

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА,
ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА
РЕМОНТ МАШИН»



КВАЛІФІКАЦІЙНА ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин
мікродуговим окисдуванням з наступним модифікуванням покриття у
ТОВ «Ремсинтез» м. Кропивницький»

Виконав:

магістрант групи ТС23М-2 Ярослав ЦИГАНЕНКО
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

К.Т.Н, доцент Олег БЕВЗ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

К.Т.Н, доцент Сергій МАГОПЕЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Рецензент:

_____, _____
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2024 р.

Кропивницький – 2024 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 20 «Аграрні науки та продовольство»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітньо-професійна програма: «Технічний сервіс сільськогосподарської техніки»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Циганенка Ярослава Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин мікродуговим оксидуванням з наступним модифікуванням покриття у ТОВ «Ремсинтез» м. Кропивницький»

керівник роботи Бевз Олег Вікторович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від «27» вересня 2024 року № 64-13

2. Строк подання здобувачем роботи «15» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Матеріали дослідницької практики. 2. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Обґрунтування напрямку наукових досліджень. 1. Характеристика виробничої структури ТОВ «Ремсинтез» м. Кропивницький 2. Актуальність теми та задачі дослідження.

Розділ 2. Теоретичні дослідження для розробки комбінованої технології відновлення і зміцнення МДО робочих поверхонь зношених деталей. 1. Механізм модифікування МДО покриття частинками нанопорошку CuO. 2. Модель струму пробою під час вторинної обробки МДО покриття. 3. Вплив модифікування частинками нанопорошку CuO МДО покриття на коефіцієнт тертя.

Розділ 3. Експериментальні дослідження. 1. Програма дослідження. 2. Обладнання та матеріали для формування МДО покриттів та модифікування зміцненого шару. 3. Оцінка працездатності електроліту для формування МДО

покриття. 4. Зміна товщини МДО покриття. 5. Визначення мікротвердості МДО покриття. 6. Визначення наскрізної пористості МДО покриттів. 7. Визначення вмісту міді на поверхні МДО покриттів. 8. Визначення коефіцієнта тертя і його молекулярної складової в рухомих з'єднаннях з МДО покриттям. 9. Планування експерименту по оптимізації режимів модифікування МДО покриття частинами нанопорошку CuO . 10. Порівняльна зносостійкість рухомих з'єднань. 11. Проведення експлуатаційних випробовувань.

Розділ 4. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. 1. Мікродугове оксидування алюмінієвого сплаву АК7ч. 2. Приготування розчину-носія нанопорошку CuO . 3. Дуговий електрофорез МДО покриття. 4. Працездатність електроліту. 5. Визначення вмісту міді на модифікованій поверхні МДО покриттів. 6. Визначення коефіцієнта тертя та його молекулярної складової у рухомих сполуках з МДО покриттями. 7. Порівняльні випробування на зносостійкість. 8. Порівняльні експлуатаційні випробування гідроциліндрів ГЦ-75.30.200.000.25. 9. Розроблений технологічний процес відновлення із зміцненням поршня гідроциліндра з алюмінієвого сплаву АК7ч МДО покриттям модифікованим частинками нанопорошку CuO .

5. Перелік ілюстративного матеріалу.

1. Актуальність теми та задачі дослідження (А1).
2. Модель струму пробою під час вторинної обробки МДО покриття (А1).
3. Програма експериментальних досліджень (А1).
4. Результати експериментальних досліджень (А1).
5. Розроблений технологічний процес відновлення із зміцненням поршня гідроциліндра з алюмінієвого сплаву (А1).

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування напрямку наукових досліджень	01.11.2024	
2	Теоретичні дослідження для розробки комбінованої технології відновлення і зміцнення МДО робочих поверхонь зношених деталей	12.11.2024	
3	Експериментальні дослідження	24.11.2024	
4	Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	06.12.2024	
5	Графічний матеріал	10.12.2024	

Магістрант _____ Циганенко Я.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Бевз О.В
(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Метою даної роботи є підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин відновленням та зміцненням мікродуговим оксидуванням за рахунок впровадження частинок нанопорошку CuO у пори покриття. Одним із сучасних та перспективних способів відновлення з одночасним зміцненням деталей з алюмінієвих сплавів з таким зносом, який позбавлений багатьох недоліків властивим іншим методам, є мікродугове оксидування (МДО). З розвитком наноіндустрії з'явилася можливість використання у відпрацьованих технологіях нових, перспективних матеріалів, зокрема нанопорошків традиційних металів та сплавів.

В першому розділі проведений аналіз ефективності виробничої діяльності ТОВ «Ремсинтез» та обґрунтовано тему дипломної роботи її актуальність та задачі дослідження.

В другому розділі описаний механізм модифікування МДО покриття частинками нанопорошку CuO , а також модель струму пробою під час вторинної обробки МДО покриття.

Третій розділ містить програму проведення дослідження, обладнання та матеріали для формування МДО покриттів та модифікування зміцненого шару, оцінку працездатності електроліту для формування МДО покриття, а також планування експерименту по оптимізації режимів модифікування МДО покриття частинами нанопорошку CuO .

В четвертому розділі описані результати експериментальних досліджень та проведений їх аналіз. Розроблений технологічний процес відновлення із зміцненням поршня гідроциліндра з алюмінієвого сплаву АК7ч МДО покриттям модифікованим частинками нанопорошку CuO .

Кваліфікаційна дипломна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і переліку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 82 сторінки. Робота включає в себе 30 рисунків, 5 таблиць, 22 використаних літературних джерела.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.	
1.1 Характеристика виробничої структури ТОВ «Ремсинтез» м. Кропивницький	7
1.2 Актуальність теми та задачі дослідження.....	8
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ МДО РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ	
2.1 Механізм модифікування МДО покриття частинками нанопорошку CuO	16
2.2 Модель струму пробою під час вторинної обробки МДО покриття	20
2.3 Вплив модифікування частинками нанопорошку CuO МДО покриття на коефіцієнт тертя.....	29
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
3.1 Програма дослідження	34
3.2 Обладнання та матеріали для формування МДО покриттів та модифікування зміцненого шару	34
3.3 Оцінка працездатності електроліту для формування МДО покриття	37
3.4 Зміна товщини МДО покриття	38
3.5. Визначення мікротвердості МДО покриття.....	38
3.6. Визначення наскрізної пористості МДО покриттів	39
3.7. Визначення вмісту міді на поверхні МДО покриттів.....	39
3.8. Визначення коефіцієнта тертя і його молекулярної складової в рухомих з'єднаннях з МДО покриттям	40
3.9. Планування експерименту по оптимізації режимів модифікування МДО покриття частинами нанопорошку CuO	44

3.10. Порівняльна зносостійкість рухомих з'єднань	48
3.11. Проведення експлуатаційних випробовувань.....	51
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
ТА ЇХ АНАЛІЗ	
4.1. Мікродугове окисдування алюмінієвого сплаву АК7ч (первинна обробка).....	53
4.2. Приготування розчину-носія нанопорошку CuO	55
4.3. Дуговий електрофорез МДО покриття (вторинна обробка)	57
4.4 Працездатність електроліту	60
4.5. Визначення вмісту міді на модифікованій поверхні МДО покриттів	62
4.6. Визначення коефіцієнта тертя та його молекулярної складової у рухомих сполуках з МДО покриттями.....	62
4.7. Порівняльні випробування на зносостійкість.....	65
4.8. Порівняльні експлуатаційні випробування гідроциліндрів ГЦ-75.30.200.000.25.....	71
4.9. Розроблений технологічний процес відновлення із зміцненням поршня гідроциліндра з алюмінієвого сплаву АК7ч МДО покриттям модифікованим частинками нанопорошку CuO	72
ВИСНОВКИ	78
Список використаної літератури.....	80

ВСТУП

Постійна закупівля нової техніки не вирішує питання технічного оснащення аграрного виробництва України. Величезна роль у вирішенні цього питання повинна відводитися ефективному використанню наявного парку машин та підтриманню його у працездатному стані за рахунок технічного обслуговування та ремонту.

Внаслідок зношування робочих поверхонь деталей втрачають свій працездатний стан близько 85...90 % машин. У зв'язку з цим підвищення зносостійкості деталей машин є дуже важливим та актуальним напрямом діяльності для підприємств, що займаються як виготовленням, так і ремонтом сільськогосподарської техніки. Невисока якість запасних частин та постійне збільшення їх вартості є причинами для розробки нових технологій виготовлення та відновлення, які дозволяють підвищити зносостійкість деталей та складальних одиниць сільськогосподарської техніки під час її експлуатації.

Відомо, що під час експлуатації сільськогосподарської техніки близько 50 % її деталей перетворюється на непрацездатний стан завдяки зношенню, які перевищують 0,1 мм. Значну частку в цьому обсязі займають деталі з алюмінієвих сплавів, що мають позитивні властивості і завдяки цьому широко застосовуються в сільськогосподарському машинобудуванні, але мають низьку зносостійкість і, відповідно, ресурс. Одним із сучасних та перспективних способів відновлення з одночасним зміцненням деталей з алюмінієвих сплавів з таким зносом, який позбавлений багатьох недоліків властивим іншим методам, є мікродугове оксидування (МДО).

З розвитком наноіндустрії з'явилася можливість використання у відпрацьованих технологіях нових, перспективних матеріалів, зокрема нанопорошків традиційних металів та сплавів.

РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1.1. Характеристика виробничої структури ТОВ «Ремсинтез» м. Кропивницький.

Завод ТОВ «Ремсинтез» знаходиться за адресою Україна, 25019, Кіровоградська область, м. Кропивницький, вулиця Перша Виставкова, 27 Б.

В 2004 році на Балашовці на території колишнього заводу був взятий в оренду ремонтний комплекс у якому і розпочалася виробнича діяльність підприємства. Спочатку займалися ремонтом і виготовленням простих елементів до сільськогосподарської техніки, а також ремонтували стару техніку і продавали як відновлену до працездатного стану.

В 2011 році підприємство почало розширюватись і придбало нову площадку для подальшої роботи. На новій території було побудовано за цей період шість нових будівель для потреб підприємства.

Основа функціонування будь-якого підприємства – виробнича діяльність, яка разом із фінансовою і маркетинговою діяльністю забезпечує досягнення його цілей.

У 2021 році підприємство вже займало площу майже 4000 м² на якому працюють 92 працівника за різними напрямками. У структуру підприємства входять такі виробничі зони [1]:

- основні виробничі цехи (складальне відділення для сівалок, складальне відділення для культиваторів та плугів, дробоструйної обробки, зварювальний цех металевих конструкцій, ділянка відновлення, наплавлення та зміцнення, пресове відділення, цех лазерної різки металевих конструкцій, слюсарно-механічний цех, пресовий і фарбувальний);

- допоміжні цехи і служби (склад запчастин, склад готової продукції, інструментальний відділ, випробувальна площадка, служба головного енергетика і служба постачання);

- управлінське відділення та дирекція (відділ кадрів, плановий відділ,

відділ головного конструктора, економічний відділ, бухгалтерія і відділ з охорони праці).

Основною діяльністю підприємства є власне виготовлення і продаж сільськогосподарських агрегатів для всіх технологій обробітку ґрунту, а саме:

- сівалки зернові модернізовані - СЗ-3.6, СЗ-4 mini-till, СЗ-5.4 mini-till;
- сівалки зернові прямого посіву - СІЧ-3.6, СІЧ-4.2, СІЧ-6, СІЧ-4 PRO, СІЧ-6 PRO;
- сівалки пропашні точного висіву - УПС-4, УПС-6, УПС-8;
- сівалки пропашні точного висіву - Церера-8 (6) mini-till;
- сівалки пропашні прямого посіву - Атрія-6, Атрія-8, Атрія-8 АЛ, Атрія-8 LUX;
- посівний комплекс Сатурн;
- культиватори міжрядні КНП;
- широкозахватні плуги ПШК Гетьман.

Прогресивним напрямом вдосконалення виробничої структури підприємства є створення наочно-замкнених ділянок, на яких здійснюється весь цикл обробки декількох, закріплених за даною ділянкою деталей (виробів).

Наразі характерним є поглиблення спеціалізації виробництва. Це сприяє спрощенню структури підприємств, підвищуючи ефективність як основних, так і допоміжних обслуговуючих ланок підприємства.

1.2. Актуальність теми та задачі дослідження.

Постійна закупівля нової техніки не вирішує питання технічного оснащення аграрного виробництва України. Величезна роль у вирішенні цього питання повинна відводитися ефективному використанню наявного парку машин та підтриманню його у працездатному стані за рахунок технічного обслуговування та ремонту.

Внаслідок зношування робочих поверхонь деталей втрачають свій працездатний стан близько 85...90 % машин. У зв'язку з цим підвищення

зносостійкості деталей машин є дуже важливим та актуальним напрямом діяльності для підприємств, що займаються як виготовленням, так і ремонтом сільськогосподарської техніки. Невисока якість запасних частин та постійне збільшення їх вартості є причинами для розробки нових технологій виготовлення та відновлення, які дозволяють підвищити зносостійкість деталей та складальних одиниць сільськогосподарської техніки під час її експлуатації.

Відомо, що під час експлуатації сільськогосподарської техніки близько 50 % її деталей перетворюється на непрацездатний стан завдяки зношенню, які перевищують 0,1 мм. Значну частку в цьому обсязі займають деталі з алюмінієвих сплавів, що мають позитивні властивості і завдяки цьому широко застосовуються в сільськогосподарському машинобудуванні, але мають низьку зносостійкість і, відповідно, ресурс.

Гідравлічні силові циліндри широко застосовуються в конструкціях тракторів для підйому та опускання навісних та напівнавісних с.-г. машин, керування поворотом, а також для приведення в дію робочих органів комбайнів та різних с.-г. машин.

Аналіз літературних даних показав, що ресурсовизначальною деталлю гідроциліндра є гумове кільце ущільнювача, встановлене в канавці поршня. При напрацюванні близько 1000 мото-годин, яку гідроциліндр отримує в середньому за декілька років роботи, поршень разом з кільцем ущільнювача зношується до такого ступеня, що вже не виконують свої функції. У той же час нерідкі випадки того, що навіть у нових гідроциліндрів ущільнення недостатньо ефективно працює через невідповідність матеріалу кільця встановленим вимогам або пошкодження внаслідок неякісного складання, а також внаслідок перевищення гранично допустимого навантаження на гідроциліндр при його експлуатації (рисунк 1.1).

У цих випадках функції кільця ущільнювача бере на себе робоча поверхня поршня гідроциліндра. Як матеріал для виготовлення поршнів використовуються, головним чином, ливарні алюмінієві сплави АК7ч і АК8М, у той час як гільзи виготовлені з загартованих сталей марок 40Х і 45 з

твердістю близько 50...55 HRC. У зв'язку з цим при їх взаємодії з робочою поверхнею поршня відбувається її інтенсивне зношування. Крім цього на зношування робочих поверхонь поршня і гільзи гідроциліндра впливають сторонні домішки (забруднювачі), що містяться в робочій рідині гідроагрегатів. Твердість таких забруднювачів у 3...12 разів більша, ніж матеріалів, що застосовуються для виготовлення рухомого з'єднання «поршень-гільза» гідроагрегатів. Після попадання в зазори між деталями, що здійснюють зворотно-поступальний рух, невідфільтровані тверді частинки можуть викликати не тільки підвищений знос, але і можуть збільшити силу тертя.

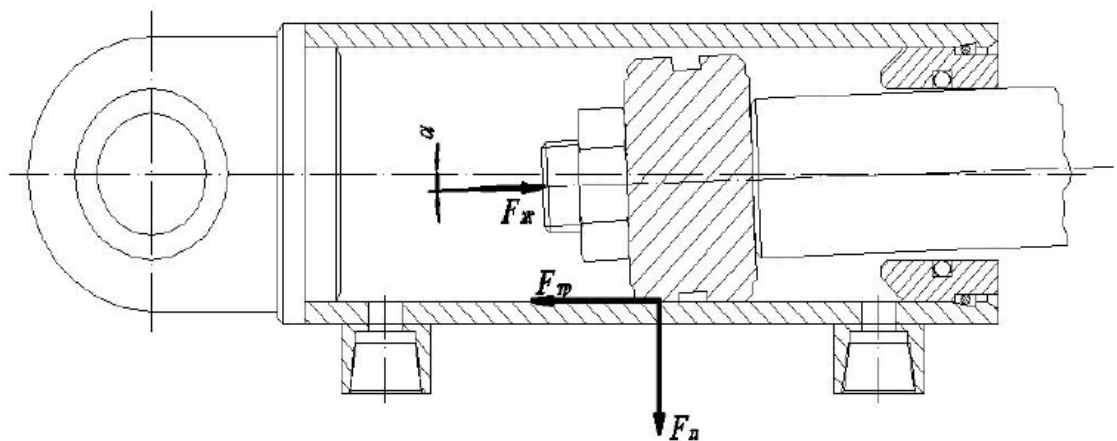


Рисунок 1.1 – Схема роботи гідроциліндра при перевищенні граничнодопустимого навантаження.

Внаслідок перерахованих вище факторів гідроциліндр після деякої тривалості експлуатації переходить у непрацездатний стан, оскільки зазор у поєднанні «поршень – гільза» виявляється достатнім для того, щоб масло вільно перетікало з однієї порожнини гідроциліндра іншу, не створюючи при цьому необхідного тиску.

У зв'язку з вищевикладеним, для проведення наукових досліджень нами був обраний алюмінієвий сплав АК7ч, як один із гідроциліндрів, що широко використовуються для виготовлення поршнів. Основний знос таких деталей посідає зовнішні циліндричні поверхні.

З метою визначення зносу робочої поверхні поршня гідроциліндра, що призводить гідроциліндр у непрацездатний стан нами були проведені

вимірювання зношених робочих поверхонь поршнів. Вибірка складала 50 штук.

Аналіз 50 непрацездатних силових гідроциліндрів, що мають напрацювання близько 1100 мото-годин, проведений на підприємстві, дозволив встановити, що зноси по діаметру робочих поверхонь поршнів знаходяться в інтервалі 0,055...0,12 мм. Силовий циліндр при таких зношуваннях повністю втрачає працездатний стан, так як зазор у рухомому з'єднанні збільшується настільки, що абразивні частинки, що знаходяться в гідравлічному маслі не викликають подальшого зношування робочої поверхні поршня. Проведений аналіз показав, що близько 90 % деталей, робочі поверхні яких зазнавали дефектації, необхідно відновлювати. Зношування робочої поверхні гільзи циліндра значно менше і коливається в інтервалі 20...60 мкм на діаметр. Фотографія зношеної деталі наочно характеризує її технічний стан (рисунок 1.2).

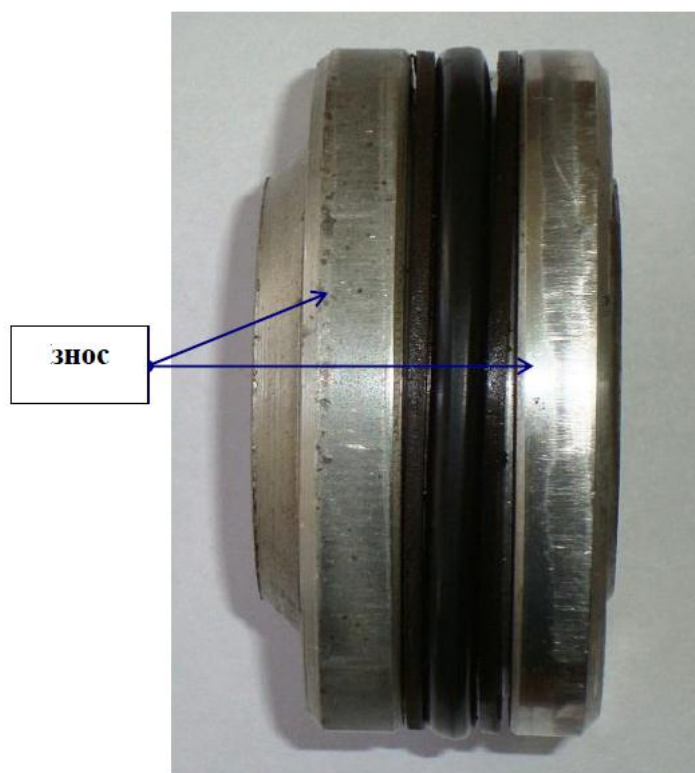


Рисунок 1.2 – Зношений поршень гідроциліндра ГЦ-75.30.200.000.25.

