співвідношення швидкостей зношування та зносостійкості рухомих з'єднань: «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4%» (1), «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14...15%» (2), «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14...15% наповнене маслом» (3), «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4% з мідним шаром» (4)

Таким чином, наповнення пір оксидного покриття маслом або нанесення на його поверхню фрикційно-механічним способом мідного шару сприятливо впливає на зносостійкість рухомих сполук. А саме, збільшує її, відповідно, в 1,7 рази і 4,5 рази в порівнянні зі звичайним покриттям, сформованим МДО, пористістю 3 ... 4%. , так як від них залежить не тільки зношування, але і швидкість зношування рухомого з'єднання при експлуатації машини.

Результати автоклавних випробувань показали, що зразки з оксидним покриттям мають значно більшу стійкість до агресивного середовища, ніж без нього.

Дослідження протягом 600 годин у режимі №1 показали, що поверхні зразків з покриттям з наскрізною пористістю 3...4% до та після проведення випробувань практично не відрізняються. У той самий час на поверхнях зразків без покриття відзначено початок корозії.

Випробування в режимі №2 показали, що після 500 годин випробувань у зразків з покриттями зароджуються дрібні корозійні виразки на ребрах, що пояснюється крайовим ефектом при формуванні покриття. Корозія зразків без покриття носила більш виражений характер з утворенням корозійних виразок по всій досліджуваній поверхні.

Під час проведення експерименту у режимі №3 вже на початковому етапі випробувань було виявлено невеликі корозійні виразки, заповнені продуктами корозії. Після 80 годин випробувань зразків з покриттям, при спостереженні під мікроскопом 10^x , було відзначено зміну рельєфу поверхні у вигляді маленьких горбків та чітко реєструвалося зміна лінійних розмірів h_1 за рахунок корозії металевої основи та утворення нерозчинних продуктів корозії під зміцненим шаром.

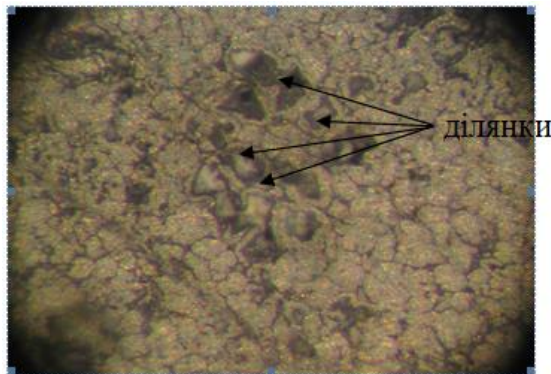


Рис. 3.3. Початок корозії поверхні зразка без покриття, 10^x

Найбільше корозійних виразок відзначалося на ребрах зразків, є концентраторами напруг, у той час на площині корозійних руйнувань було менше. Подальше збільшення лінійних розмірів реєструвалося протягом усього експерименту, але руйнації покриття не відбулося. До кінця випробувань на режимі №3 лінійні розміри зразків збільшилися на 44...52 мкм.

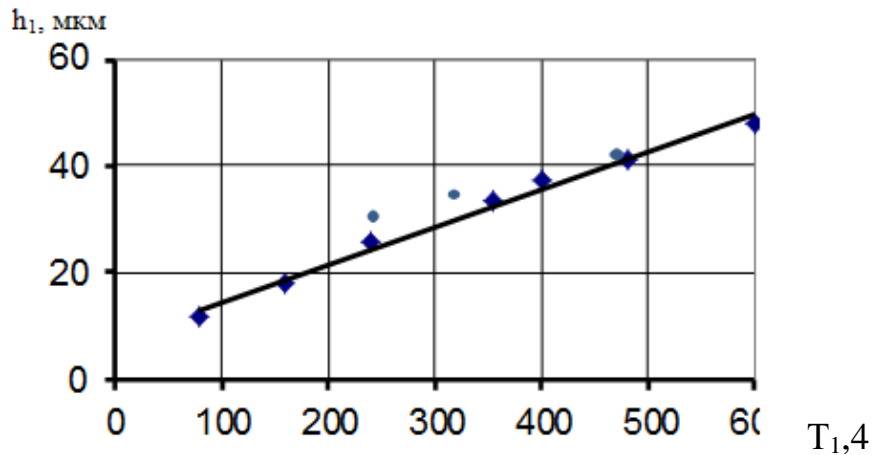


Рис. 3.4. Вплив тривалості корозійних випробувань T_1 у режимі №3 (NaCl – 10%, CH_3COOH – 0,5%, $t = 90$ °C) на зміну лінійних розмірів h_1 зразків з покриттями