У зв'язку з вищевикладеним, для надання антифрикційних властивостей рухомому з'єднанню деталей машин доцільно розробити новий спосіб включення частинок нанопорошку CuO до складу МДО – покриття.

Таким чином, для зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості в рухомих з'єднаннях деталей машин, що містять МДО покриття цього типу можна використовувати антифрикційні матеріали, які при впровадженні в пори МДО покриття повинні забезпечити вирішення цього завдання.

Одним із сучасних та перспективних способів відновлення з одночасним зміцненням деталей з алюмінієвих сплавів з таким зносом, який позбавлений багатьох недоліків властивим іншим методам, є мікродугове оксидування (МДО). Цей спосіб останніми роками набув широкого поширення. Однак, при взаємодії деталей без мастильного матеріалу або в режимі граничного мастила, що виникають в аварійних ситуаціях, а також у періоди припрацювання, початку або закінчення роботи машини, робоча поверхня деталі, зміцнена МДО покриттям, викликає підвищене зношування деталі типу «вал». У зв'язку з цим знижується зносостійкість всього рухомого з'єднання. Процес формування МДО покриттів визначає наявність у зміцненому шарі залишкової пористості, яка залежить від режимів оксидування, складу та температури електроліту. Крім цього за рахунок пористості знижується площа поперечного перерізу МДО покриття, тоді пори стають концентраторами напруги, що призводить до більш інтенсивного зношування сформованого зміцненого шару [2, 3].

При формуванні МДО покриттів на алюмінієвих сплавах найчастіше використовують силікатно-лужний електроліт типу $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ [3]. Основні переваги процесу МДО представлені у книзі Сумінова І.В. ними є [4]: «отримання багатофункціональних покриттів заданого складу, структури та товщини», також до них можна віднести: можливість нанесення зміцненого шару однакового за своїми властивостями як на зовнішні, так і на внутрішні робочі поверхні деталей; одночасне оксидування кількох деталей (при використанні електролітичної ванни); доступність компонентів електроліту; екологічність процесу, що виражається у відсутності необхідності створення очисних споруд при використанні в процесі МДО силікатно-лужного електроліту; можливість використання різних матеріалів для надання зміцненому шару, що має високу мікротвердість (до 24 ГПа), антифрикційні

властивості (модифікування покриття). Застосування модифікованих МДО покриттів на деталях з алюмінієвих сплавів, дозволить значно збільшити не тільки зносостійкість відновленої деталі, але і ресурс відповідної рухомого з'єднання, а отже і довговічність всієї складальної одиниці. Ця обставина може позитивно позначитися на розвитку ремонтного виробництва.

У зв'язку з вищевикладеним, для надання антифрикційних властивостей рухомого з'єднання деталей машин, надається доцільним розробити новий спосіб включення частинок нанопорошку CuO до складу МДО покриття. Реалізацією ідеї може бути часткове зміна самого способу дугового електрофореzu, саме включення частинок нанопорошка CuO в МДО покриття після його повного формування. Цей спосіб передбачає повне формування МДО покриття на алюмінієвому сплаві (первинна обробка). Потім видалення пухкого, технологічного шару МДО покриття. Нанесення та закріплення частинок нанопорошку CuO на поверхню МДО покриття. Далі, для розплавлення та закріплення міді у порах зміцненого шару проводиться дуговий електрофорез (вторинна обробка). Дослідження властивостей покриттів, отриманих комбінованим способом МДО та дугового електрофореzu, із застосуванням нанопорошків CuO іншими вченими не проводилося. У зв'язку з цим доцільним підібрати раціональні склад електроліту і режими МДО, що дозволяють отримувати на відновленій робочій поверхні деталі з алюмінієвого сплаву оптимальні мікротвердість, товщину і пористість зміцненого шару для подальшого впровадження дуговим електрофорезом в пори МДО покриття частинок нанопорошка Cu деталей машин мають покриття даного типу.

Таким чином, для зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості в рухомих з'єднаннях деталей машин, що містять МДО покриття цього типу можна використовувати антифрикційні матеріали, які при впровадженні в пори МДО покриття повинні забезпечити вирішення цього завдання.

З розвитком наноіндустрії з'явилася можливість використання у відпрацьованих технологіях нових, перспективних матеріалів, зокрема

нанопорошків традиційних металів та сплавів. Одним із таких матеріалів є нанопорошок оксиду міді (CuO). Його досить часто використовують як твердий мастильний матеріал. Однак, теоретичних основ та технологічних рекомендацій щодо його використання для модифікування зміцненого шару утвореного МДО на робочих поверхнях деталей практично немає. У зв'язку з цим їх розробка повинна дозволити підвищити зносостійкість рухомих сполук деталей сільськогосподарської техніки з такими покриттями.

Мета роботи полягає у підвищенні зносостійкості робочих поверхонь деталей машин відновленням та зміцненням мікродуговим оксидуванням за рахунок впровадження частинок нанопорошку CuO у пори покриття.

Задачі дослідження.

1. Виявити оптимальну мікротвердість, товщину та пористість МДО покриття для подальшого впровадження дуговим електрофорезом частинок нанопорошку CuO у пори зміцненого шару, сформованого на ливарному алюмінієвому сплаві АК7ч.

2. За розрахунковим значенням сили струму теоретично визначити та експериментально підтвердити тривалість вторинної обробки МДО покриття.

3. Визначити оптимальний вміст компонентів у розчині-носії нанопорошку CuO та електроліті для дугового електрофорезу.

4. Визначити фактори впливають на зниження коефіцієнта тертя в рухомому з'єднанні, що включає МДО покриття модифіковане частинками нанопорошка CuO , що формується на алюмінієвому сплаві АК7ч. Оцінити зносостійкість рухомих з'єднань «МДО покриття – сталь» з використанням нанопорошку CuO та без нього.

5. Розробити комбіновану технологію, що включає відновлення та зміцнення МДО робочих поверхонь зношених деталей та їх подальше модифікування частинками нанопорошку CuO дуговим електрофорезом, яка дозволить підвищити зносостійкість рухомих сполук деталей сільськогосподарської техніки.

Об'єкт дослідження. Технологія відновлення та зміцнення МДО робочих поверхонь зношених деталей з наступним електрофорезом дуговим частинок нанопорошку CuO.

Предмет дослідження. Фізико-механічні та експлуатаційні властивості зміцнювальних покриттів, отриманих на деталях з алюмінієвого сплаву АК7ч, із застосуванням МДО та дугового електрофорезу частинок нанопорошку CuO.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані з використанням положень та методів електротехніки та електрофізики. Експериментальні дослідження виконані з використанням стандартних та приватних методик та сучасних приладів та обладнання. Обробка результатів досліджень проводилася з використанням методів математичної статистики.

Наукова новизна роботи:

1. Розроблено новий спосіб формування зносостійких покриттів на деталях з алюмінієвих сплавів, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя в рухомому з'єднанні між робочими поверхнями за рахунок впровадження дуговим електрофорезом частинок нанопорошка CuO в пори зміцненого шару.

2. Виявлено залежність електричного струму при дуговому електрофорезі частинок нанопорошку CuO в пори зміцненого шару від опору розчину-носія CuO, що дозволяє прогнозувати тривалість дугового електрофорезу при модифікуванні покриття за розрахованим значенням сили струму.

Практична цінність полягає у розробці комбінованої технології відновлення та зміцнення МДО зношених робочих поверхонь деталей машин з алюмінієвих сплавів з подальшим модифікуванням дуговим електрофорезом МДО покриття нанопорошком CuO. Технологію апробовано на прикладі відновлення поршня гідроциліндра серії ГЦ-75.30.200.000.25, який встановлюється на сівалки, культиватори, навішування тракторів ЮМЗ-6М/6Л, а також інші види сільськогосподарської техніки.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ МДО РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ.

2.1. Механізм модифікування МДО покриття частинками нанопорошку CuO.

З кожним роком підвищуються вимоги сільгоспвиробників до сільськогосподарської техніки, що сприяє пошуку та розробці нових досконаліших способів боротьби з її зношуванням. Зміцнювальні покриття на основі оксиду алюмінію Al_2O_3 значно підвищують зносостійкість робочих поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів, тому застосування таких покриттів є найбільш доцільним. Дані покриття відрізняються високою стійкістю до зношування та окислення. Як було зазначено в першому розділі, одним з перспективних і стрімко розвиваючих способів поверхневого зміцнення оксидокерамічними покриттями деталей сільськогосподарської техніки з алюмінієвих сплавів є МДО.

Відомо, що в процесі МДО на поверхні оброблюваної деталі виникає мігруючий точковий МДР. В літературі описується таке визначення іскрового розряду і процесу його утворення: «іскровий розряд (ІР) – це електричний нестабільний розряд в газі, що виникає і протікає нестаціонарно (зазвичай при тисках близьких до атмосферного і вище) у тому випадку, коли безпосередньо після пробою розрядного проміжку напруга на ньому падає протягом дуже короткого відрізка часу (до 100 мкс) нижче за величину напруги гасіння МДР». Таким чином, МДР, тобто самостійний газовий розряд, формується в порах оксидної плівки на поверхні вентильного металу.

Найбільш важливими моментами в утворенні МДР при МДО є процеси виникнення парогазових бульбашок (ПГП) і запалення в них мікророзрядів. Початкова іонізація проміжку відбувається при контактно-розривному процесі в ході виникнення та розширення ПГП в порі МДО покриття. Для МДР характерне багаторазове збільшення довжини газорозрядного проміжку за

рахунок парогазовиділення, подовження порового каналу при зростанні товщини МДО покриття, а головне різке збільшення об'єму ПГП при запаленні мікророзряду через зростання температури в ньому.

В результаті теплового впливу МДР окисна плівка локально нагрівається до температури вище 2000 °С [5], що призводить до оплавлення стінок порових розрядних каналів та появи в МДО покритті кристалічних модифікацій оксидів алюмінію, у тому числі і високотемпературних, за рахунок дегідратації оксогідроксидів і поліморфних перетворень.

Хімічний склад оксидованого алюмінієвого сплаву впливає на багато параметрів процесу: час запалювання МДР, склад і властивості одержуваних МДО покриттів, але насамперед на можливість ініціювання і підтримки продуктивного процесу МДО. Хімічний склад алюмінієвих сплавів також визначає вибір складу електроліту та режимів їх оксидування. Так, наявність у сплаві міді дає можливість зменшити кількість Na_2SiO_3 в силікатно-лужному електроліті, а сплави, що містять кремній, добре оксидуються в силікатному електроліті, але вимагають більш високих щільностей струму при МДО.

Електроліт типу « $\text{KOH}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$ » найчастіше використовується для МДО. Гідроліз протікає за такою схемою:



Далі, пройшовши термічну дегідратацію, кремнієва кислота H_2SiO_3 дає діоксид кремнію SiO_2 у вигляді α -кристобаліту та/або α -кварцу, що і спостерігається при МДО в розчинах, що містять силікати натрію (рідке натрієве скло). При МДО алюмінієвого сплаву в силікатно-лужному електроліті відбувається утворення силіманіту:



Якщо до складу електроліту входять силікати, то утворюється з них під дією МДР оксид кремнію при нагріванні з Al_2O_3 і оксидами інших металів може утворюватись алюмосилікати. Алюмосилікати це тугоплавкі та термічно стійкі речовини, які не взаємодіють із розчинами більшості кислот та лугів. Звідси і

виходить висока твердість і корозійна стійкість МДО покриттів, що формуються при використанні електроліту даного складу.

На підставі вищевикладеного можна зробити короткий висновок про те, що процес утворення МДО покриття заснований на МДР, які утворюються в парогазових бульбашках під окисної плівки на алюмінієвому сплаві. На підставі аналізу літературних даних та власних проведених досліджень нами було зроблено припущення, що включення частинок CuO до складу МДО покриттів, при дуговому електрофорезі, може забезпечити суттєве підвищення антифрикційних властивостей рухомих сполук деталей машин, що містять покриття даного типу при взаємодії деталей без мастил або у режимі граничного мастила.

Однак, на відміну від загальноприйнятого дугового електрофорезу, де включення частинок порошків металів МДО покриття відбувається прямо з електроліту, в якому і відбувається МДО, цей процес пропонується здійснювати в дві стадії. На початку МДО, а потім дуговий електрофорез із збільшеною концентрацією частинок CuO на поверхні вже сформованого оксидокерамічного покриття. Перша стадія (первинна обробка) передбачає повне формування МДО покриття на алюмінієвому сплаві. Потім видалення пухкого технологічного шару. Нанесення та закріплення частинок CuO на поверхню МДО покриття. Далі йде друга стадія, яка передбачає дуговий електрофорез (вторинна обробка), для розплавлення та закріплення міді в оксидокерамічному покритті. Перевагами такого рішення буде включення частинок антифрикційного металу тільки в пори та поверхневий шар МДО покриття. Це дозволить суттєво знизити витрату порошку і підвищити антифрикційні властивості зовнішнього зміцненого шару. Ця обставина пов'язана з тим, що під час тертя двох твердих поверхонь бере участь лише зовнішня поверхня МДО покриття. Тому покращення антифрикційних властивостей по всій товщині зміцненого шару не потрібне.

Для реалізації цієї ідеї необхідно вибрати матеріал порошку, його фракцію та спосіб його фіксації на зовнішній поверхні вже сформованого МДО

покриття. Додавання частинок міді до складу МДО покриття проводитиметься дуговим електрофорезом.

Проаналізувавши наявні порошкові матеріали, їх властивості та вартість, ми дійшли висновку, що для підвищення антифрикційних властивостей МДО покриттів найбільш доцільно використовувати порошки CuO . Такий порошок часто застосовують у матеріалознавстві, як добавки до електродних матеріалів для виготовлення високопровідних кисневих електродів з високою електрохімічною активністю, що на нашу думку буде сприятливо позначатися на включенні порошку до складу МДО покриття при впливі на нього ІР. Крім цього, даний вибір порошку ґрунтується на аналізі літературних джерел [3, 5]. Тому відкидаючи мідовмісні порошки ми зупинили свій вибір на порошку з чистої міді.

У зв'язку з тим, що розміри пор в МДО покритті коливаються в інтервалі від 2 до 6 мкм [3, 6], можна припустити, що для кращої заповнюваності (по глибині зміцненого шару) при дуговому електрофорезі потрібен порошок з фракцією 1 мкм, який являється нанорозмірним. Запропонований нами спосіб закріплення частинок нанопорошку CuO перед дуговим електрофорезом на поверхні МДО покриття полягає в наступному. Порошок повинен знаходитися у складі розчину, який при нанесенні на сформоване при первинній обробці МДО покриття дозволить зафіксувати його частинки на поверхні зміцненого шару до початку вторинної обробки. Для приготування основи розчину-носія ми вирішили вибрати дистильовану воду і один із компонентів електроліту, а саме Na_2SiO_3 , який застосовується в промисловості як компонент клейових розчинів. Це зумовлено тим, що порошок CuO в розчині-носії на основі води і рідкого натрієвого скла під власною вагою буде осаджуватися на зовнішню поверхню МДО покриття і частково проникати в його пори, а Na_2SiO_3 після випаровування води утримає частки CuO на МДО покритті. Вибір Na_2SiO_3 для основи розчину-носія також заснований на тому, що він є компонентом електроліту і не зможе вплинути на зміну хімічного складу МДО покриття при вторинній обробці. Однак не можна повністю виключити використання інших

компонентів замість нього, наприклад крохмалю. Він не взаємодіє із компонентами електроліту, а також не зможе вплинути на фазовий склад МДО покриття. Крім цього крохмаль має хороші клейові характеристики. Однак, він може негативно вплинути на утворення ІР [4].

Як спосіб включення частинок нанопорошка CuO до складу МДО покриття, як описувалося раніше, будемо використовувати дуговий електрофорез. Раніше вказувалося, що МДР при МДО проходить крізь парогазову бульбашку, яка утворюється в порах зміцненого шару. Після нанесення розчину-носія на поверхню МДО покриття верхня частина пор у ньому виявиться зайнятою частинками CuO , а сама пора всередині буде пориста. І тут при вторинній обробці вплив ІР проходитиме шляхом найменшого опору, тобто, через пори у зміцненому шарі. У цей же час він вплине на нанопорошок CuO , який перебуватиме в зоні одиничної пори. Під дією ІР нанопорошок CuO розплавиться і займе порожнину пори. При цьому також відбудеться часткове розплавлення стінки пори МДО покритті. Таким чином і відбудеться модифікування його зовнішнього шару, мідь буде включена до складу зміцненого шару. Тривалість вторинної обробки вибиратимемо виходячи з потреби розплавлення якомога більшої кількості частинок нанопорошку CuO , нанесеного у складі розчину-носія на поверхню МДО покриття. На рисунку 2.1 представлений запропонований нами механізм модифікування МДО покриття частинками нанопорошку CuO .

2.2. Модель струму пробою під час вторинної обробки МДО покриття.

Для вибору електричного режиму вторинної обробки необхідно провести теоретичне дослідження, яке дозволить визначити електричний струм пробою зміцненого шару, який необхідний для розплавлення якомога більшої кількості частинок нанопорошку CuO , нанесеного на поверхню МДО покриття. Проведення такого розрахунку потребує чіткого поняття про механізм протікання ІР. Він дозволить зрозуміти, як змінюються електричні параметри під час процесу дугового електрофорезу залежно від електрофізичних

параметрів електроліту, розчину-носія та сформованого МДО покриття. Як відомо, закон якому підпорядковується процес МДО циклічний. У ході такого процесу ІР послідовно проходить через стадії зародження, розповсюдження та згасання. На сьогоднішній день механізм утворення та пробою бар'єрної плівки досить добре вивчений та математично описаний [2, 4, 6]. В роботах Проніна В.В. описуються теоретичні уявлення зростання МДО покриття на алюмінієвому сплаві та її кінетичні закономірності, а також у ній представлена динаміка процесу зародження МДР в елементарному осередку [6]. У цій моделі враховано форму ЕРС джерела технологічного струму. Однак, у нашому випадку МДО покриття вже сформовано, тому ІР в основному проходить через пори МДО покриття. Крім цього при вторинній обробці з'являється додатковий опір у вигляді розчину-носія CuO .

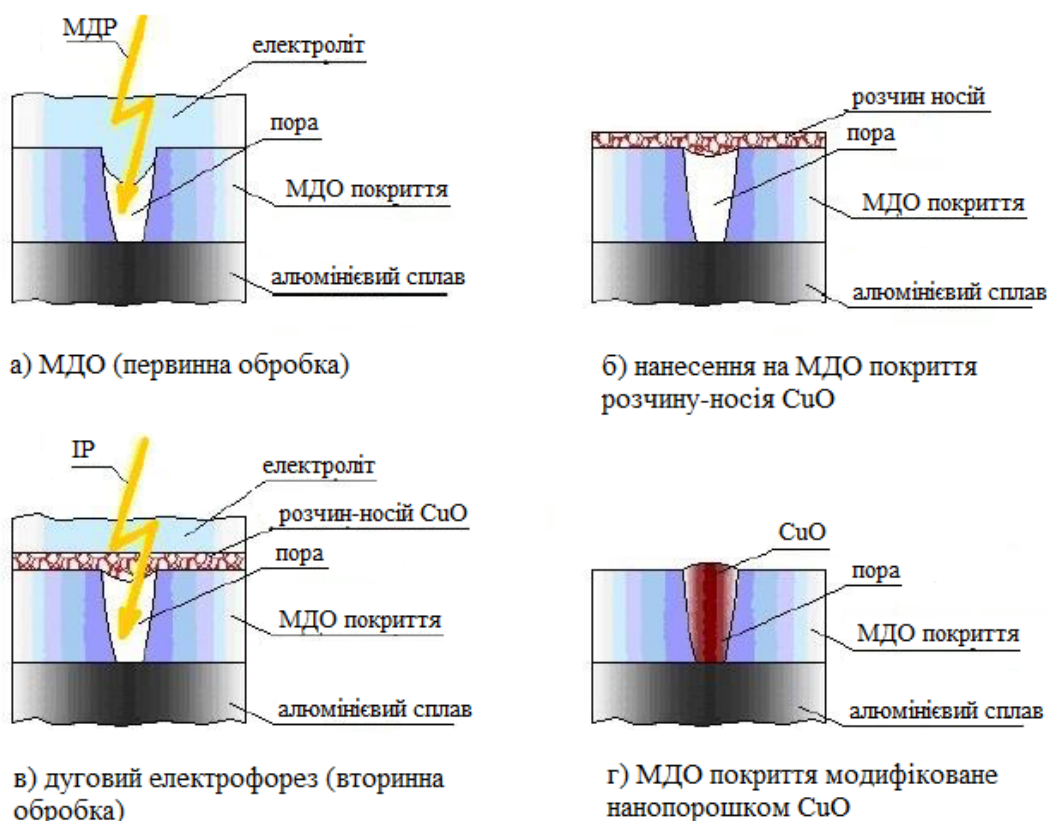


Рисунок 2.1 – Механізм модифікування МДО покриття частинками нанопорошку CuO .

У зв'язку з цим модель, представлена в роботі [6] отримала в нашій роботі подальший розвиток стосовно вторинної обробки (дугового електрофорезу)

МДО покриття. При розгляді початкових умов завдання, як і у роботі [6] було зроблено низку припущень. У розрахунках не враховувався іонний струм у системі та опір електроліту в порах МДО покриття. У нашому випадку завдання було зведено до визначення зміни електронного струму, що проходить через систему метал - оксид - розчин-носіє CuO - електроліт (МОРЕ), від напруги на комірки. Еквівалентна електрична схема системи МОРЕ представлена у вигляді схеми рисунок 2.2. При цьому вводилося припущення, що постійними величинами залишаються такі параметри: опір МДО покриття ($R_{\text{пок}}$), опір бар'єрного шару на дні наскрізної пори МДО покриття (R_{δ}) та ємність МДО покриття [7], а також опір електроліту (R_e). Параметри опору розчину-носія (R_p) та опору повітря в порах (R_n) змінюватимуться з часом. Зокрема R_p знижуватиметься, оскільки розчин-носіє буде витрачено, тобто одна його частина заповнить пори і утворюється опір металу в порах, а інша частина зовсім розчиниться в електроліті, при цьому R_n зведеться до нуля, за дуже короткий проміжок часу, а з'явиться опір електроліту в порах.

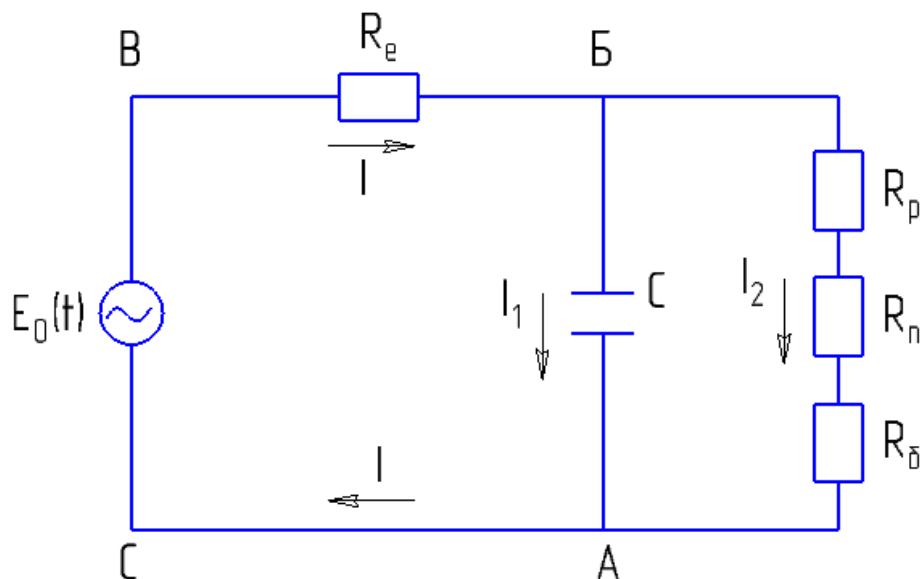


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема системи МОРЕ у передпробійному стані при вторинній обробці. R_e – опір електроліту; R_p – опір розчину-носія нанопорошку CuO; R_n – опір повітря в порах МДО покриття; R_{δ} – опір бар'єрного шару на дні наскрізної пори МДО покриття; C – ємність МДО покриття; $E_0(t)$ – ЕРС джерела живлення.

Тоді падіння напруги на ділянці АВ під час вторинної обробки МДО покриття (рис. 2.2) буде:

$$U_{AB} = q / C = (1 / C) \int I_1 t(dt) = I_2 (R_n + R_{\delta} + R_p). \quad (2.1)$$

Отже:

$$I_2 = ((R_n + R_{\delta} + R_p)C)^{-1} \int I_1 t(dt). \quad (2.2)$$

Падіння напруги на ділянці АВ при вторинній обробці МДО покриття буде складатися із суми падінь напруг на ділянках АВ і БВ, тобто:

$$\begin{aligned} U_{AC} = U_{AB} + U_{BV} &=> IR_e + I_2 (R_n + R_{\delta} + R_p) => \\ &=> E_0(t) = IR_e + I_2 (R_n + R_{\delta} + R_p) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Тоді, загальний струм при вторинній обробці МДО покриття визначатиметься з виразів:

$$I = \frac{E_0(t)}{R_e} - \frac{I_2 (R_n + R_{\delta} + R_p)}{R_e} = \frac{E_0(t)}{R_e} - \frac{\int I_1 t(dt)}{R_e \cdot C}. \quad (2.4)$$

$$I = I_1 + I_2 = I_1 + ((R_n + R_{\delta} + R_p)C)^{-1} \int I_1 t(dt). \quad (2.5)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь (2.4) та (2.5) та отримаємо:

$$\begin{aligned} I_1 + ((R_n + R_{\delta} + R_p)C)^{-1} \int I_1 t(dt) &= \frac{E_0(t)}{R_e} - \frac{\int I_1 t(dt)}{R_e \cdot C} => \\ => I_1 + \frac{\int I_1 t(dt)}{(R_n + R_{\delta} + R_p)C} - \frac{E_0(t)}{R_e} &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Для спрощення математичних розрахунків замінимо коефіцієнтом m

$$\frac{1}{(R_n + R_{\delta} + R_p)C}.$$

$$\frac{1}{(R_n + R_{\delta} + R_p)C} = m. \quad (2.7)$$

Тоді, знаючи що ЕРС джерела живлення $E_0(t)$ підпорядковується закону:

$$E_0(t) = A \cdot \sin(\omega t) - B, \quad (2.8)$$

де A – поточна амплітудна напруга (величина, що залежить від товщини МДО покриття і щільності струму), B ;

B – зміщення амплітуди коливання (пов'язано з використанням ємнісного джерела струму), B ;

ω - кутова частота, с^{-1} , $\omega=2\pi f$ (при $f=50$ Гц, $\omega=100\pi$).

Враховуючи (2.7) та (2.8) рівняння (2.6) набуде вигляду:

$$I_1(t) + m \int I_1(t) dt - \frac{A \cdot \sin(\omega t) - B}{R_e} = 0. \quad (2.9)$$

Продиференціювавши рівняння (2.9) отримаємо:

$$I_1'(t) + m I_1(t) = \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e}. \quad (2.10)$$

Загальне рішення I_0 рівняння (2.10) знайдемо у вигляді:

$$I_0 = I_{00} + I_{\text{чн}}, \quad (2.11)$$

де I_{00} – загальне розв'язання відповідного однорідного диференціального рівняння;

$I_{\text{чн}}$ – приватне рішення неоднорідного диференціального рівняння.

Характеристичне рівняння відповідного однорідного диференціального рівняння має вигляд:

$$y + m = 0. \quad (2.12)$$

Тоді рішення рівняння набуде вигляду:

$$y = -m. \quad (2.13)$$

Йому відповідатиме загальне рішення у вигляді:

$$I_{100}(t) = e^{-mt}. \quad (2.14)$$

Знайдемо окреме рішення неоднорідного диференціального рівняння $I_{\text{чн}}$.

Так як права частина цього рівняння має вигляд $\frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e}$, то її можна

представити:

$$e^{\alpha t} \cdot [P_n(t) \cdot \cos(\beta t) + Q_m(t) \cdot \sin(\beta t)]. \quad (2.15)$$

де $\alpha=0$;

$\beta=\omega$;

Q_m – багаточлен рівняння, $Q_m = 0$.

$$P_n = \frac{A \cdot \omega}{R_e} - \text{багаточлен рівняння.}$$

Тоді отримаємо окреме рішення неоднорідного диференціального рівняння у вигляді:

$$I_{1\text{ЧН}}(t) = D_1 \cdot \cos(\omega t) + D_2 \cdot \sin(\omega t), \quad (2.16)$$

де D_1 та D_2 – постійні коефіцієнти.

Визначимо похідну виразу (2.16) та отримаємо:

$$I'_{1\text{ЧН}}(t) = -D_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + D_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t). \quad (2.17)$$

Щоб визначити постійні коефіцієнти D_1 та D_2 зробимо підстановку отриманого приватного рішення неоднорідного диференціального рівняння (2.16) та його похідної (2.17) у початкове рівняння (2.10).

$$\begin{aligned} m \cdot D_1 \cdot \cos(\omega t) + m \cdot D_2 \cdot \sin(\omega t) - D_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + D_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = \\ = \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Загальне рішення рівняння набуде вигляду:

$$I_1(t) = e^{-mt} + D_1 \cdot \cos(\omega t) + D_2 \cdot \sin(\omega t). \quad (2.19)$$

Визначимо коефіцієнти D_1 та D_2 , склавши систему рівнянь на основі рівняння (2.18):

$$\begin{aligned} m \cdot D_2 - D_1 \cdot \omega &= 0 \\ m \cdot D_1 - D_2 \cdot \omega &= \frac{A \cdot \omega}{R_e} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Рішенням цієї системи буде:

$$D_1 = \frac{A \cdot \omega}{R_e \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m \right)}. \quad (2.21)$$

$$D_2 = \frac{A \cdot \omega^2}{R_e \cdot (\omega^2 + m^2)}. \quad (2.22)$$

Тоді загальне рішення набуде вигляду:

$$I_1(t) = e^{-mt} + \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{R_e \cdot (\omega^2 + m^2)}. \quad (2.23)$$

Підставивши (2.23) у (2.2) отримаємо:

$$I_2 = \left((R_{\pi} + R_{\delta} + R_p)C\right)^{-1} \int \left[e^{-mt} + \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{R_e \cdot (\omega^2 + m^2)} \right] dt =$$

$$= \left((R_{\pi} + R_{\delta} + R_p)C\right)^{-1} \cdot \left[\frac{e^{-mt}}{m} + \frac{A \cdot \sin(\omega t)}{R_e \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} - \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e \cdot (\omega^2 + m^2)} \right]. \quad (2.24)$$

У результаті рівняння (2.5) що дозволяє визначати загальний струм, що проходить через систему МОРЕ, набуде вигляду:

$$I = e^{-mt} + \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{R_e \cdot (\omega^2 + m^2)} +$$

$$+ \left((R_{\pi} + R_{\delta} + R_p)C\right)^{-1} \cdot \left[\frac{e^{-mt}}{m} + \frac{A \cdot \sin(\omega t)}{R_e \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} - \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_e \cdot (\omega^2 + m^2)} \right]. \quad (2.25)$$

Рівняння (2.25) являє собою модель, яка показує зміну струму пробую при вторинній обробці МДО покриття та враховує електрофізичні параметри наскрізної пористості, розчину-носія CuO та ЕРС джерела живлення. З отриманого рівняння видно зворотно-пропорційну залежність сили струму від напруги електричного поля в МДО покритті, опору розчину-носія CuO, електроліту, МДО покриття та повітря в його порах. Воно пояснює потребу у більшій силі струму в момент початку вторинної обробки МДО покриття з нанесеним на нього розчином-носієм CuO, ніж при МДО.

При вторинній обробці струм залежить від опору системи МОРЕ. Теоретична залежність зміни опору системи МОРЕ від тривалості вторинної обробки представлена на рисунку 2.3.

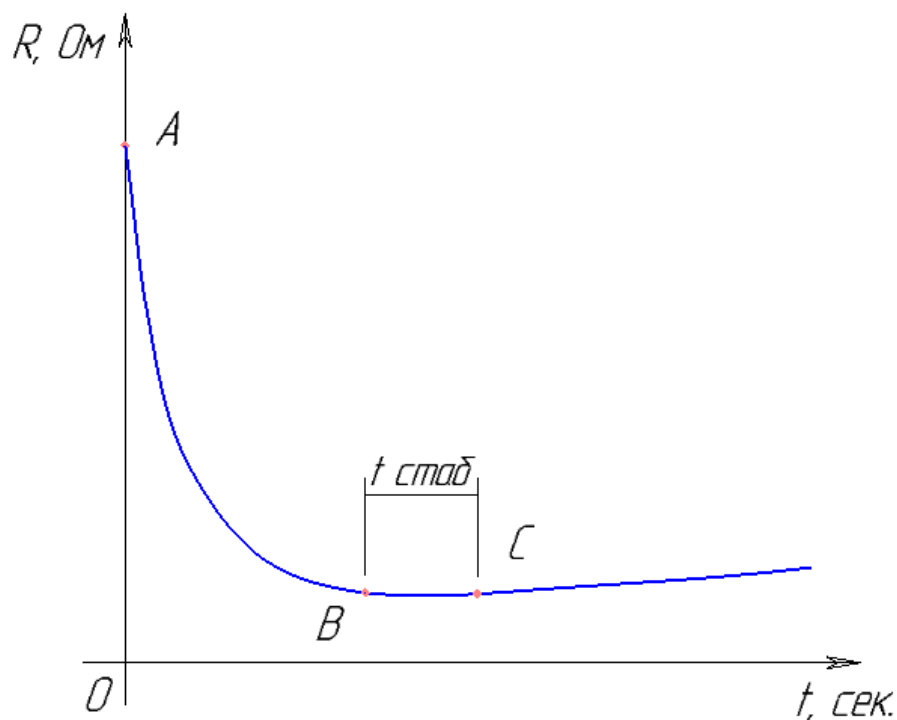


Рисунок 2.3 – Теоретична крива зміни опору системи МОРЕ від тривалості вторинної обробки.

З рисунка 2.3 видно, що у початковий час вторинної обробки (точка A) опір системи МОРЕ має максимальне значення. Цьому значенню опору буде відповідати струм I_A . Потім, як зазначалося раніше, в ході дугового електрофорезу буде витрачатись розчин-носіє CuO , а значить, зменшуватиметься опір системи МОРЕ. Коли розчин-носіє CuO буде повністю витрачений (точка B), сила струму перестане різко зростати. На деякий проміжок часу $t_{\text{стаб}}$ вона стабілізується, тобто набуде значення I_B . При цьому в період $t_{\text{стаб}}$ струм I_B приблизно дорівнює I_C , після чого, якщо не зупинити вторинну обробку, МДО покриття почне збільшувати свою товщину, а опір R почне зростати. Однак раніше вказувалося, що це не прийнятно для розробленої технології. Тому при настанні проміжку часу $t_{\text{стаб}}$ процес вторинної обробки необхідно зупинити.

Розрахувати зміну сили струму від точки А до точки В (рис. 2.3) дуже важко, через відсутність даних швидко мінливого опору R_p під час дугового електрофореzu. Однак, використовуючи формулу 2.25 з певною похибкою можна визначити мінімальний початковий струм I_A необхідний для початку вторинної обробки і струм I_B , при якому необхідно закінчити вторинну обробку. Чисельно розраховані значення I_A та I_B допоможуть контролювати процес вторинної обробки. Для визначення значення I_A необхідно знати електрофізичні параметри системи MOPE, тобто ємність C і опір R_e , R_p , R_b і R_n . ЕРС джерела живлення відома. Опір повітря R_n відомий, а опори R_e , R_p , R_b і ємність C можна виміряти за відомими методиками [3, 6]. Таким чином підставивши електрофізичні параметри системи MOPE в точці А формулу 2.25, можна теоретично розрахувати необхідний для початку вторинної обробки струм I_A .

Для визначення значення I_B необхідно враховувати, що опір R_b значно більше ніж R_p (тобто $R_b > R_p$), тобто при розчиненні розчину-носія CuO в електроліті сила струму I_B змінюватиметься незначно. Крім цього, характер і глибина заповнення пор на даній стадії досліджень нам поки не відомі, тому при розрахунках I_B зробимо наступне припущення. Приймемо, що в точці В опір R_p повністю переросте в опір R_e , так як розчин-носії CuO практично повністю розчиниться в електроліті, пористість МДО покриття і кількість розчину-носія CuO наноситься на оброблювану поверхню відрізняються на кілька порядків. Враховуючи це припущення і знаючи, скільки розчину-носія CuO було нанесено на оброблювану поверхню, можна розрахувати опір електроліту в точці В. Обчислення сили струму проводилися за допомогою програмного забезпечення «Mathcad 15».

Таким чином, рівняння (2.25), яке є моделлю для теоретичного визначення мінімального початкового струму I_A , необхідного для вторинної обробки. Отримана модель показує, що при зниженні параметрів опору розчину-носія CuO і повітря в порах сила струму необхідна для вторинної обробки буде також знижуватися і стабілізується при переході частинок нанопорошку CuO в пори

МДО покриття. При цьому опір повітря в порах МДО покриття переросте в опір електроліту в них. Причому друге буде значно нижчим від першого, тому що частинки нанопорошку CuO займуть простір в порах після впливу IP , а залишки розчину-носія розчиняться в електроліті. Після цього МДО покриття знову почне збільшувати свою товщину, що для технології, що розробляється, є неприйнятним. Отримана модель також дозволяє контролювати тривалість вторинної обробки стабілізації електричного струму I_B .

2.3. Вплив модифікування частинками нанопорошку CuO МДО покриття на коефіцієнт тертя.

Вузли тертя сучасних машин і механізмів, змащені рідкими або пластичними мастильними матеріалами, в певні моменти (пуск і зупинка; високі контактні навантаження або температури; низькі швидкості відносного переміщення деталей, що взаємодіють і т.д.) працюють в основному в режимі граничного мащення. Поверхні тертя при цьому не розділені шаром рідини, а безпосередній металевий контакт, що призводить до їх підвищеного зношування та можливого заїдання пари тертя, попереджається (або мінімізується) внаслідок утворення на робочих тертьових поверхнях граничних шарів різного походження.