Випробування у режимі №4 виявили інтенсифікацію процесу корозії зразків із оксидним покриттям. Послідовність та характер корозії в режимі №4 не відрізнялися від режиму №3, але швидкість корозії стала більшою. Початок зміни лінійних розмірів зразків стався вже через 48 годин знаходження в автоклаві. Через 480 годин випробувань був зареєстрований частковий відрив ділянок покриття від металевої основи. Через 500 годин сталося руйнування покриття у місцях здуття під впливом продуктів корозії металевої основи. У цьому найбільше збільшення лінійного розміру (висота «меніску») до руйнації покриття становило 76...80 мк. Діаметр ділянок покриття, що відшарувалися, становив у середньому 1,3...1,8 мм.

З проведених досліджень можна дійти невтішного висновку у тому, що МДО поверхні алюмінієвого металу сприяє збільшенню його корозійної стійкості. Кінцевою стадією впливу агресивного середовища на покриття є його руйнування під впливом тиску, що створюється нерозчинними продуктами корозії металевої основи, що утворюються, за рахунок проникнення агресивного середовища через наскрізні пори в покритті. Таким чином, чим меншою буде наскрізна пористість захисного покриття, тим вище буде корозійна стійкість робочої поверхні деталі.

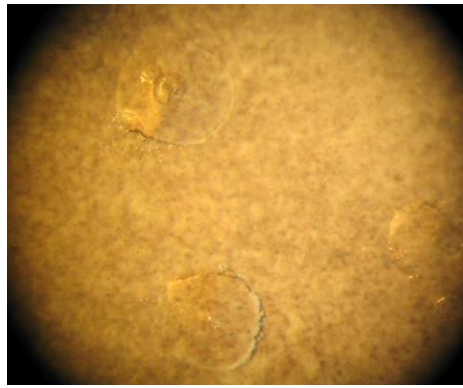


Рис. 3.5. Частковий відрив ділянок покриття від металевої основи, 20^x

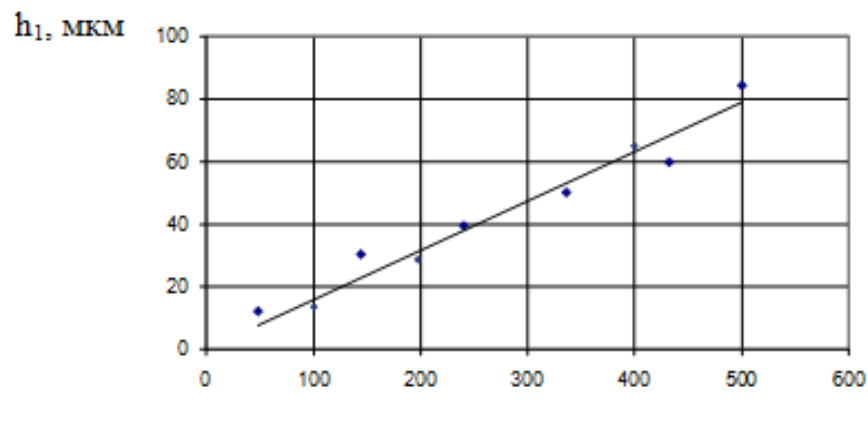


Рис. 3.6. Вплив тривалості корозійних випробувань T_1 у режимі №4 (NaCl – 17%, CH_3COOH – 0,5%, $t = 90^\circ\text{C}$) на зміну лінійних розмірів h_1 зразків з покриттями

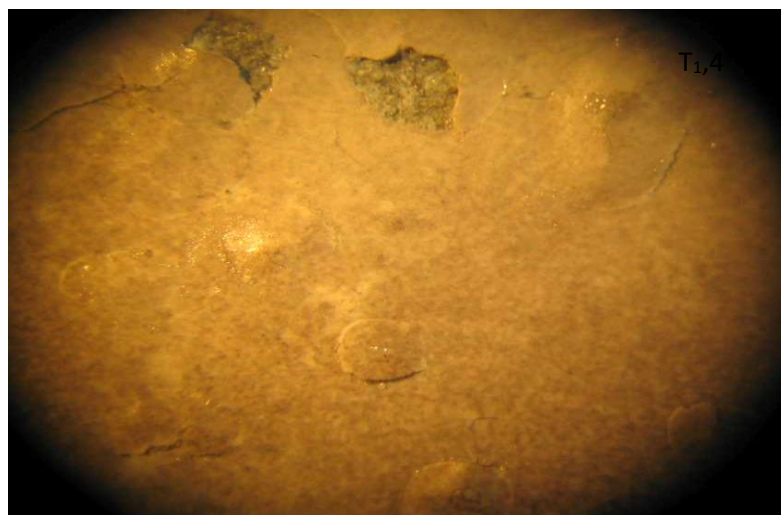


Рис. 3.7. Руйнування покриття під впливом продуктів корозії металевої основи, 20^x

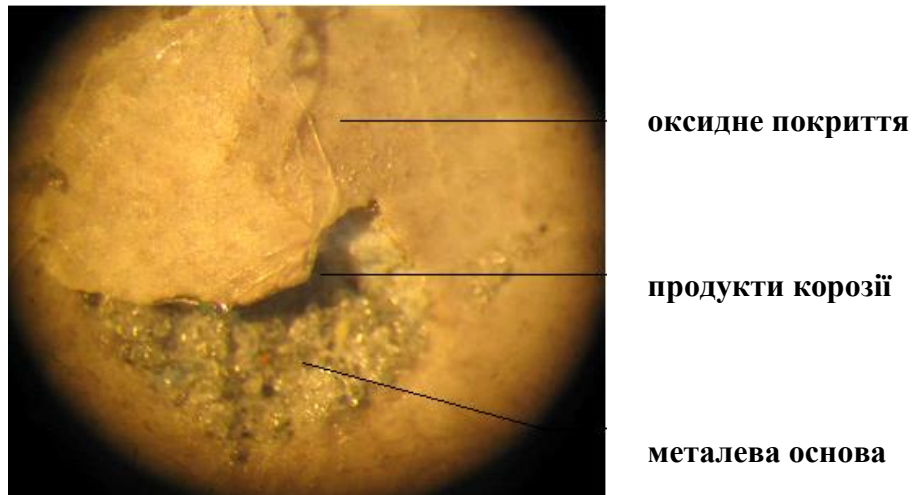


Рис. 3.8 Продукти корозії металевої основи під покриттям, що зруйнувалося, 40^x

Рентгеноструктурний аналіз продуктів корозії металевої основи, виявлених під покриттям, що відшарувалося, показав, що це гідроксид алюмінію $Al(OH)_3$. Відомо, що покриття, сформованого МДО, $[\sigma_p]=260$ МПа. Товщину покриття МДО приймаємо рівною 120 мкм.

Для визначення швидкості корозії v скористаємося формулами, використовуючи експериментальні точки із графіка залежності висоти опуклості від часу спостереження за процесом корозії.

$$h_1 = \frac{2vA}{\rho} (\tau - \tau_u) = \frac{2vA}{\rho} \left(\tau - \frac{r\rho}{16v} \right) \quad (3.1)$$

Звідки швидкість корозії:

$$v = \frac{\rho}{2\tau} \left(\frac{h_1}{A} + \frac{r}{8} \right) \quad (3.2)$$

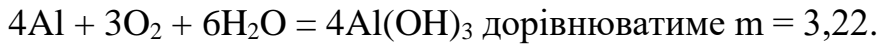
Підставляючи експериментальні значення висоти опуклості h_1 , отримані за відповідної тривалості корозійних випробувань T_1 , можна знайти швидкість корозії v . Результати розрахунку за формулою наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати корозійних випробувань за режимом №4

Час T_1 , год.	50	100	140	200	240	335	400	430	500
h_1 , мкм	12	14	31	40	40	50	65	60	85
$v \cdot 10^3$, кг/год. · м ²	0,135	0,08	0,12	0,11	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09

У розрахунку використовувалися такі значення:

- Щільність металу (алюміній) $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$ [1];
- розмір пір у покритті 6 мкм ($r=3 \text{ мкм}$);
- Щільність продуктів корозії (гідроксид алюмінію) $\rho_p = 2420 \text{ кг/м}^3$;
- коефіцієнт зміни маси m для реакції



Як видно з таблиці 4.4 швидкість корозії, як і має бути, має тенденцію до зниження, що пов'язано зі зменшенням з часом припливу води та кисню через масу продуктів корозії, що утворюються. У розрахункових формулах це не враховується, швидкість корозії приймалася постійною $0,08 \cdot 10^{-3} \text{ кг/год} \cdot \text{м}^2$ (за наявності оксидного покриття).