Такі здібності граничних шарів як зменшення втрат на тертя, зниження зношування та запобігання заїданню в рухомих з'єднаннях деталей машин виникають з наступних причин [2]:

- тертьові поверхні поділяються під дією граничних шарів на відстані, що перевищують радіус дії адгезійних сил, що значно знижує ці сили, оскільки вони різко зменшуються при збільшенні відстані між твердими тілами;

- граничні шари мають анізотропію механічних властивостей. Найтонші граничні шари можуть не руйнуючись, витримувати великі нормальні навантаження. При цьому під дією щодо невисоких тангенційно спрямованих сил в граничних шарах відбувається зсув по площинах найкращого ковзання;

- компоненти мастильного матеріалу, взаємодіючи з поверхнею пар тертя, викликають адсорбоване пластифікування тонких поверхневих шарів, вибіркове розчинення деяких складових поверхневого шару металу і перенесення їх на поверхню у відповідь, що також знижує зсувну міцність поверхневих шарів.

У нашому випадку ми вважаємо, що завдяки вищевказаним явищам при граничному мащенні зсувні деформації утворюватимуться в граничному шарі, утвореному Cu між поверхнями, що взаємодіють при терті. Утворенню такого граничного шару сприятиме приробіток робочих поверхонь, при якій на робочих поверхнях деталей матиме місце деяке зношування, у тому числі і на деталях з модифікованим МДО покриттям. Тоді Cu , що міститься в порах МДО покриття, поступово потраплятиме в зону контакту тертьових поверхонь і буде виступати в ролі твердого мастильного матеріалу. Звідси ми отримаємо граничний шар - «третє тіло» із Cu , який буде запобігати від руйнування поверхневі шари взаємодіючих деталей, а низька зсувна міцність граничного шару забезпечить відносно малі втрати на тертя. Даний спосіб доставки твердого мастильного матеріалу в зону тертя схожий з ротапринтним методом нанесення твердих мастил.

Після появи третього тіла в зоні тертя двох деталей ми отримаємо 2 варіанти контакту: «сталь – МДО покриття» і «сталь - Cu – МДО покриття». Сила тертя F у нашому випадку буде підпорядковуватися моделі Боудена і Тейбора, тобто, вона складатиметься з опору зрізу адгезійних зв'язків на ділянці контакту «сталь - чисте МДО покриття» та опору зсуву твердого мастильного матеріалу на решті площі контакту.

$$F = A \cdot [\alpha \cdot \tau_m + (1 - \alpha) \cdot \tau_{cm}], \text{ Н} \quad (2.26)$$

де A – сумарна площа контакту, яка несе навантаження;

α – частка контакту «сталь – МДО покриття»

τ_m і τ_{cm} – питомі зсувні опори відповідно на ділянці «сталь - чисте МДО покриття» та на ділянці зайнятій Cu .

У нашому випадку вираз $(1 - \alpha)$ у формулі 2.26 по суті виражає площу контакту деталей через твердий мастильний матеріал, який на пряму залежить від процентного вмісту Cu на поверхні модифікованого МДО покриття. Тоді, згідно з формулою 2.26, можна зробити висновок про те, що зі збільшенням вмісту Cu на поверхні МДО покриття сила тертя між робочими поверхнями деталей знижуватиметься, оскільки площа контакту через твердий мастильний матеріал зростатиме.

Можна також припустити, що коефіцієнт тертя до припрацювання (утворення граничного шару) між з'єднанням «сталь – МДО покриття модифіковане CuO » буде вищим, ніж між парою тертя «сталь – МДО покриття». Це пояснити тим, що пори МДО покриття заповнені кристалами Cu і оксиду кремнію, тобто, після модифікування шорсткість зміцненого шару збільшиться.

Слід зазначити, що граничний шар утворюється після опрацювання робочих поверхонь деталей рухомого з'єднання. Тому під час припрацювання за рахунок виборчого (фрикційного) перенесення частинок міді з однієї поверхні на іншу буде збільшуватися площа контакту «сталь - Cu – МДО покриття». Тобто, як описувалося раніше, відбудеться утворення третього тіла при терті, яке матиме менший зсувний опір, ніж матеріали серійних виробів. Отже, відбуватиметься зниження коефіцієнта тертя і зв'язна зміна мікрогеометрії між взаємодіючими поверхнями. Цей процес відбуватиметься до настання рівноважної шорсткості [4, 7].

Певний теоретичний інтерес представлятиме розкладання коефіцієнта тертя на величини молекулярної та механічної його складових між робочими поверхнями деталей рухомого з'єднання. Детальне розкладання даних складових дозволить описати та виявити закономірності зміни властивостей МДО покриттів після їх модифікування частинками нанопорошку CuO .

Нині загальноновизнаною є молекулярно-механічна теорія тертя, основні тези якої розроблено І.В. Крагельським та його учнями. Виходячи з уявлень про дискретну структуру контакту, він запропонував розрахувати сили тертя

шляхом підсумовування опорів, що виникають від молекулярної та механічної взаємодії на окремих поверхнях контакту [47]:

$$F = \tau_{\text{мол}} A_{\text{мол}} + \tau_{\text{мех}} A_{\text{мех}}, \quad (2.27)$$

де $\tau_{\text{мол}}$, $\tau_{\text{мех}}$ – питомі молекулярні та механічні взаємодії або сили тертя;

$A_{\text{мол}}$, $A_{\text{мех}}$ – фактична площа молекулярних та механічних контактів.

Отже, загальний коефіцієнт тертя f складається з молекулярної складової та механічної складової [4]:

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{мех}}. \quad (2.28)$$

Після припрацювання механічна частина загального коефіцієнта тертя з'єднання «сталь - МДО покриття модифіковане CuO» буде зведена до мінімуму, і тертя між цими поверхнями набуде іншого вигляду. Воно більшою мірою, буде зводитися до подолання сил зварювання, що витрачаються на зріз містків усередині м'якшого матеріалу, тобто утвореного «третього тіла» [4].

Загальний вид молекулярної складової сили тертя [4]:

$$T_a = \tau_0 A_r + \beta N, \quad (2.29)$$

де τ_0 , β – константи (визначаються експериментальним шляхом), що залежать від природи взаємодії між твердими тілами;

A_r – площа фрикційного зв'язку;

N – навантаження, що сприймається фрикційним зв'язком.

Тоді молекулярна складова коефіцієнта тертя набуде вигляду:

$$f_{\text{молі}} = \frac{\tau_0}{\delta_{\text{ті}}} + \beta, \quad (2.30)$$

де $\delta_{\text{ті}}$ – середня нормальна напруга на фрикційному зв'язку.

З формули (2.30) видно, що молекулярна складова коефіцієнта тертя безпосередньо залежить від τ_0 - міцності тіла на зсув β - коефіцієнта, що характеризує збільшення дотичних напруг (міцності на зсув) від нормального тиску. Таким чином, додаючи в зону тертя Cu, яка має нижчу міцність на зсув ніж сталь, змінюється характер взаємодії між поверхнями деталей, що взаємодіють. Тим самим зменшуються обидві складові коефіцієнта тертя. Ми

вважаємо, що більшою мірою має зменшитись механічна складова коефіцієнта тертя, а молекулярна зменшиться незначно.

Для підтвердження цих припущень необхідно визначити складові коефіцієнта тертя до і після припрацювання. Аналіз літературних джерел [2, 4] дозволяє дійти невтішного висновку у тому, що величину молекулярної складової коефіцієнта тертя можна оцінити за допомогою трибометрів (кулькових, роликів). Використання кулькових трибометрів обумовлено такими міркуваннями:

- забезпечення високої контактної напруги при порівняно малих навантаженнях;
- усунення можливих похибок при перекосі, що виникає при обертанні;
- отримані пластичні відбитки мають сферичну форму і залишаються незмінними при обертанні індентора.

Визначення молекулярної складової коефіцієнта тертя дозволить підтвердити наші припущення про зниження сили тертя у досліджуваній парі тертя рухомого з'єднання «сталь – МДО покриття модифіковане CuO ».

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.

3.1. Програма дослідження.

Програмою дослідження передбачалося: вивчити закономірності формування та властивості зміцнювальних МДО покриттів, модифікованих нанопорошком CuO ; провести теоретичні та експериментальні дослідження з виявлення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей відновлених та зміцнених даними покриттями деталей; розробити практичні рекомендації для впровадження пропонованої комбінованої технології у виробництво та виконати її економічну оцінку.

На схемі рис. 3.1 представлено програму експериментальних досліджень.



Рисунок 3.1 – Програма експериментальних досліджень

3.2. Обладнання та матеріали для формування МДО покриттів та модифікування зміцненого шару.

Для формування МДО покриттів використовували експериментальну установку, що знаходиться на кафедрі експлуатації та ремонту машин. У

пристрій даної установки входять: джерело живлення (рис. 3.2 а); електролітична ванна, яка має систему кріплення зразків та водяну систему охолодження (рис. 3.2, б). Установка працює від мережі напругою 380 В на змінному електричному струмі промислової частоти 50 Гц. Вона забезпечує анодно-катодне формування МДО покриттів із співвідношенням амплітуд катодного та анодного струмів $I_K/I_A=1,0$.

Під час досліджень використовувалися зразки, виготовлені з ливарного алюмінієвого сплаву АК7ч ДСТУ 2839-94.

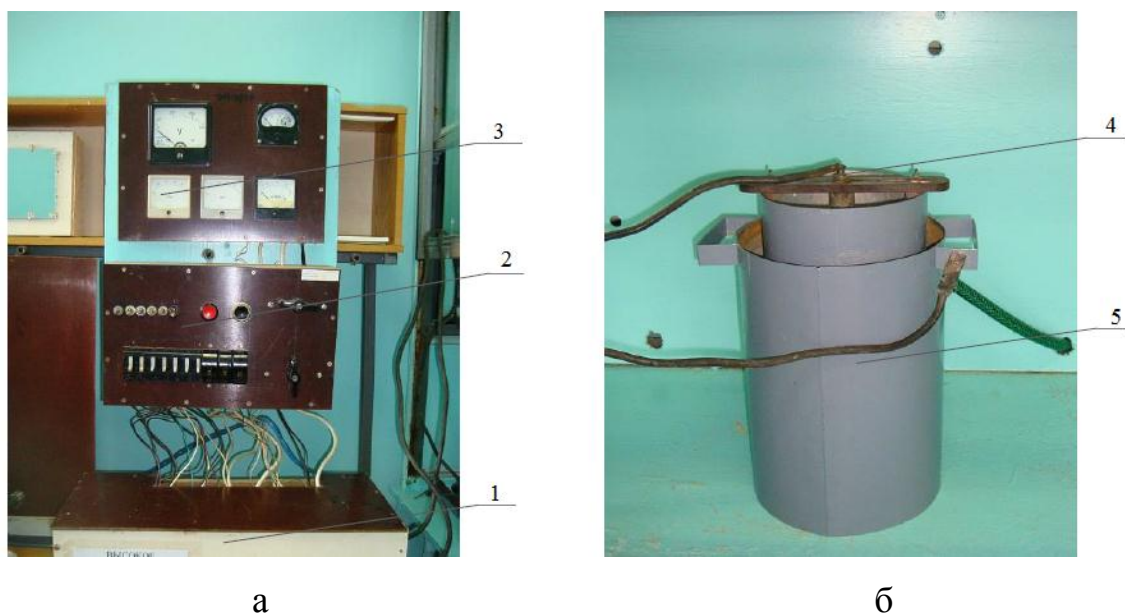


Рисунок 3.2 – Загальний вид джерела живлення (а), електролітичної ванни (б) експериментальної установки для МДО: 1 – силовий блок; 2 – блок управління; 3 – блок вимірювання електричних режимів МДО; 4 – підвіска для зразків; 5 - електролітична ванна.

МДО покриття отримували електрохімічним шляхом у ванні циліндричної форми (рис. 3.2 б), яка виготовлена з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, вона розрахована на 10 літрів електроліту. В ході досліджень використовували електроліт, на основі дистильованої води з додаванням гідроксиду калію КОН ДСТУ 3651-97 і рідкого натрієвого скла Na_2SiO_3 ДСТУ 13078-81 з щільністю $\rho=1,47 \cdot 10^3$ кг/м³ і модулем 3,0. Регулювання температури електроліту в процесі МДО здійснювали проточною водопровідною водою охолодження

електролітичної ванни, що подається в систему. У процесі МДО здійснювали повітряне барботування електроліту, цим перемішували його за допомогою мікрокомпресора. Закріплення зразка на струмоведучій підвісці здійснювали за допомогою різьбового з'єднання.

На основі аналізу літературних даних [3, 5, 7] були підібрані найбільш придатні для досліджуваного сплаву АК7ч склад електроліту та режими МДО. Щільність струму при оксидуванні становила 25 А/дм². Її вибір заснований на тому, що при такій щільності струму динаміка зростання товщини МДО покриття найбільш висока і незначно збільшується пористість зміцненого шару [36, 56, 119]. Для оксидування сплаву АК7ч вміст КОН у складі електроліту має бути від 1 г/л до 3 г/л [3, 5, 7]. При збільшенні вмісту вище рекомендованого значення товщина МДО покриття зменшується при незначній зміні мікротвердості зміцненого шару. Аналіз технічного стану деталей показав, що зношування поршня на бік не перевищує 60 мкм. Тому для компенсації такого зносу за рахунок товщини МДО покриття вміст в електроліті КОН повинен становити 2 г/л [3, 5-7]. Вміст в електроліті Na₂SiO₃ рекомендується від 8 г/л до 16 г/л. Однак при збільшенні вмісту вище 12 г/л спостерігається зниження мікротвердості зміцненого шару [4, 6-7]. Тому ми зупинили свій вибір на рекомендаціях джерел [4, 6-7] та вміст Na₂SiO₃ в електроліті під час проведення експериментів становило 10 г/л. Температура електроліту змінювалася в інтервалі 20...40 °С, який використовувався для штучної зміни пористості МДО покриття [3]. Тривалість оксидування до повного формування МДО покриття була визначена експериментальним шляхом та становила 80...90 хв. Надалі склад електроліту при первинній обробці не змінювався. МДО покриття формували на торцевій поверхні зразків (рис. 3.12).

Дозування хімічних компонентів електроліту проводили на лабораторних терезах ВЛКТ-500, похибкою при зважуванні не більше 0,02 г. Свіжоприготовлений електроліт опрацьовували протягом 0,5 години перед початком експериментів. Для виключення можливості впливу збіднення електроліту на властивості МДО покриттів, що формуються, після кожного

досвіду змінювали використаний електроліт на свіжий, з подальшим його опрацюванням.

Після МДО з оксидованої поверхні зразка знімали пухкий технологічний шар і шліфували його до шорсткості, що відповідає оригінальній деталі ($R_a=0,32...0,63$). Потім на зміцнену поверхню наносили підготовлений розчин-носієй із нанопорошком CuO . Він містив дистильовану воду, рідке натрієве скло Na_2SiO_3 ДСТУ 13078-81 і нанопорошок оксиду міді з фракцією частинок від 80 до 100 нм за ДСТУ 4960:2019. Пропорції компонентів розчину-носія були такі: три частини по масі рідкого скла Na_2SiO_3 , три частини по масі дистильована вода, 1 частина нанопорошку CuO . Далі, після застигання розчину-носія проводили вторинну обробку досліджуваної поверхні зразка.

Модифікування МДО покриття при вторинній обробці дуговим електрофорезом здійснювали на наступних режимах: щільність струму - 25 A/dm^2 ; тривалість вторинної обробки – 0,5...2 хв.; температура електроліту - 15...20 °С. Зміст компонентів електроліту варіювався в інтервалі: КОН - 0,5...2 г/л; Na_2SiO_3 - 2...10 г/л. Даний інтервал заснований на тому, що концентрація компонентів електроліту для вторинної обробки МДО покриття повинна бути суттєво нижчою, ніж при первинній обробці, оскільки не потрібно нарощування зміцненого шару. Після вторинної обробки зразок піддавався повторному шліфуванню та проведенню подальших досліджень.

3.3. Оцінка працездатності електроліту для формування МДО покриття.

Оцінку працездатності електроліту проводили з урахуванням зміни його кислотності. Визначення кислотності електроліту здійснювали лабораторним рН-метром-мілівольтметром моделі рН-121. Тривалість роботи електроліту вимірювали в А·г/л, при цьому враховували вплив площі зміцнюючи зразків і об'єм електроліту на його збіднення. Ця оцінка проводилася лише за первинної обробки. При вторинній обробці компоненти розчину-носія частково переходять у електроліт. У зв'язку з тим, що після вторинної обробки в

електроліті буде збільшуватися вміст Na_2SiO_3 , тому для кожного наступного модифікування МДО покриття необхідно його замінювати.

3.4. Зміна товщини МДО покриття.

Товщину МДО покриттів визначали за допомогою вихрострумового товщиноміра ВТ-201 (рис. 3.3) за ДСТУ ISO 1463:2015. Показники товщини МДО покриття знімали з цифрового індикатора приладу ВТ-201 після установки датчика на досліджуваний зразок. За товщину приймали середнє значення з 10 вимірів. Лінійні розміри зразків з МДО покриттям та без нього визначали мікрометром МК-25 ISO 9001:2018.



Рисунок 3.3 – Товщиномір вихрострумовий ВТ-201

3.5. Визначення мікротвердості МДО покриття.

Мікротвердість у HV вимірювали за ДСТУ ISO 6507-1:2007 на комп'ютеризованому мікротвердомірі ПМТ-3М-01 (рис. 3.4) при навантаженні на індентор 1,96 Н. Похибка вимірювання контрольного відбитка становила не більше 0,3 мкм.



Рисунок 3.4 – Загальний вид комп'ютеризованого мікротвердоміра ПМТ-3М-01

Вимірювання мікротвердості проводили на поперечних шліфах зразків (рис. 3.12, а) по товщині отриманих МДО покриттів. Щоб отримати поперечні шліфи, ми розрізали зразки на дві половини і обробляли, згідно з рекомендаціями [3]. Крім цього, визначення мікротвердості здійснювали вдавлуванням алмазної піраміди перпендикулярно досліджуваній поверхні МДО покриття. Перед вимірюваннями проводили шліфування зразків наждачним папером типу Л2Е320×250П215А15-НМА ДСТУ 6456-98 до видалення пухкого (технологічного) шару МДО покриття, а потім полірували. Числове значення мікротвердості визначали за допомогою спеціалізованої програми, через відео пристрій під'єднаний до ПК мікротвердоміра.

3.6. Визначення наскрізної пористості МДО покриттів.

Для визначення наскрізної пористості використовували метод кольорової дефектоскопії [3, 6]. Після оксидування видаляли пухкий (технологічний шар) МДО покриття зразків (рис. 3.12 а). Потім їх промивали в холодній проточній воді, після чого занурювали на 30 с в теплий (35...40 °С) розчин їдкого натру (20 г/л) і на 1 хвилину в розчин освітлення (азотна і плавикова кислоти у співвідношенні 1:1). Для того щоб пофарбувати пори зразки поміщали на 5 хвилин в розчин, що містить 20 г/л сірчаноокислої міді і 20 мл/л соляної кислоти. Після промивання і сушіння зразки з пофарбованими порами у вигляді міді, що виділилася на зміцненому шарі досліджували під мікроскопом ×20. Наскрізна пористість МДО покриттів визначалася з відсоткового відношення площі пофарбованих місць до площі дослідної ділянки.

3.7. Визначення вмісту міді на поверхні МДО покриттів.

Вміст міді (Cu) на поверхні зразка з МДО покриттям визначали на багатоканальному рентгенівському спектрометрі Simultix 15 (рис. 3.5).

Метод РФА (рентгенофлуоресцентний аналіз) створений на залежності інтенсивності характеристичних ліній флуоресценції елемента від його масової частки в пробі. Характеристичне випромінювання елементів, що збуджується

первинним рентгенівським випромінюванням елементів у пробі, розкладається в спектр з подальшим вимірюванням інтенсивності сигналу і визначенням масової частки елемента за допомогою градуювального графіка, побудованого від проб з відомим вмістом елементів.



Рисунок 3.5 – Загальний вид багатоканального рентгенівського спектрометра
Simultix 15

Вимірювання проводилися в режимі рентгенівської трубки $U_a=30$ кВ, $I_a=30$ мА, $T_{\text{експ}}=40$ секунд, з опромінюючої поверхні зразків діаметром 35 мм. Визначення змісту Сі проводили за градуванням щодо стандартних зразків.

3.8. Визначення коефіцієнта тертя і його молекулярної складової в рухомих з'єднаннях з МДО покриттям.

Дослідження проводилися на установці схема якої зображена на рис. 3.6.

Вимірювальна частина системи складається з аналізатора спектра типу А17-Т8, вхідні канали якого з'єднані з контуром тензометричним, а вихідні - з персональним комп'ютером. Прилад А17-Т8 має 8 вимірювальних каналів. Він забезпечує реєстрацію та аналіз сигналів з кожного каналу одночасно в діапазоні від 0,1 до 10 кГц. Аналізатор спектру оснащений вбудованим генератором, що дозволяє формувати сигнали спеціальної чи довільної форми. Тензометричний контур зібраний за 6-ти провідною мостовою схемою. Дана схема дозволяє проводити необхідні вимірювання без тензометричного підсилювача.

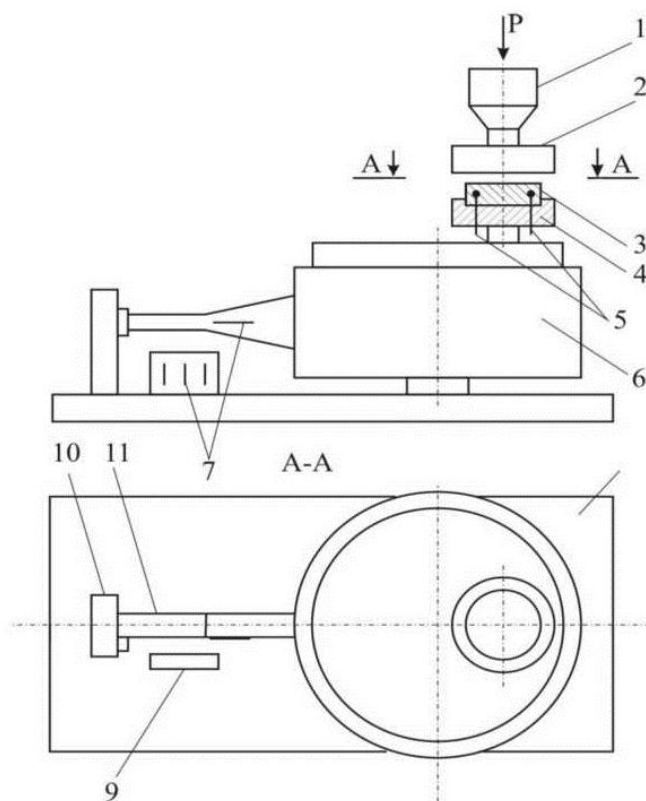


Рисунок 3.6 – Принципова схема установки для визначення коефіцієнта тертя та його молекулярної складової: 1 – патрон свердлильного верстата; 2 – контр тіло; 3 – зразок; 4 – тримач зразка; 5 – термопари; 6 – барабан; 7 – тензорезистори; 8 – основа; 9 – пластина компенсаційних датчиків; 10 – упор, 11 – тензобалка, P – осьове навантаження.

Для функціонування системи необхідно використовувати два вхідні канали аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) аналізатора спектра. Перший канал (вхід 1 АЦП) служить для вимірювання напруги збудження $U_{\text{воз}} = U_{\text{ген}} + U_{\text{пом}}$, що складається з $U_{\text{ген}}$ – напруги вбудованого генератора і $U_{\text{пом}}$ – напруги перешкод, наведеного будь-яким зовнішнім джерелом. Другий канал (вхід 2 АЦП) необхідний для виміру суми $U_{\text{сум}}$ безпосередньо на вимірювальній частині моста $U_{\text{сум}} = U_{\text{ген}} + U_{\text{пом}} + U_{\text{вим}}$.

Різниця між значеннями $U_{\text{сум}}$ і $U_{\text{воз}}$ є $U_{\text{вим}}$ – вимірювальний сигнал. Дані з аналізатора спектра за допомогою шини USB 2.0 передаються на ПК, що разом із застосуванням програмного комплексу ZetLab забезпечує необхідну точність вимірювання.

Загальна похибка вимірювання:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (3.1)$$

де часто зустрічаються похибки:

$\Delta_1=1\%$ – дрітаних тензорезисторів;

$\Delta_2=1\%$ – з'єднуючих дротів;

$\Delta_3=1\%$ – аналізатора спектра;

$\Delta_4=1,5\%$ – обробки осцилограм.

Таким чином, загальна похибка щодо коефіцієнта тертя $K_{тр}$ склала:

$$\Delta=2,5\%.$$

Тарування вимірювального вузла (тензобалки з дрітаним тензорезистором) проводилося з використанням аналізатора спектра А17-Т8, з'єданого з ПК. Воно проводилося на початку експериментів і після їх завершення. На рис. 3.7 наведена характеристика тарування, що відображає лінійну залежність сигналу вимірювання $U_{вим}$ від прикладеного навантаження F . Загальний вигляд і тарування установки представлені на рис. 3.8.

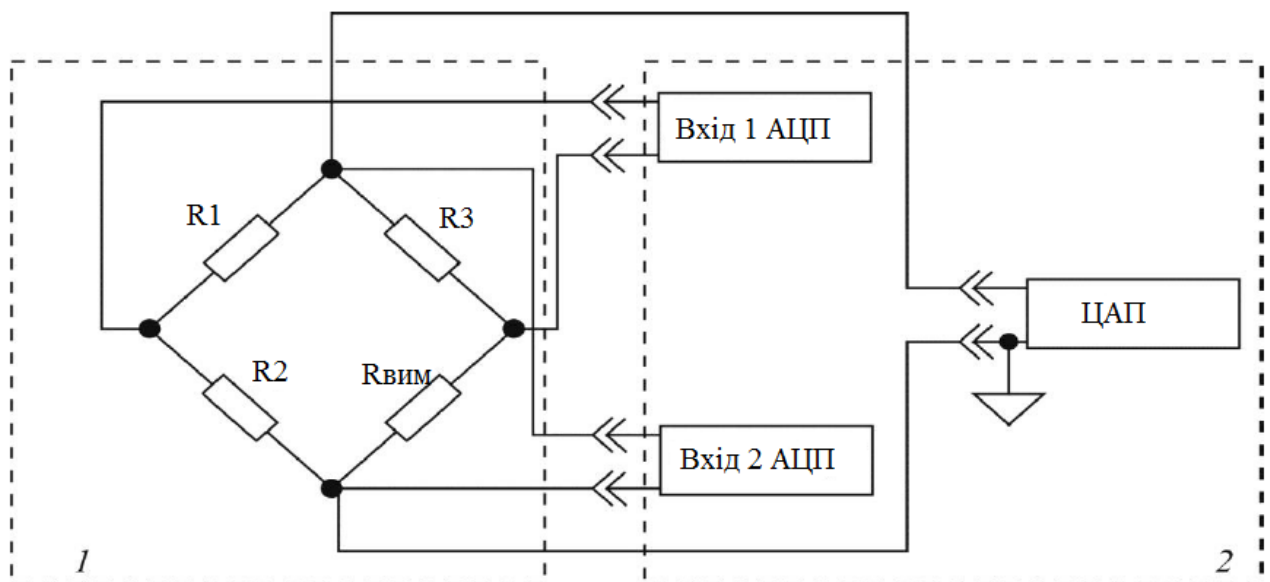


Рисунок 3.7 – Тарувальна характеристика: 1 – тензометричний вимірювальний контур, 2 – аналізатор спектру.



а



б

Рисунок 3.8 – Загальний вигляд установки (а) і тарування тензобалки (б)

Послідовність проведення експерименту.

1. Тарування тензобалки.
2. Очищення робочих поверхонь зразків та контртіла.
3. Установка зразків у тримач та контртіла у патрон свердлильного верстата.
4. Навантаження вертикальною силою.
5. Витримка зразків (зразка) та контртіла під навантаженням.
6. Увімкнення двигуна електроприводу шпинделя верстата через напівпровідниковий перетворювач частоти виробництва «Веспер».
7. При повороті контртіла на 180 °С двигун вимикається.
8. Здійснюється вилучення зразків (зразка) з утримувача (попередньо піднявши контртіло).
9. Проводиться повторне тарування тензобалки.

Під час проведення пунктів 5 - 7 проводиться запис зусилля з тензобалки на ПК. Перед випробуванням з мастильним матеріалом (індустріальна олія) знежирені зразки витримуються в мастилі 10 - 20 хвилин. При повороті

індентора щодо початкового становища на 30 °C, 90 °C, 180 °C і більше, сила, що необхідна для обертання залишається практично незмінною [6]. Тому під час проведення експериментів обмежувалися кутом повороту трохи більше 180°C.

У ролі індентора щодо молекулярних складових коефіцієнта тертя було прийнято кульку зі сталі ШХ15. Цей вибір був зроблений відповідно до ДСТУ 13791:2008. Він включає «метод визначення міцності адгезійного (молекулярного) зв'язку твердих тіл при терті». Даний метод визначає вимірювання молекулярної складової коефіцієнта тертя між зразками, що виготовляються з однакового матеріалу. Однак у нашому випадку тертя йде між двома тілами із різних матеріалів. Тому під час проведення досліджень ми ґрунтувалися на загальноприйнятих методиках [4, 5-7], а не на ДСТУ 13791:2008.

3.9. Планування експерименту по оптимізації режимів модифікування МДО покриття частинами нанопорошку CuO.

Для найбільшого зниження коефіцієнта тертя у поєднанні нам знадобиться максимально можлива присутність міді у просторі між взаємодіючими поверхнями. Тому як математичну модель, що описує залежність коефіцієнта тертя в рухомому з'єднанні: «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO» від факторів, що впливають, нами була обрана статистична регресійна модель. Для отримання адекватної моделі було поставлено та проведено повний 2-рівневий 3-факторний експеримент [6]. За параметр оптимізації Y прийняли коефіцієнт тертя після 10 годин випробувань під навантаженням 2 МПа та швидкістю ковзання поверхні контрзразків поверхнею зразка - 1м/с. На підставі проведених досліджень та аналізу наукової літератури [7] як основні фактори, що впливають на коефіцієнт тертя, були обрані наступні:

X_1 – пористість МДО покриття, після первинної обробки, %;

X_2 – тривалість вторинної обробки, сек.;

X_3 - вміст Na_2SiO_3 в розчині-носія, г/л.

Вибір рівнів та інтервалів варіювання факторів здійснювали на підставі результатів попередніх досліджень (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Інтервали та рівні варіювання факторів.

Найменування факторів	Позначення	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		нижній	основний	верхній	
Наскрізна пористість, %	X_1	4	8	12	4
Тривалість вторинної обробки, с.	X_2	20	40	60	20
Вміст Na_2SiO_3 в розчині-носії, г/л.	X_3	300	500	700	200

Щоб побудувати стандартну матрицю планування експерименту, натуральні значення рівнів факторів переводили в кодові безрозмірні величини (кодували) за формулою кодування джерела [7]:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.2)$$

де X_i – кодове значення i -го фактору;

x_i – натуральне поточне значення i -го фактору;

x_{i0} – основний рівень фактору;

Δx_i – інтервал (напівінтервал) варіювання i -го фактору.

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\text{MAX}} - x_{i\text{MIN}}}{2}, \quad (3.3)$$

де $x_{i\text{MAX}}$ і $x_{i\text{MIN}}$ – відповідно, натуральні значення верхнього і нижнього рівнів варіювання i -го фактора.

Для нижнього та верхнього рівнів кодовані значення факторів варіювання розраховані за формулою (3.2) відповідно дорівнюють: $X_i^{\text{HP}} = -1$; $X_i^{\text{BP}} = 1$.

У таблиці 3.2 представлено матрицю планування експерименту.

Для експерименту рівняння регресії, яке характеризує вплив трьох чинників (X_1 , X_2 , X_3) на коефіцієнт тертя (Y), можна виразити в вигляді математичного рівняння першого порядку [7]:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3.4)$$

Визначення дисперсії паралельних дослідів здійснювали по формулі [7]:

$$S_U^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{v=1}^n (y_{UV} - y_{UC})^2, \quad (3.5)$$

де n – кількість паралельних дослідів, приймаємо мінімально можливу кількість $n=2$ [7];

y_{UV} – параметр оптимізації одного із паралельних досліджень;

- середнє значення параметра оптимізації по паралельним дослідженням.

Оцінку однорідності дисперсій паралельних досліджень проводили по критерію Кохрена [7]:

$$G_p = \frac{S_{UMAX}^2}{\sum_{U=1}^N S_U^2}, \quad (3.6)$$

де N – кількість незалежних досліджень ($N=8$, таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 Матриця планування експерименту.

№ дослідів	Пористість МДО покриття, X_1	Тривалість вторинної обробки, X_2	Зміст Na_2SiO_3 , X_3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	+1	-1	-1
5	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

Розрахунковий критерій G_p порівнювали з його табличним значенням $G_{ТАБЛ}$, які були визначені відповідно до ступенів свободи: чисельника $f_1=n-1$, знаменника $f_2=N$ при обраному рівні значущості $\alpha=0,05$ [7]. Якщо $G_p \leq G_{ТАБЛ}$ то гіпотеза про однорідність дисперсій паралельних досліджень приймається і потім розраховується дисперсія відтворюваності [7]:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{U=1}^N S_U^2. \quad (3.7)$$

Визначення похибки експерименту проводили по формулі:

$$S(y) = \sqrt{S^2(y)}. \quad (3.8)$$

Коефіцієнти рівняння регресії (3.3) визначали з використанням залежностей [2, 20]:

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N X_0 \cdot y_{UC}}{N}, \quad b_i = \frac{\sum_{U=1}^N X_i \cdot y_{UC}}{N}, \quad (3.9)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{U=1}^N X_i \cdot X_j \cdot y_{UC}}{N}, \quad b_{ijk} = \frac{\sum_{U=1}^N X_i \cdot X_j \cdot X_k \cdot y_{UC}}{N}. \quad (3.10)$$

За допомогою t-критерію (критерію Стюдента) здійснювалася перевірка статистичної значущості коефіцієнтів рівняння (3.4) [20, 23]:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{S(b_0)}, \quad t_i = \frac{|b_i|}{S(b_i)}, \quad t_{ij} = \frac{|b_{ij}|}{S(b_{ij})}, \quad t_{ijk} = \frac{|b_{ijk}|}{S(b_{ijk})}, \quad (3.11)$$

де $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}$ – коефіцієнт рівняння регресії;

$S(b_0), S(b_i), S(b_{ij}), S(b_{ijk})$, – помилки коефіцієнтів рівняння регресії.

$$S(b_0) = S(b_i) = S(b_{ij}) = S(b_{ijk}) = \frac{S(y)}{\sqrt{N \cdot n}}. \quad (3.12)$$

Значення t-критеріїв, обчислені за формулами (3.11), порівнювали їх з табличними значеннями. Їх визначення здійснювали з урахуванням числа ступенів свободи $f_3 = N(n-1)$ та рівня значущості $\alpha = 0,05$. Статистично значущими коефіцієнти рівняння регресії вважали у разі, якщо розрахункове значення t-критерію вище його табличного значення [7]. Якщо одне із коефіцієнтів рівняння регресії виявлявся статистично незначимим, він не враховувався без перерахування інших коефіцієнтів. Потім рівняння (3.4) представляли як рівняння регресії з чинниками та його взаємодіями, які мають лише значні коефіцієнти. Оцінку адекватності моделі проводили за допомогою F-критерію (критерію Фішера) [7]:

$$F_p = \frac{S_{AD}^2}{S^2(y)}, \quad (3.13)$$

де S_{AD}^2 - дисперсія адекватності.

$$S_{AD}^2 = \frac{n}{N - \lambda} \cdot \sum_{U=1}^N (y_{UC} - y_{UP})^2, \quad (3.14)$$

де λ – кількість значущих коефіцієнтів рівняння регресії;

y_{UP} – розрахункове значення параметра оптимізації, який отриманий з використанням рівняння регресії.

Критерій F_p порівнювали з його табличним значенням $F_{ТАБЛ}$, яке вибрали відповідно до прийнятого рівня значимості $\alpha=0,05$ і числом ступенів свободи $f_{АД}=N-\lambda$, $f_E=N(n-1)$. Якщо $F_p \leq F_{ТАБЛ}$ то гіпотеза про адекватність моделі приймалася [3, 7]. Потім отримана модель підлягала подальшому аналізу.

3.10. Порівняльна зносостійкість рухомих з'єднань.

Дослідження порівняльної зносостійкості поверхонь зразків проводили за ДСТУ ISO 6508-1:2013 на машині тертя МТУ-01 (ТУ 4271-001 290346000) (рис. 3.9). Спосіб випробувань визначає взаємне переміщення притиснутих один до одного досліджуваних зразків. Переміщення відбувається у мастильному матеріалі під певним навантаженням. Схема контакту (рис. 3.10): торці трьох роликів, що обертаються (контрзразки) і нерухомого диска (зразка з МДО покриттям).

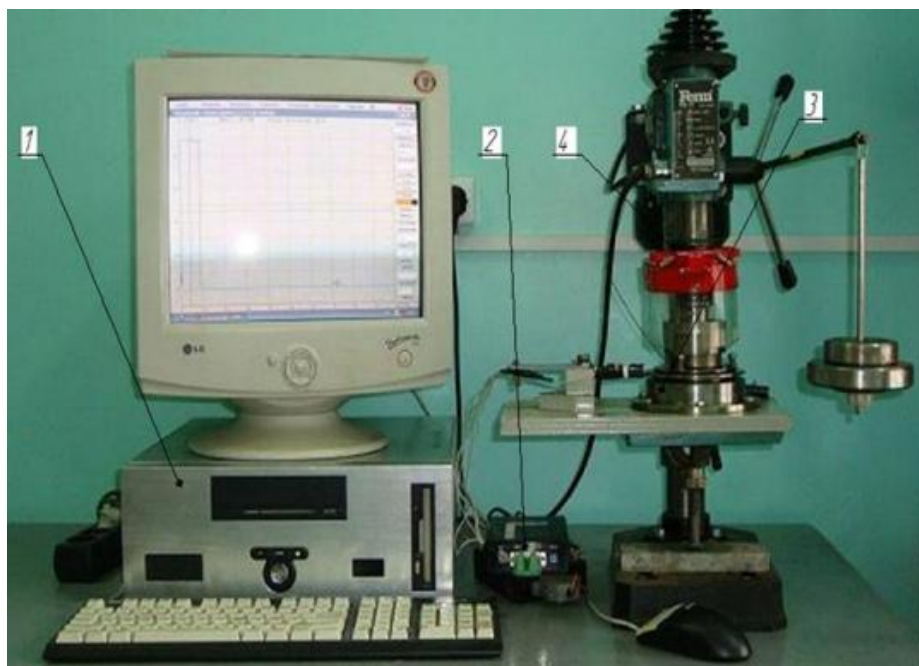


Рисунок 3.9 – Загальний вид універсальної машини тертя МТУ-01: 1 – ПК; 2 – попередній підсилювач і модуль АЦП; 3 – тензодатчик; 4 – досліджуване з'єднання.