Після обчислень за рівнянням (2.72) для режиму №4 час початку руйнування покриття буде $\tau_{(№4)}=510,3 \text{ год}$. Модуль деформації продуктів корозії у своїй становив $E_{\text{ПК}}= 17 \text{ МПа}$.

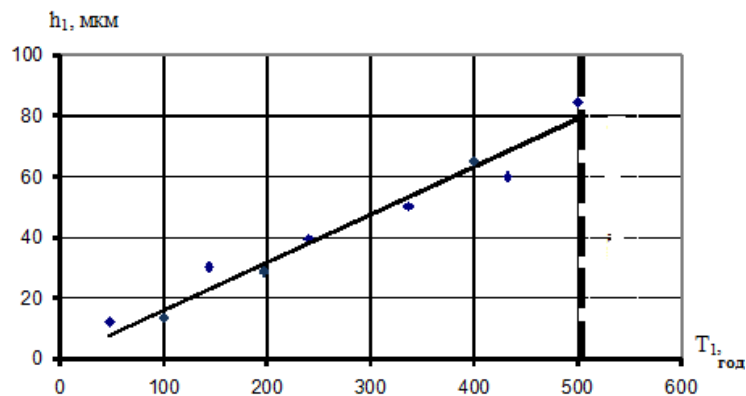
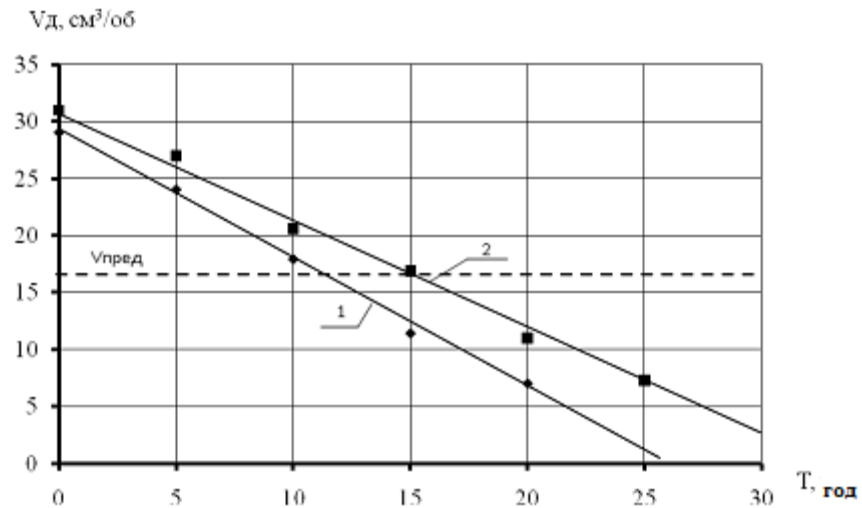


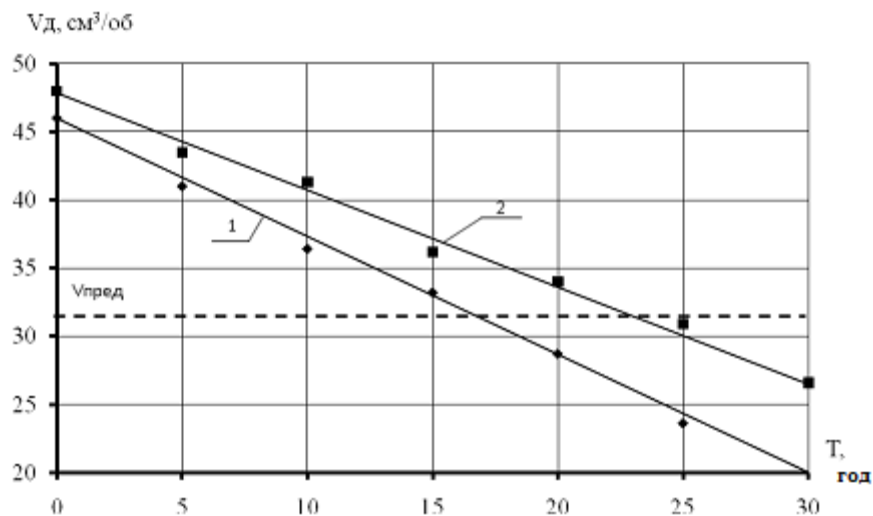
Рис. 3.9. Порівняння розрахункового та експериментального (отриманого в режимі 4) значень тривалості руйнування покриття

Якщо порівняти дані, отримані розрахунковим та експериментальним шляхами за режимом №4, то різниця між ними становитиме не більше 5%, отже рівняння, виведене в теоретичній частині для визначення часу початку руйнування оксидного покриття, можна визнати прийнятним для практичних розрахунків. Користуючись цим рівнянням можна прогнозувати тривалість роботи покриття, сформованого МДО, в агресивних середовищах до його руйнування.

Прискорені порівняльні стендові випробування протягом 30 годин показали, що зниження дійсної об'ємної подачі насосами НШ-32У-2 і НШ-50-2 з зміцненими деталями МДО і наповненими маслом настає, відповідно, в 1,2...1,3 рази менш інтенсивно, ніж у аналогічних насосів, робочі поверхні деталей, яких просто мали оксидне покриття.



а)



б)

Рис. 3.10. Вплив тривалості випробувань T на дійсну об'ємну подачу V_d насосів НШ-32У-2 (а) та НШ-50-2 (б): 1 деталі з покриттями пористістю 3...4% або 14...15% не наповнені маслом; 2 – деталі з покриттями пористістю 14...15% наповнені оливою.

Аналіз даних, представлених у таблиці 3.2, після порівняльних прискорених стендових випробувань протягом 30 годин, показав, що зносостійкість рухомих з'єднань гідравлічних шестеренних насосів з відновленими зміцненими оксидними покриттями з пористістю 14...15% наповненими маслом 1,4...1, рази вище, ніж із аналогічними деталями пористістю 3...4% чи 14...15% не наповненими маслом. У той же час зносостійкість з'єднання «корпус-шестірня» від наповнення пір зміцненого шару оливою практично не змінюється. Очевидно, це пов'язано з тим, що опрацювання головним чином відбувається в рухомому з'єднанні «втулка-шестірня». Саме її якість і надаватиме вирішальне значення збільшення ресурсу насосів.

Таким чином, за рахунок наповнення маслом внутрішніх циліндричних робочих поверхонь деталей відновлених з зміцненням МДО забезпечується як більш якісна приробіток рухомих з'єднань (насоси забезпечують кращу дійсну подачу), так і більший ресурс до граничного стану.

Таблиця 3.2 – Інтенсивність зношування і відносна зносостійкість з'єднань насосів НШ-32У-2 і НШ-50-2

З'єднання	Інтенсивність зношування з'єднання, $J \times 10^{10} = \frac{\text{знос, м}}{\text{шлях..тертя, м}}$		Зносостійкість з'єднання, U
	відновлені з зміцненням МДО	відновлені з зміцненням МДО та наповнені оливою	
насос НШ-32У-2			
Корпус-шестерня	0,631	0,601	1,05
Втулка-шестерня	0,728	0,514	1,42
насос НШ-50-2			
Обойма-шестерня	0,793	0,525	1,51

Для оцінки довговічності рухомих з'єднань та робочих поверхонь деталей було проведено експлуатаційні випробування експериментальних виробів.

Дослідження проводили за умов рядової експлуатації. На випробування було поставлено:

1) кришки розподільних шестерень двигунів ЗМЗ-53, робочі поверхні під крильчатку водяного насоса яких були відновлені пайкою або аргоно-дуговим наплавленням та мали покриття, сформовані МДО, пористістю 3...4%. Порівняння здійснювалося з відновленими та новими деталями, що не мають зміцнюючого покриття на аналогічних робочих поверхнях;

2) опори граблин жниварок для збирання трав кормозбиральних комбайнів КСК-100 і КПКУ-75, посадочні отвори яких були відновлені втулками і мали покриття, сформовані МДО, пористістю 3...4% з нанесеним фрикційно-механічним способом мідним шаром. Порівняння здійснювалося із серійними та відновленими втулками робочими поверхнями деталей з покриттями пористістю 3...4% без мідного шару, що працюють у рухомому з'єднанні «опора-граблін»;

3) втулки шестеренних насосів НШ-32У-2, посадочні отвори під шестірні яких були відновлені обтисканням і мали покриття, сформовані МДО, пористістю 14 ... 15% наповнені маслом. Порівняння здійснювалося з рухомими з'єднаннями «шестерня-втулка», відновлені підшипники ковзання яких мали покриття пористістю 3...4%, не наповнені маслом;

4) підтискні та підшипникові обойми шестеренних насосів НШ-50-2, посадочні напівотвори під шестірні яких були відновлені аргоно-дуговим наплавленням та мали покриття, сформовані МДО, пористістю 14...15% наповнені оливою. Порівняння здійснювалося з рухомими з'єднаннями «шестерня-обойма», у яких на відновлених посадкових поверхнях обойм під шестірні покриття пористістю 3...4% не наповнені маслом.