Випробовувалися такі рухливі сполуки: «сталь 40Х – МДО покриття», «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO ».

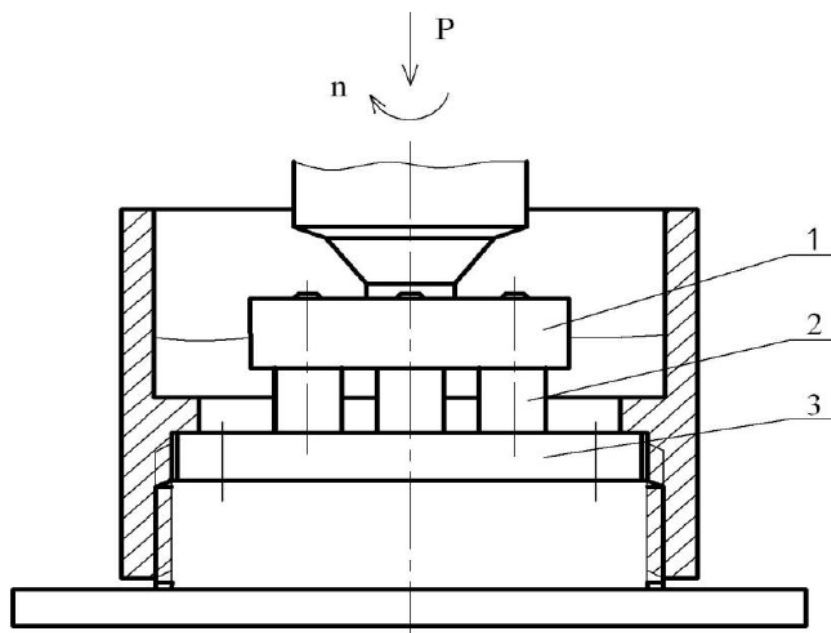


Рисунок 3.10 - Схема контакту зразків які випробовувалися на машині тертя МТУ-01: 1 - оправка для контрзразків; 2 - контрзразок; 3 – зразок.

Матеріал для виготовлення контрзразків - сталь 40Х ДСТУ 7806, твердістю HRC 50...55 та шорсткістю робочої поверхні $R_a=0,32$ мкм (рис. 3.10, поз. 2).

Матеріал для виготовлення зразків (рис. 3.10, поз. 3) - сплав АК7ч. Формування оксидокерамічних покриттів способом МДО здійснювали на торцевій поверхні зразків, потім шліфували їх до видалення пухкого шару і шорсткості $R_a=0,32...0,63$ мкм. Пористість МДО покриттів змінювали, варіюючи температурою електроліту. Потім поверхню МДО покриття з пористістю 12 % наносили розчин-носії і висушували його. Потім, використовуючи спосіб дугового електрофореzu, частки нанопорошку CuO включали до складу МДО покриттів. Вибір матеріалів ґрунтувався на тому, що вони широко використовуються для виготовлення деталей гідроциліндрів, а також різних корпусних та інших деталей сільськогосподарської техніки. Надалі для чистоти експерименту матеріал для виготовлення зразків не змінювали.

Дослідження проводили в такий спосіб. На початку проводили припрацювання випробуваних з'єднань, при поступовій зміні навантаження від 20 до 200 Н з інтервалом 20 Н. Закінчення припрацювання фіксували по стабілізації сили тертя в зоні контакту зразка з контрзразками. Контроль сили тертя здійснювали за допомогою тензодатчика (рис. 3.9, поз. 3). Припрацювання проводили з використанням індустріального мастила - 20 ДСТУ 4226:2003.

Випробування зразків на зношування тривало 50 годин, при цьому контактний тиск становив 2 МПа, а швидкість ковзання 1,0 м/с, дані параметри обрані відповідно до ДСТУ 3455.1-96. Випробування проводили в мастильному середовищі - індустріальне мастило - 20 по ДСТУ 4226:2003. Сумарний знос зразків і контрзразків за масою визначали зважуванням на лабораторних терезах ТЕХНО ВАГИ (рис. 3.11), з похибкою не більше 0,002 г.



Рисунок 3.11 – Загальний вигляд лабораторних терезів ТЕХНО ВАГИ

Перед зважуванням на вагах зразок і контрзразки (рис. 3.12 позиції а і б відповідно) ретельно промивали протягом 15 хвилин в бензолі, після цього висушували протягом 40 хвилин в сушильній шафі СНОЛ-16, при цьому температура повітря в ньому становила 60...70 °С. Потім їх охолоджували протягом 30 хвилин ексікаторі. Контроль зношування здійснювали через кожні 10 годин проведених випробувань. За еталон порівняння приймалося рухоме з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття».

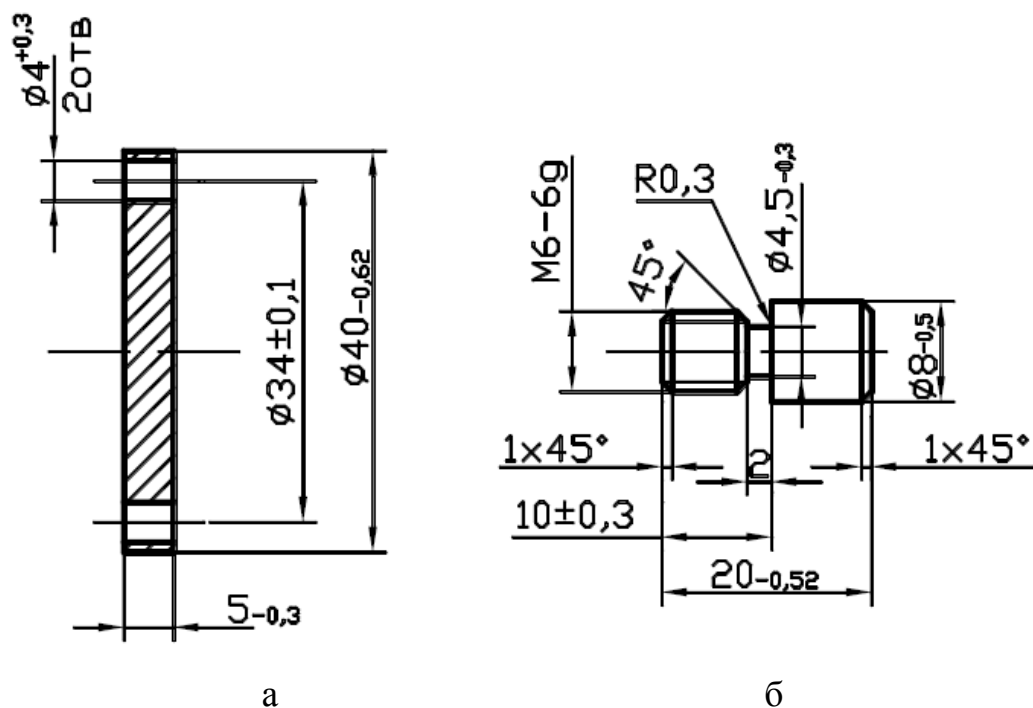


Рисунок 3.12 - Загальний вид зразка (а) та контрзразка (б) для дослідження рухомих сполук.

Швидкість зношування рухомого з'єднання визначали виходячи з формули:

$$V = \frac{Z_K + Z_3}{T}, \text{ год/мг.} \quad (3.15)$$

де Z_K – знос контр тіла, мг;

Z_3 – знос зразка, мг;

T – тривалість випробовувань, год.

Зносостійкість рухомого з'єднання розраховується за формулою:

$$U = \frac{1}{V}, \text{ год/мг.} \quad (3.16)$$

3.11. Проведення експлуатаційних випробовувань.

Мета експлуатаційних випробувань полягала у порівняльній оцінці зносостійкості рухомих сполук: корпус гідроциліндра - поршень, робоча поверхня якого мала МДО покриття, модифіковане частинками нанопорошку CuO , порівняно з аналогічними серійними виробами.

Умови випробувань відповідали рядовій експлуатації. Режими навантаження та швидкості взаємодії робочих поверхонь, а також робочі рідини відповідали рекомендаціям заводів виробників гідроциліндрів, а також ДСТУ 3455.1-96. Для отримання достовірних даних на випробування було встановлено дванадцять експериментальних деталей. Контроль кількості робочих ходів гідроциліндрів здійснювався за допомогою безконтактних датчиків СМ12 та реєстратора РМ-2201.

Зношування дзеркала циліндра в ході проведення випробувань визначали за допомогою індикаторного нутроміра ГОСТ 868-82, а знос робочих поверхонь у відповідь - поршнів гідроциліндрів визначали мікрометром ДСТУ 6507:2009. Вибір площин вимірювання здійснювали відповідно до ДСТУ 18509.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.

4.1. Мікродугове оксидування алюмінієвого сплаву АК7ч (первинна обробка).

Товщина МДО покриттів є їх найважливішою характеристикою, що безпосередньо впливає на зносостійкість відновлених та зміцнених деталей. Разом з тим в електроліті типу « $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ » МДО покриття, щодо дійсного розміру деталі, формується не тільки всередину сплаву, що оксидується (внутрішній зміцнений шар), а й назовні (зовнішній зміцнений шар). Це дозволяє компенсувати зношування поверхні. У зв'язку з цим доцільно розглядати вплив режимів МДО (щільності струму, тривалість оксидування і температуру електроліту) на зміну товщини зовнішнього зміцненого шару МДО покриття, який повинен компенсувати спрацювання однієї з деталей в рухомому з'єднанні.

Використовуючи інформацію з літератури [4 і 8] нам відомо, що найбільш раціональна щільність струму, яка дозволяє формувати МДО покриття з великою швидкістю та значною товщиною в електроліті типу « $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ », становить 25 А/дм^2 . При його зменшенні потужність та температура МДР на одиниці площі оксидуємого алюмінієвого сплаву знижується, що призводить до зменшення товщини і швидкості формування МДО покриття, головним чином його зовнішнього зміцненого шару. Збільшуючи щільність струму до 30 А/дм^2 і більше вже після 20...30 хвилин оксидування МДР змінюється потужними дуговими розрядами (ДР), які починають руйнувати сформоване МДО покриття з утворенням на його поверхні глибоких кратерів. Необхідна тривалість оксидування повинна становити не менше 30 хвилин, тому що в іншому випадку не забезпечуються достатня товщина та рівномірність МДО покриття. Відомо, що температура електроліту при оксидуванні повинна перебувати в інтервалі $15\ldots60^\circ\text{C}$, оскільки тримання її нижче 15°C досить складно здійснити технічно та недоцільно з економічних позицій. Збільшення температури

електроліту більше 60 °С призведе до суттєвого зниження стабільності останнього та збільшить його випаровування при МДО.

Дослідження показали, що при збільшенні температури електроліту наскрізна пористість МДО покриття зростає (рисунок 4.1). Отримана залежність підтверджується даними інших дослідників, які працюють у напрямку отримання та використання МДО покриттів.

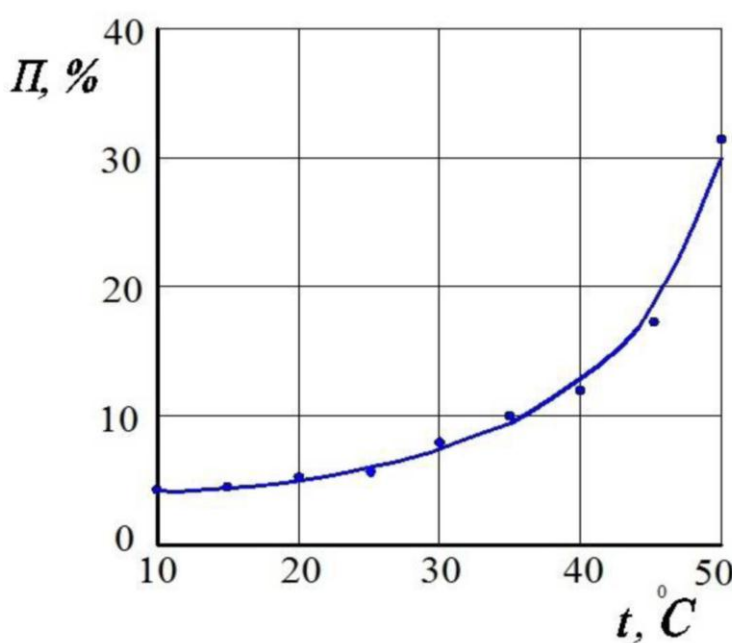


Рисунок 4.1 – Вплив температури електроліту t на наскрізну пористість P МДО покриття при $D_t=25 \text{ А/дм}^2$; $T=80$ хвилин; $C_{\text{KOH}}=2 \text{ г/л}$; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10 \text{ г/л}$.

Обґрунтування вмісту хімічних компонентів у проаналізованому електроліті (при первинній обробці) описано у 3 розділі. Доцільно використовувати їх наступний вміст: $\text{KOH}=2 \text{ г/л}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10 \text{ г/л}$. Щільність струму при МДО дорівнює 25 А/дм^2 . При створенні в МДО покритті необхідної пористості для подальшого модифікування частинками нанопорошку CuO (рис. 4.1) температура електроліту повинна підтримуватися на рівні $40 ^\circ\text{C}$. В цьому випадку наскрізна пористість МДО покриття не перевищує 12 %. Збільшення наскрізної пористості зміцненого шару вище за це значення може призвести до втрати несучої здатності МДО покриття [6]. Тривалість оксидування на даних режимах МДО та сплаві АК7ч була визначена експериментальним шляхом і

склала 80...90 хв. При більшій тривалості оксидування МДР переходять у ДР, що негативно впливає на мікротвердість та якість МДО покриття.

Таким чином за результатами власних експериментальних досліджень при співвідношенні катодного та анодного струмів $I_K/I_A=1,0$ рекомендуються наступні раціональні параметри МДО:

- вміст компонентів електроліту, г/л: КОН - 2, $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10$, інше – дистильована вода;

- режими МДО: щільність струму – 25 А/дм^2 , тривалість МДО – 80...85 хв.

Для отримання необхідної вторинної обробки наскрізної пористості МДО покриття температура електроліту повинна підтримуватися на рівні 400°C . При використанні вищевказаних раціональних параметрів МДО необхідна для вторинної обробки наскрізна пористість МДО покриття становитиме 12 %. Товщина зовнішнього зміцненого шару МДО покриття (після технологічного видалення) складе 65,70 мкм (на сторону) при загальній товщині зміцненого шару 125 мкм. Мікротвердість МДО покриття становитиме 10 ГПа.

4.2. Приготування розчину-носія нанопорошку CuO .

В якості зв'язуючого компонента розчину-носія нами був обраний компонент електроліту Na_2SiO_3 . Дослідження щодо виявлення оптимального складу розчину-носія нанопорошку CuO показали, що високий вміст зв'язуючого компонента негативно позначається на мікротвердості та якості вже сформованого МДО покриття. Так як при вторинній обробці Na_2SiO_3 виявляється у великій кількості в зоні горіння ІР, що сприяє його кристалізації та з'єднанню зі зміцненим шаром. В результаті утворюється небажане з'єднання МДО покриття з кристалами діоксиду кремнію (α -кварцу), що утворилися з Na_2SiO_3 (рисунок 4.2), при цьому мікротвердість зміцненого шару зменшується на 15...30 %.

Під час дослідження встановлено, що оптимальною концентрацією Na_2SiO_3 в розчині-носії є співвідношення 1/1 по масі від дистильованої води. При їх меншому співвідношенні розчин-носій розтікається по поверхні зразка і

не виконує свою функцію фіксації нанопорошку CuO на модифікованій поверхні.

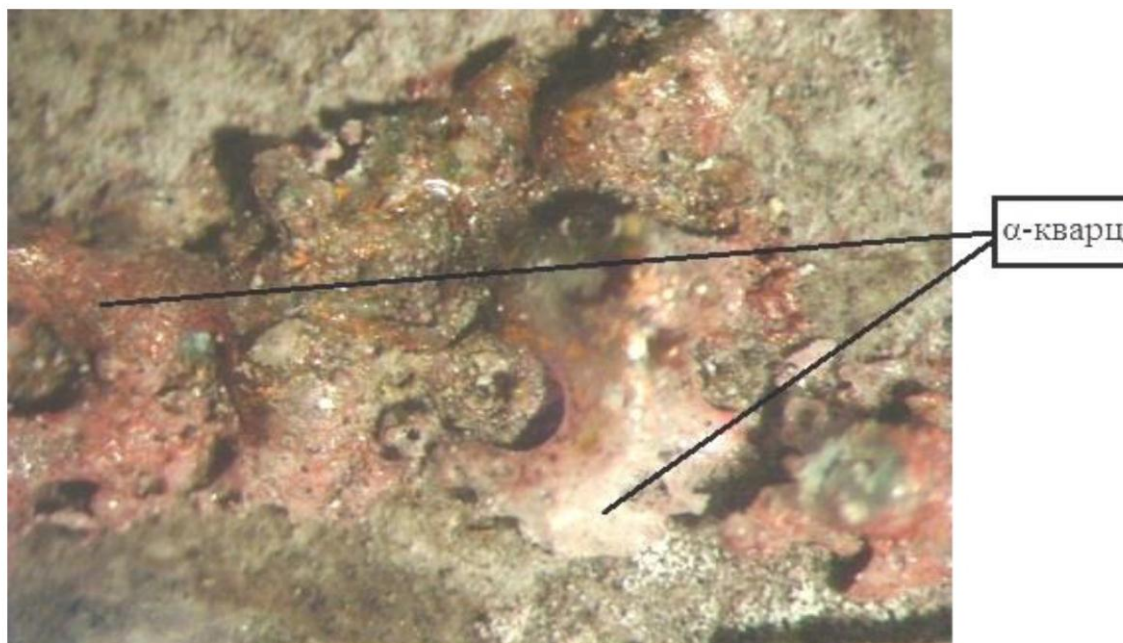


Рисунок 4.2 – Утворення діоксиду кремнію (α -кварцу) на поверхні МОД покриття при вторинній обробці, $\times 25$.

Крім цього, в ролі фіксатора в розчині-носії пробували застосовувати крохмаль. Однак він вплинув на утворення ІР. У роботі [13] це пояснюється тим, що крохмаль уповільнює їхню дію і робиться більш рідким та меншої потужності.

Використання в розчині-носії порошку CuO з фракцією 1...5 мкм при вторинній обробці дуговим електрофорезом не дало очікуваних результатів. При вторинній обробці порошок не проникав у пори МОД покриття і практично повністю розчинявся в електроліті, це пов'язано з розміром пористості у зміцненому шарі.

У зв'язку з цим було вирішено використати нанопорошок CuO із фракцією 80...100 нм. Кількість нанопорошку CuO в розчині-носії визначали експериментальним шляхом. Його оптимальна кількість склала 160 г/л розчину (силікат натрію – дистильована вода). При меншій концентрації нанопорошок розподіляється нерівномірно по МОД покриттю. При перевищенні зазначеної

концентрації він швидко осідає утворюючи в розчині грудочки, що при вторинній обробці негативно впливають на рівномірний розподіл нанопорошку CuO по поверхні МДО покриття.

Необхідна товщина нанесеного розчину-носія нанопорошку CuO перед вторинною обробкою МДО покриття становить 60...80 мкм. Велика товщина економічно недоцільна, тому що надлишок розчину-носія не впливає на заповнення нанопорошком CuO пористості в зміцненому шарі. Він легко розчиняється в електроліті при вторинній обробці. Найменшу товщину технічно складно здійснити.

Для затвердіння розчину-носія нами було обрано сушіння на відкритому повітрі, при температурі 20...25 °С. При більш швидкому затвердінні у плівці, що утворюється, з'являються тріщини і сколи, що сприяють частковому відшаровуванню затверділого розчину-носія ще до початку вторинної обробки. Звідси впливає недоцільність застосування прискореного сушіння розчину-носія в печах та сушильних камерах. Тривалість сушіння розчину-носія нанопорошку CuO повинна становити 30...50 хв. Даний інтервал пояснюється тим, що при меншій тривалості сушіння розчин-носій не має достатньої в'язкості для утримання наночастинок CuO на МДО покритті, і при опусканні зразка в електролітичну ванну нанопорошок протягом 1 хвилини переходить до складу електроліту. Якщо тривалість сушіння розчину-носія CuO буде більшою за рекомендований нами інтервал, то Na_2SiO_3 повністю затвердіє, що негативно позначиться на утворенні ІР на поверхні МДО покриття при вторинній обробці за рахунок діелектричних властивостей затверділого Na_2SiO_3 .

4.3. Дуговий електрофорез МДО покриття (вторинна обробка).

Метою вторинної обробки є розплавлення ІР частинок нанопорошку CuO , що знаходиться на поверхні МДО покриття у затверділому розчині-носії і включенні його у зовнішній зміцнений шар у зонах наскрізних та тупикових пор. У зв'язку з цим концентрація компонентів електроліту для вторинної обробки МДО покриття має бути суттєво нижчою, ніж при первинній обробці.

Дослідним шляхом встановлено, що доцільно застосовувати електроліт з наступною концентрацією компонентів: $\text{KOH}=0,5\ldots 1$ г/л, а $\text{Na}_2\text{SiO}_3=1\ldots 2$ г/л. Такий вибір концентрації KOH пояснюється тим, що це мінімально необхідний вміст цієї речовини в електроліті для утворення ІР. Більша його кількість сприяє більш швидкому переходу до складу електроліту розчину-носія нанопорошку CuO , що негативно позначається на утриманні частинок нанопорошку CuO на поверхні, що модифікується. Рекомендована кількість Na_2SiO_3 в електроліті використовується також для підтримки горіння ІР, оскільки збільшення товщини МДО покриття не потрібно. Крім цього дослідження показали, що використання при вторинній обробці електроліту з більш високим вмістом Na_2SiO_3 призводить до руйнування вже наявного МДО покриття (рисунок 4.3) при експлуатації відновленої та зміцненої деталі, а також до небажаних утворень на модифікованій поверхні діоксиду кремнію (α -кварцу) рис. 4.2, що дуже ускладнює закріплення частинок нанопорошку CuO в порах МДО покриття.



Рисунок 4.3 - Сколи на модифікованому частинками нанопорошку CuO МДО покритті, що утворюються при експлуатації відновленої та зміцненої деталі $\times 25$

Раніше у пункті 2.2 зазначалося, що для визначення сили струму в точках початку та закінчення вторинної обробки необхідно визначити складові опору та ємності. Проведені дослідження показали, що ємність МДО покриття

становить $C=0,015$ мкФ, тоді як у роботі [14] вказується $0,008$ мкФ, дана розбіжність пов'язана з різною товщиною МДО покриття. Добуток R_6C , зазначений у п 2.2, рівняння (2.25) можна визначити з формули:

$$R_6C = p_v \alpha E \epsilon \epsilon_0, \quad (4.1)$$

де p_v - питомий об'ємний опір МДО покриття Ом м;

α - коефіцієнт пропорційності зростання МДО покриття, м/В;

$\epsilon \epsilon_0$ - діелектрична проникність матеріалу плівки та вакууму відповідно;

E - напруженість електричного поля в МДО покритті, В/м.

За нашими даними $p_v = 3,1$ МОм см, тоді як у роботі [14] отримано значення $p_v = 3,8$ МОм см. Дана розбіжність пояснюється більшою пористістю нашого МДО покриття. Після підстановки знайдених значень у формулу 2.25 було отримано, що значення сили струму (з розрахунку оброблюваної поверхні площею $0,42$ дм²) становить $9,40...9,46$ А для початку вторинної обробки та $8,19...8,27$ А для завершення вторинної обробки. Отримані експериментальні значення вищі за розрахункові на $4,3$ % і 5 % відповідно. Це враховує те, що розрахункові значення було визначено з мінімуму потреби у силі струму, і навіть зроблених припущень. Як показали експерименти для стабільності перебігу процесу дугового електрофореzu необхідно підвищити щільність струму до 25 А/дм², що становитиме перевищене розрахункове значення на 10% .

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що оптимальна тривалість вторинної обробки модифікації МДО покриття становить 1 хв. Це підтверджує припущення, зроблені у пункті 2.2 дипломної роботи. Тривалість стабілізації сили струму становить близько 40 секунд. Однак в електроліті в цей момент поруч із поверхнею оброблюваної деталі знаходяться у великій кількості частинки нанопорошку CuO . Тому для повнішого заповнення пор МДО покриття тривалість вторинної обробки необхідно збільшити ще на 20 секунд. Цього часу достатньо для повного розплавлення та включення до складу МДО покриття наночастинок CuO , що

знаходяться на зовнішній поверхні зміцненого шару. У той же час збільшення тривалості вторинної обробки більше 1 хвилини також призводить до небажаних наслідків (рис. 4.2). Температура електроліту при дуговому електрофорезі становитиме 15...20 °С. При більш високих значеннях інтенсифікується процес переходу наночастинок CuO з розчину-носія в електроліт.

Аналіз отриманих дослідних даних дозволяє зробити висновок про те, що раціональний склад розчину-носія нанопорошку CuO та електроліту, а також режими вторинної обробки при модифікуванні МДО покритті, сформованого на деталі з алюмінієвого сплаву АК7ч, що дозволяють включати до зовнішнього зміцненого шару найбільшу кількість частинок нанопорошку CuO будуть наступними:

- розчин-носіє - по масі 1 частина нанопорошку CuO + 3 частини Na_2SiO_3 + 3 частини дистильованої води;

- КОН - 0,5 г/л, Na_2SiO_3 - 2 г/л, щільність струму - 25 А/дм², тривалість дугового електрофорезу - 1 хвилина, температура електроліту - 20 °С.

При цьому товщина зовнішнього зміцненого шару МДО покриття після дугового електрофорезу залишається незмінною і становить 65...70 мкм. Вимірювання мікротвердості до та після вторинної обробки дуговим електрофорезом показали, що даний показник МДО покриття не змінюється і становить 10 ГПа.

4.4. Працездатність електроліту.

Для формування МДО покриттів при первинній обробці алюмінієвого сплаву АК7ч важливий показник працездатності електроліту, тобто протягом якої тривалості можливе формування зміцненого шару з необхідними властивостями без заміни електроліту. Експерименти показали, що у процесі МДО відбувається збіднення електроліту. Це негативно впливає на властивості МДО покриттів, що формуються. Для визначення причин, що призводять до зниження показника мікротвердості сформованих МДО покриттів на сплаві

АК7ч, нами були проведені дослідження зміни рН електроліту, що має у своєму складі 2 г/л КОН та 10 г/л Na_2SiO_3 . Щільність струму процесі МДО становила 25 А/дм², а температура електроліту підтримувалася лише на рівні 40 °С. Мікротвердість МДО покриття вимірювалася з поверхні, що зішліфовано до товщини 60 мкм. Експерименти показали, що при окисдуванні протягом 12...15 А-г/л показник рН електроліту незначно знижується. Для сформованих на цьому етапі МДО покриттів характерне незначне зниження мікротвердості. Подальше формування МДО покриття призводить до інтенсивного зниження рН електроліту і мікротвердості зміцненого шару (таблиця 4.1). Слід зазначити, що у процесі МДО утворюється білий осад, він спостерігається на дні електролітичної ванни. Це вказує на протікання хімічних процесів на поверхні окисдованого зразка та в об'ємі електроліту.

Таблиця 4.1 – Вплив тривалості окисдування при первинній обробці на рН електроліту та мікротвердість МДО покриття $D_T=25$ А/дм²; $C_{\text{KOH}}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л; $t=40$ °С.

Тривалість окисдування, г.	3	6	9	12	15	18
Мікротвердість МДО покриття, ГПа	10	9,8	9,5	9,1	8,4	7,6
рН електроліту	12	11,8	11,4	10,9	10	8,8

При МДО відбувається поступове збіднення електроліту іонами Na^+ , SiO_3^{2-} і збагачується іонами AlO_2^- , що призводить до зниження його рН. Електроліт збіднюється лугом і стає насиченим гідроксидом алюмінію. Тому погіршуються властивості зміцненого шару, і нормальний перебіг процесу МДО стає неможливим [4]. Таким чином, до зниження працездатності електроліту і мікротвердості зміцненого шару призводять: включення компонентів електроліту до складу МДО покриття, утворення важкорозчинних осадів та нейтралізація лугу.

Аналіз даних показує, що оптимальна працездатність електроліту, що містить 2 г/л КОН і 10 г/л Na_2SiO_3 при значеннях температури електроліту 40 °С щільності струму 25 А/дм², може становити 12 А-г/л. Після цього

мікротвердість зміцненого шару починає суттєво знижуватися. Збереження працездатності електроліту при первинній обробці можна здійснити за рахунок підтримки початкового значення рН електроліту, для цього слід видалити з нього гідроксид алюмінію і додати необхідну кількість лугу [4].

4.5. Визначення вмісту міді на модифікованій поверхні МДО покриттів.

Дослідження поверхні модифікованих нанопорошком CuO МДО покриттів на вміст міді за товщиною зміцненого шару проводили на рентгенівському багатоканальному спектрометрі СРМ-35. Результати представлені в таблиці 4.2. У зв'язку з тим, що присутність міді по всій товщині зміцненого шару не потрібна, проведення досліджень здійснювалося на глибину, що не перевищує 15 мкм.

Таблиця 4.2 - Вміст міді на поверхні модифікованого нанопорошком CuO МДО покриття з пористістю 12 %

№ досліджу	Глибина шліфування від поверхні модифікованого МДО покриття, мкм	Набір імпульсів за 20 секунд	Вміст Cu на поверхні в %
1	0	3022701	6,55
2	5	1013837	2,95
3	10	599362	1,29
4	15	572062	1,23

Аналізуючи таблицю 4.2 бачимо що пори в МДО покритті заповнюються міддю не на 100 %, вони також заповнюються компонентом електроліту і розчину носія нанопорошка CuO, тобто оксидом кремнію (SiO₂). Це також підтверджують знімки поверхні зразків після вторинної обробки, які були зроблені на електронному сканую чому мікроскопі «Hitachi TM-1000» (рисунок 4.4).

4.6. Визначення коефіцієнта тертя та його молекулярної складової у рухомих сполуках з МДО покриттями.

При визначенні коефіцієнта тертя досліджувалися такі рухомі з'єднання:

- 1) сталь 40Х – МДО покриття;

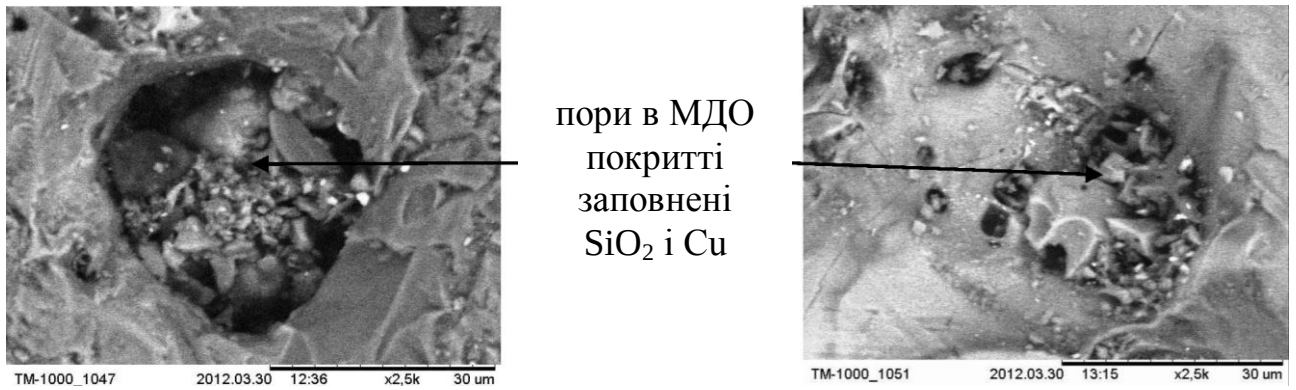


Рисунок 4.4 – Заповнені пори в МДО покритті після вторинної обробки, $\times 2500$

2) сталь 40X – МДО покриття зі наскрізною пористістю 8 %, модифіковане CuO ;

3) сталь 40X – МДО покриття зі наскрізною пористістю 12 %, модифіковане CuO .

Навантаження на індентор для кожної пари тертя складало: 125 Н; 240 Н; 340 Н. При навантаженнях також визначалася молекулярна складова коефіцієнта тертя. Результати вимірювань виводилися на екран ПК за допомогою приладу А17-Т8 та аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Графік зміни коефіцієнта тертя для одного із зразків залежно від навантаження, наведено на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Графік зміни загального коефіцієнта тертя для пари тертя «сталь 40X – МДО покриття» залежно від навантаження, де результати вимірювань відповідають: 1 – при 125 Н; 2- при 240 Н; 3 - 340 Н

Отримані значення коефіцієнта тертя були усереднені, і для простоти сприйняття представлені у вигляді діаграм (рисунок 4.6 та 4.7).

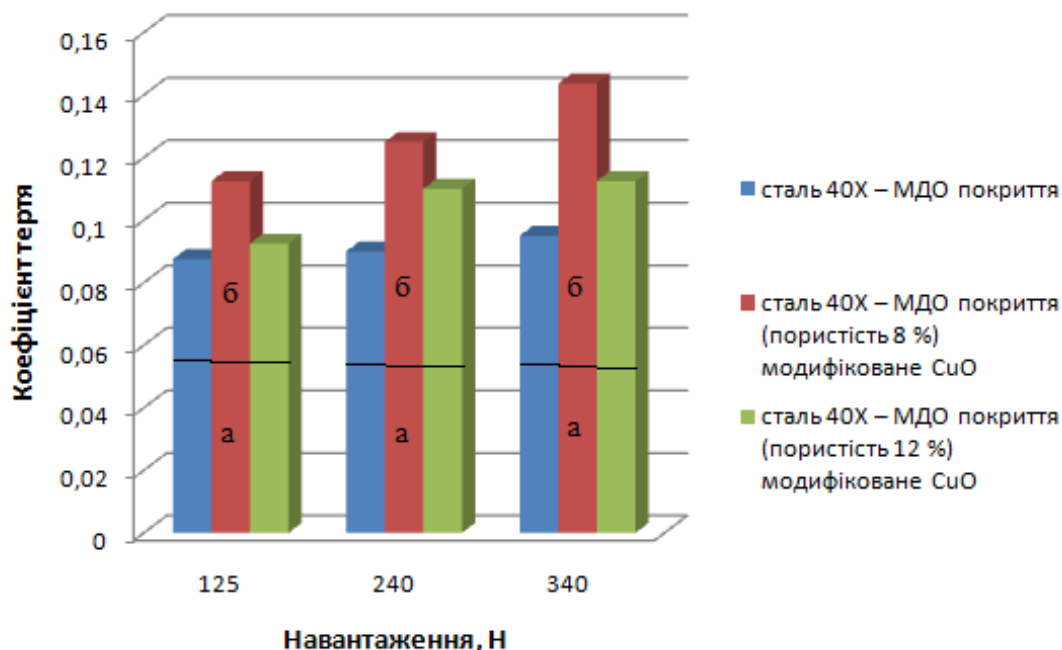


Рисунок 4.6 – Значення коефіцієнта тертя для різних пар тертя до їх приробітку залежно від навантаження, де а – молекулярна складова, б – механічна складова.

Як видно з рисунка 4.6 зі зростанням навантаження механічна складова тертя для всіх пар тертя збільшується, а молекулярна складова незначно зменшується. Це характерно для таких пар тертя (пружний контакт). «40Х – МДО покриття» має більш низькі значення, ніж у інших. Це пояснюється тим, що при однаковому для всіх параметрі шорсткості R_a , параметр шорсткості S в інших пар тертя збільшений за рахунок модифікування пор частинками нанопорошку CuO (Малюнок 4.4).

З рисунка 4.7 видно, що після приробітку і випробувань протягом 50 годин значення коефіцієнта тертя для всіх пар тертя знизилися. Найбільше зниження відбулося на парі тертя «сталь 40Х – МДО покриття з наскрізною пористістю 12 %, модифіковане CuO». З рисунка 4.7 також впливає, що молекулярна складова коефіцієнта тертя знизилася незначною мірою. Це підтверджує наші теоретичні припущення, зроблені в пункті 2.3 дипломної роботи.

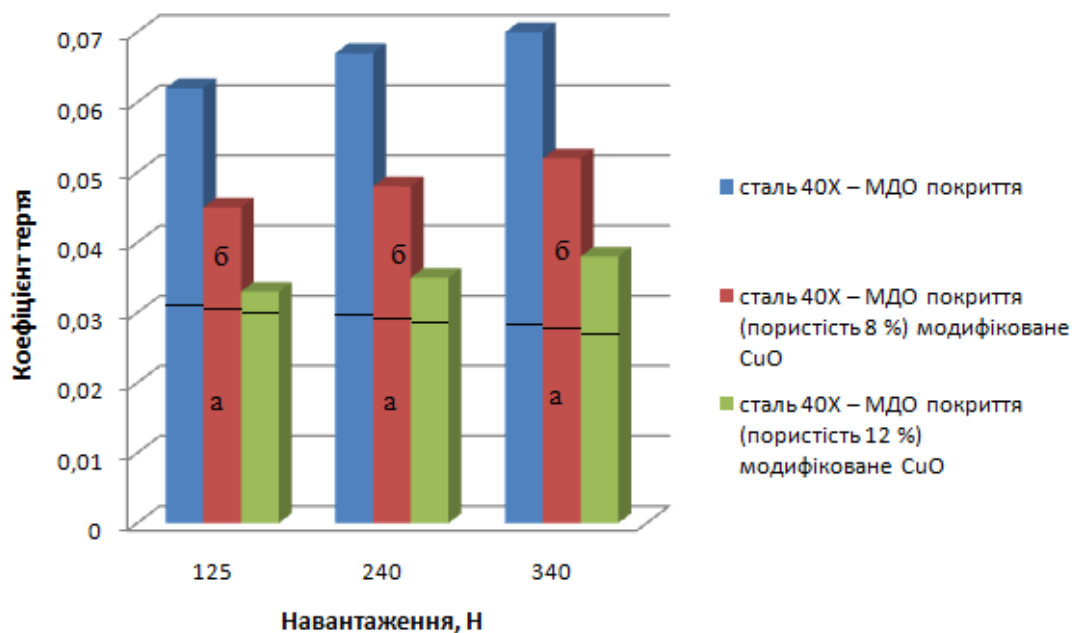


Рисунок 4.7 – Значення коефіцієнта тертя для різних пар тертя в залежності від навантаження, після приробітку та 50 годин випробувань, де а – молекулярна складова, б – механічна складова.

4.7. Порівняльні випробування на зносостійкість.