Після зняття деталей та з'єднань з випробувань та проведених вимірювань було встановлено наступне:

1) після пробігу транспортного засобу 300 тис. км. відновлені робочі поверхні під крильчатку водяного насоса кришок розподільних шестерень не мали корозійних руйнувань або відшарувань покриття, сформованого МДО,

пористістю 3...4%. Навпаки, корозійні руйнування аналогічних робочих поверхонь без оксидних покриттів після пробігу 100 тис. км були явно виражені і мали значний характер. Більше того, у деяких місцях вони були практично наскрізні та вимагали відновлення;

2) після напрацювання 510...530 мотогодин. зносостійкість рухомих з'єднань «опора-граблина», відновлених втулками

покриттями, сформованими МДО, пористістю 3...4% з мідним шаром, була в 3,5 рази вище, ніж з серійними опорами та в 2,1 рази вище, ніж з опорами, відновленими втулками з покриттям аналогічної пористості без антифрикційного шару;

3) після напрацювання 3500 мотогодин зносостійкість відновлених рухомих з'єднань «шестерня-втулка», посадочні отвори яких мали покриття, сформовані МДО, пористістю 14...15% наповнені маслом, була в 1,3 рази вище, ніж у аналогічних рухомих з'єднань з покриттями пористістю 3-4% не наповненими маслом;

4) після напрацювання 5500 мото-годин зносостійкість відновлених рухомих з'єднань «шестерня-обойма», посадкові напівотвори яких мали покриття, сформовані МДО, пористістю 14 ... 15% наповнені маслом, була в 1,4 рази вище, ніж у аналогічних рухомих з'єднань з покриттями пористістю 3-4% не наповненими маслом.

Експлуатаційні випробування підтвердили ефективність нанесення мідного шару на покриття, сформоване МДО, та наповнення їх оливою. Крім того, була підтверджена висока корозійна стійкість аналогічних покриттів пористістю 3 ... 4%. Усі результати випробувань підтверджені відповідними протоколами. Досліджувані деталі і рухливі з'єднання були залишені на техніці для подальшої експлуатації. Таким чином, результати наукових досліджень можуть використовуватись ремонтними та машинобудівними підприємствами для підвищення довговічності робочих поверхонь деталей машин.

Висновки по розділу

Раціональні режими фрикційно-механічного нанесення мідного шару на поверхню покриття, сформованого МДО, повинні бути такими: контактний тиск – 15 МПа, швидкість ковзання – 0,5 м/с, товщина міді, що натирає пластини – 0,05...0,10 мм, тривалість нанесення – 230...240 с, мастило контактуючих поверхонь – технічний гліцерин. Зазначені режими дозволяють отримати мідний шар товщиною 4,0 ... 4,5 мкм з шорсткістю $R_a = 0,63$ мкм.

При фрикційно-механічному нанесенні мідного шару його максимальна міцність зчеплення з поверхнею покриття, сформованого МДО, становитиме 21...22 МПа.

Корозійна стійкість зразків визначається наскрізною пористістю покриття. Руйнування покриття відбувається в місцях його відриву в зоні одиничної пори при висоті «меніску» понад 76...80 мкм, а діаметр ділянок, що відшарувалися, становив від 1,3 до 1,8 мм. Автоклавні випробування підтвердили правомірність рівняння для визначення часу початку руйнування покриття в результаті корозії металевої основи під впливом агресивного середовища. Розбіжність розрахункових та експериментальних даних становило трохи більше 5%.

Експлуатаційні випробування показали, що в умовах рядової експлуатації зносостійкість рухомого з'єднання «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4% з мідним шаром» у 2,1 рази, а рухомого з'єднання «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 14 ...15% наповнене маслом» в 1,3...1,4 рази вище, ніж у рухомого з'єднання «сталь – покриття, сформоване МДО, пористістю 3...4%». Крім цього, було підтверджено високу корозійну стійкість робочих поверхонь деталей з покриттями пористістю 3...4%.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновані комбіновані технології, що включають відновлення робочих поверхонь, МДО, як зміцнюючу обробку, і технологічні прийоми фінішної обробки покриттів, що дозволяють підвищити довговічність рухомих з'єднань і деталей машин, що мають істотне значення для різних галузей машинобудування.

Встановлено, що наповнення маслом покриття пористістю 14...15% зменшує зношування припрацювання рухомих з'єднань «сталь – покриття, сформоване МДО» у 1,5 рази, а нанесення на його поверхню пористістю 3...4% мідного шару – у 2,4 рази.

Показано, що наповнення оливою покриття пористістю 14...15% збільшує зносостійкість рухомого з'єднання "сталь – покриття, сформоване МДО" в 1,7 рази, а нанесення на його поверхню пористістю 3...4% мідного шару – в 4,5 рази.

Стендові випробування шестеренних насосів НШ-32У-2 і НШ-50-2 дозволили встановити, що зносостійкість рухомих з'єднань, у яких внутрішні циліндричні робочі поверхні деталей з оксидними покриттями пористістю 14...15% наповнені оливою, вище 1,4...1,5 рази, ніж у аналогічних сполук із покриттями не наповненими оливою.

Експлуатаційні випробування показали, що після напрацювання шестеренних насосів НШ-32У-2 3500 мото-год., а НШ-50-2 5500 мото-год. зносостійкість відновлених обтисканням або аргонодуговим наплавленням рухомих з'єднань, посадочні отвори під шестірні яких мали покриття, сформовані МДО, пористістю 14...15%, наповнені маслом, була відповідно в 1,3...1,4 рази менше, ніж у аналогічних з'єднань з покриттями не наповненими оливою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Замота Т.Н. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография. Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015. 303 с.
2. Замота Т.Н. Физико-химические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения. Проблемы трибологии (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ, 2011. №2. С. 26-30.
3. Замота Т.Н. Улучшение макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при электрохимико-механической доводке. Политранспортные системы: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф., Красноярск, 25-27 ноября 2010 г. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. С. 235-240.
4. Ищенко А.А. Анализ существующих способов защиты от коррозионных повреждений металлоконструкций машины непрерывного литья заготовок. Міжвузівський тематичний збірник наукових праць «Наука та виробництво». 2017г. №17. С.24– 29.
5. Хрущов М. М. Абразивное изнашивание. Москва : Наука, 1970. 251 с
6. Крагельский И. В. Трение и износ. Москва : Машиностроение, 1968. 480 с.
7. Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Москва : Машиностроение, 1964. 375с.
8. В.Д. Кузнецов, В.М. Пащенко, І.В. Смирнов, Д.В. Степанов. Науково-технічний журнал Проблеми тертя та зношування. Київ НАУ 2014 №2(63); с. 85-91.
9. Опарин Л. Н. Свойства металла, наплавленного электродуговым способом с подачей присадочного порошка в сварочную ванну. В сб.: Наплавленный металл. Состав, структура, свойства. Киев: ИЭС им. Патона НАНУ. 1992. с. 35-36.

10. Агеєв М.С. Солових Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ), 2020, Вип. 194.С. 81-92

11. Агеєв М.С. Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2020. №3 (285). С. 268 – 277. DOI 10.31891/2307 – 5732.

12. E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk, Y. Kalashnikov, M. Ahieiev, S. Pronin Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low – Speed Gas – Diesel Engines. SAE Technical Paper 2020 – 01 – 2107. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020 – 01 – 2107>. Mode of access: SAE International (Scopus). <http://papers.sae.org/10.4271/2020 – 01 – 2107>. Title from the screen.

13. Ляшенко Б.А., Микосянчик О.А., Агеєв М.С. Анализ триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий в условиях качения со скольжением при нестационарном нагружении Науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». Полтава: 2016. №2/1(28). С. 4-9.

14. Ю.В. Волков, Т.В. Вигерина Восстановление валов дизель–генераторов электроконтактным припеканием дискретных покрытий Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. г. Новополоцк: ПГУ, 2016. №3. С. 82-89.

15. Марчук В. Є., Духота О. І., Градинський Ю. О., Єнін О. М. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя. Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. Вип. 100. Харків : Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. С. 147-152.