Для встановлення впливу частинок нанопорошку CuO після модифікування МДО покриття на зносостійкість рухомого з'єднання були проведені порівняльні випробування, в ході яких контролювався коефіцієнт тертя відповідно до планування експерименту. Як приклад було обрано пару тертя «поршень - стінка гідроциліндра». Для виготовлення даних деталей застосовують відповідно ливарний алюмінієвий сплав АК7ч і сталь 40Х. Контактний тиск при взаємодії контрзразків із сталі з поверхнею зразка з МДО покриттям становило 2 МПа. Дане значення відповідає рекомендаціям заводів виробників гідроциліндрів та вимогам ДСТУ 3317-96. Для прискорення проведення випробувань на зношування, а також відповідно до ДСТУ 3317-96 швидкість ковзання контрзразків по поверхні зразка з МДО покриттям була обрана 1 м/с.

Відповідно до пункту 3.10 цієї роботи як параметр оптимізації Y був прийнятий коефіцієнт тертя після 10 годин випробувань рухомого з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO ». Зразки оксидували з

використанням наступних режимів: щільність струму - 25 А/дм^2 , тривалість оксидування - 90 хв, температура електроліту - $20...40 \text{ }^\circ\text{C}$. Зміст компонентів КОН в електроліті становив 2 г/л, а Na_2SiO_3 - 10 г/л. Режими вторинної обробки були такими. Зміст КОН в електроліті становило 0,5 г/л, а Na_2SiO_3 - 2 г/л, тривалість сушіння розчину-носія становила 50 хв., Зміст Na_2SiO_3 в розчині-носія становила 300...700 г/л з інтервалом 200 г/л. Тривалість вторинної обробки від 20 до 60 секунд з інтервалом 20 секунд. Це дозволяло формувати зміцнені шари з різним вмістом Си модифікованому МДО покритті. Результати досліджень зведено до таблиці 4.3.

Критерій Кохрена, який визначався за формулою (3.6), дорівнює:

$$G_6 = \frac{0,0000045}{0,000011} = 0,409.$$

Табличне значення критерію Кохрена $G_{\text{ТАБЛ}}$, яке було визначено для рівня значущості $\alpha=0,05$ при числі ступенів свободи $f_1 = 2 - 1 = 1$ і $f_2 = 8$ має значення 0,679 [3]. Ми маємо $0,409 < 0,679$, тоді дисперсії паралельних дослідів однорідні. Отже дисперсія відтворюваності буде:

$$S^2(y) = \frac{0,000011}{8} = 0,000001375.$$

При цьому помилка експерименту буде:

$$S(y) = \sqrt{0,000001375} = 0,0012.$$

Таблиця 4.3 - Результати досліджень щодо впливу основних факторів на коефіцієнт тертя у рухомому з'єднанні.

№ досліджу	Результати дослідження		Середнє значення y_{UC}	S_U^2
	y_{U1}	y_{U2}		
1	0,072	0,070	0,0710	0,000002
2	0,070	0,071	0,0705	0,0000005
3	0,071	0,068	0,0695	0,0000045
4	0,042	0,043	0,0425	0,0000005
5	0,068	0,066	0,0670	0,000002
6	0,041	0,040	0,0405	0,0000005
7	0,039	0,040	0,0395	0,0000005
8	0,038	0,037	0,0375	0,0000005
Σ			0,438	0,000011

За формулами (3.9) і (3.10) знаходимо коефіцієнти рівняння регресії, після цього воно набуде наступного вигляду:

$$Y = 0,055 - 0,015X_1 - 0,0014X_2 - 0,0009X_3 - 0,00013X_1X_2 - 0,000X_1X_3 - 0,00025X_2X_3 + 0,00025X_1X_2X_3$$

Визначили помилки коефіцієнтів рівняння регресії за формулою (3.12), вони рівні:

$$S(b_0) = S(b_1) = S(b_{ij}) = S(b_{ijk}) = \frac{0,0012}{\sqrt{8 \cdot 2}} = 0,0003.$$

З урахуванням t - критерію здійснюємо перевірку статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії. Розрахункові значення t - критеріїв, визначених за допомогою формул (3.11), зведено в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахункові значення t - критеріїв для коефіцієнтів рівняння регресії

t_{b_0}	t_{b_1}	t_{b_2}	t_{b_3}	$t_{b_{12}}$	$t_{b_{13}}$	$t_{b_{23}}$	$t_{b_{123}}$
183,3	50	4,7	3,0	0,4	0,4	0,8	0,8

Табличне значення t - критерію, при зазначених вище рівні значущості та числі ступенів свободи, становитиме 2,306 [3, 6]. Значення представлені в таблиці 4.2 вказують на те, що розрахункові значення t - критерію для коефіцієнтів b_0 , b_1 , b_2 , і b_3 чисельно перевищують його табличне значення. З цього випливає, що ці коефіцієнти мають статистичну значимість. При цьому коефіцієнти b_{12} , b_{13} , b_{23} , і b_{123} не мають статистичної значущості, тому виключаються з рівняння регресії. Тоді рівняння регресії постане у такому вигляді:

$$Y = 0,055 - 0,015X_1 - 0,0014X_2 - 0,0009X_3.$$

Проводимо перевірку отриманого рівняння на адекватність. Результати проведених розрахунків дисперсії адекватності зведено до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку дисперсії адекватності

№ досліджу	Y_{UC}	Y_{UP}	$Y_{UC} - Y_{UP}$	$(Y_{UC} - Y_{UP})^2$
1	2	3	4	5
1	0,0710	0,0723	-0,0013	0,0000017

Продовження таблиці 4.5.

1	2	3	4	5
2	0,0705	0,0705	0	0
3	0,0695	0,0695	0	0
4	0,0425	0,0423	0,0002	0,00000004
5	0,0670	0,0677	0	0
6	0,0405	0,0405	0	0
7	0,0395	0,0395	0	0
8	0,0375	0,0377	-0,0002	0,00000004
Σ				$1,78 \cdot 10^{-6}$

З урахуванням отриманих даних S_{AD}^2 (формула 3.14) набуде вигляду:

$$S_{AD}^2 = \frac{2}{8-4} \cdot 1,78 \cdot 10^{-6} = 0,89 \cdot 10^{-6}.$$

Отже розрахункове значення Р-критерію складе:

$$F_p = \frac{0,89 \cdot 10^{-6}}{1,375 \cdot 10^{-6}} = 0,65.$$

Значення F - критерію, яке було визначено як табличне для рівня значущості $\alpha=0,05$ при числі ступенів свободи $f_{AD}=8-4=4$ і $f_E=8 \cdot (2-1)=8$, складе 3,8. Отримаємо $0,65 < 3,8$, звідси випливає, що модель адекватна. Отримана модель з достатньою точністю характеризує вплив факторів (X_1 , X_2 та X_3) на зміну коефіцієнта тертя з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO».

Аналіз рівняння регресії та отримані результати показують, що найбільший вплив на зниження коефіцієнта тертя в рухомому з'єднанні має пористість МДО покриття та тривалість вторинної обробки. Найкращий результат зниження коефіцієнта тертя досягається з використанням МДО покриття наскрізною пористістю 12 % модифікованому частинками нанопорошку CuO. Надалі дослідження зносостійкості рухомих сполук проводили з їх використанням.

Випробування на зносостійкість перевірених рухомих сполук показали (рисунок 4.8), що в парі тертя «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO» приробіток третьових поверхонь йде швидше, ніж у пари «сталь 40Х – МДО

покриття». Крім цього було встановлено, що коефіцієнт тертя у рухомих з'єднань з модифікованим МДО покриттям значно менше, ніж зі звичайним МДО покриттям. Це підтверджує наші теоретичні припущення, зроблені у розділі 2, що мідь виконує роль антифрикційного матеріалу.

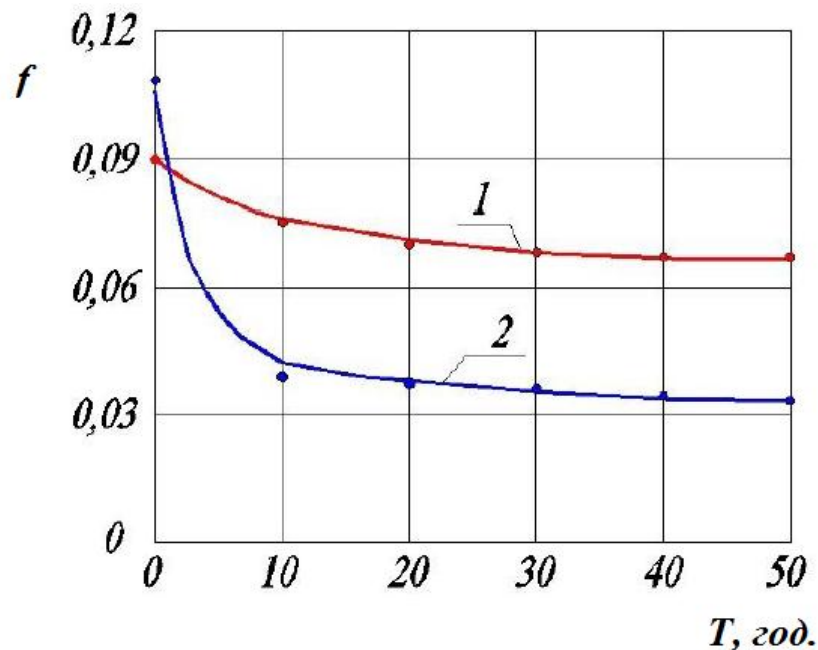


Рисунок 4.8 – Зміна коефіцієнта тертя в рухомих з'єднаннях: 1 – «сталь 40Х – МДО покриття»; 2 - «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO»

Проведені протягом 50 годин випробування показали, що зносостійкість рухомого з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO» в 1,5...2 рази вище, ніж у еталонної пари тертя «сталь 40Х – МДО покриття» (рисунок 4.9). Знос зразків з МДО покриттям як з модифікуванням CuO, так і без нього був протягом всіх випробувань досить малий і до кінця випробувань не перевищив 3 % за масою.

Швидкість зношування при випробуваннях визначали за формулою 3.15. Для рухомого з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття»:

$$V_1 = \frac{4,5}{50} = 0,09, \text{ мг/год.}$$

Для рухомого з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO»:

$$V_2 = \frac{2,1}{50} = 0,042, \text{ мг/год.}$$

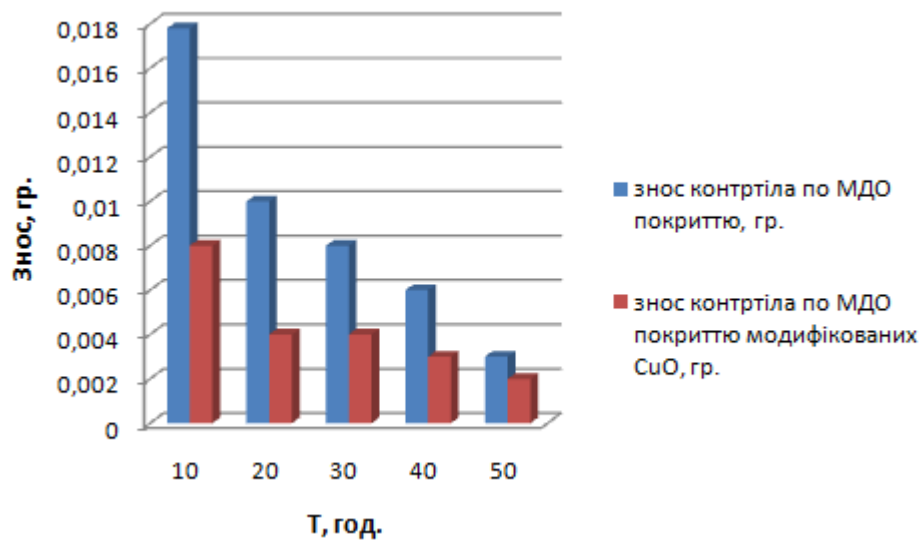


Рисунок 4.9 - Діаграма зносу контрзразків із сталі 40X під час випробувань на зносостійкість, $P=2$ МПа.

Зносостійкість випробуваних пар тертя, визначена за формулою 3.16, склала:

$$U_1 = \frac{1}{0,09} = 11,11, \text{ год./мг.}$$

$$U_2 = \frac{1}{0,04} = 23,81, \text{ год./мг.}$$

Проведений комплекс наукових досліджень дозволив встановити, що раціональні склади електролітів для МДО та дугового електрофореzu, режими двоступінчастої обробки та склад розчинуносія наночастинок CuO, що забезпечують найменший знос піддослідних рухомих сполук, такі:

- первинна обробка: $D_T=25$ А/дм; $T=90$ хв.; $C_{\text{KOH}}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л; $t=40$ °C;
- вторинна обробка: $D_T=25$ А/дм; $T=1$ хв.; $C_{\text{KOH}}=0,5$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=2$ г/л; $t=20$ °C;
- розчин-носії: по масі 1 частина нанопорошку CuO + 3 частини Na_2SiO_3 + 3 частини дистильованої води.

При використанні рекомендованих складів електролітів для МДО і дугового електрофореzu, режимів двоступінчастої обробки та складу розчину-

носія нанопорошка CuO зносостійкість перевірених рухомих сполук з МДО покриттями модифікованими частинками нанопорошку CuO в 1,5...2 рази вище, а коефіцієнт тертя 1,9...2 рази нижче, ніж у аналогічних рухомих з'єднань без модифікування зміцненого шару, прийнятих за зразок порівняння.

4.8. Порівняльні експлуатаційні випробування гідроциліндрів ГЦ-75.30.200.000.25.

Для порівняння довговічності відновлених МДО покриттями та модифікованими наночастинками CuO серійних поршнів гідроциліндрів з діаметром робочої частини $\varnothing 75$ мм були проведені їх експлуатаційні випробування. Метою даних випробувань була - порівняльна оцінка зносостійкості рухомих з'єднань «корпус циліндра – поршень» відновлених за пропонованою технологією та серійних гідроциліндрів. На навішування тракторів ЮМЗ-6М/6Л, а також на сівалки СЗ-3,6 та культиватори було встановлено загалом по 12 пропонованих та серійних гідроциліндрів ГЦ-75.30.200.000.25. Випробування відповідали умовам рядової експлуатації. Вимірювання аналізованих робочих поверхонь здійснювали після певного напрацювання.

У представлених для випробувань експериментальних гідроциліндрів ГЦ-75.30.200.000.25 (рисунок 4.10) поршні були відновлені та зміцнені МДО покриттями модифікованими частинками нанопорошку CuO , сформованими на наступних режимах:

- первинна обробка: $D_t=25$ А/дм; $T=90$ хв.; $C_{\text{KOH}}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л; $t=40$ °С;
- вторинна обробка: $D_t=25$ А/дм; $T=1$ хв.; $C_{\text{KOH}}=0,5$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=2$ г/л; $t=20$ °С;
- розчин-носії: по масі 1 частина нанопорошку CuO + 3 частини Na_2SiO_3 + 3 частини дистильованої води.

Порівняльні експлуатаційні випробування показали, що при напрацюванні поршня 100...110 км, що становить 20 % від гарантованої заводом-виробником,

зносостійкість випробуваних рухомих з'єднань з відновленими і зміцненими МДО покриттями модифікованими частинками нанопорошку CuO була в 2 рази вище, з'єднань у серійних гідроциліндрах ГЦ-75.30.200.000.25.

У зв'язку з цим, розроблені раціональні склади електролітів для МДО та дугового електрофорезу, режими двоступінчастої обробки та склад розчину-носія нанопорошку CuO можна рекомендувати до впровадження в ремонтне та машинобудівне виробництво для підвищення зносостійкості та довговічності рухомих з'єднань деталей, виготовлених з алюмінієвого сплаву АК7ч.



а



б

Рисунок 4.10 – Загальний вигляд встановленого гідроциліндра ГЦ-75.30.200.000.25, відновленого та зміцненого за розроблюваною комбінованою технологією: (а) - на навішуванні трактора ЮМЗ-6, (б) - на культиваторі КПС-4

4.9. Розроблений технологічний процес відновлення із зміцненням поршня гідроциліндра з алюмінієвого сплаву АК7ч МДО покриттям модифікованим частинками нанопорошку CuO .

Максимальне зношування поршня гідроциліндра серії ГЦ-75.30.200.000.25 досягає 0,12 мм на діаметр. Проведений комплекс наукових досліджень дозволив розробити та запропонувати ремонтному виробництву технологію відновлення із зміцненням МДО та модифікуванням МДО покриття частинками нанопорошку CuO поршнів гідроциліндрів. Технологія розроблена з прикладу поршня гідроциліндра ГЦ-75.30.200.000.25. Вона включає такі основні операції: очищення, дефектацію, механічну обробку, знежирення, МДО, промивання у

воді, сушіння, нанесення розчинуносія CuO , дуговий електрофореz, фінішну механічну обробку, очищення, заключний контроль, сортування, маркування, упаковку (рисунок 4.11).

При надходженні поршня в ремонт попередньо видаливши гумотехнічні ущільнення, його ретельно очищають від масла і продуктів зносу за допомогою мийної машини з використанням миючого розчину типу МС або Лабомід (20...30 г/л). Деталь промивають під тиском миючим розчином, при цьому температура повинна становити 70...80 °С. Очищення поршня ведуть до видалення забруднень. Потім деталь висушують.

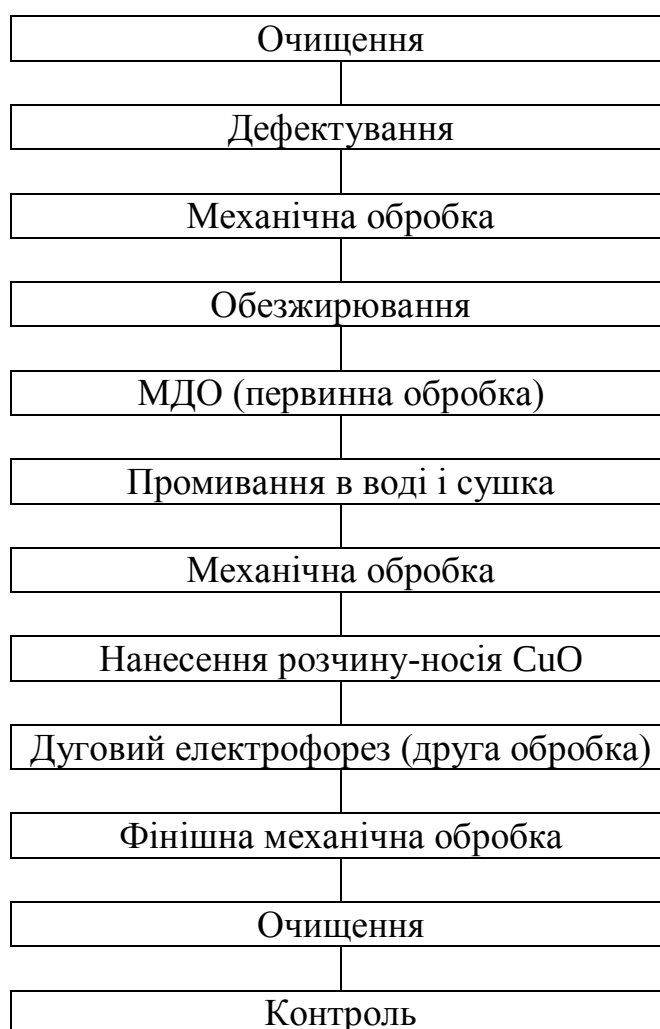


Рисунок 4.11 - Структурна схема технологічного процесу відновлення із зміцненням МДО та модифікуванням МДО покриття частинками нанопорошку CuO поршня гідроциліндра

Після очищення та сушіння, поршень гідроциліндра дефектують. При цьому вимірюють зношування робочої поверхні поршня, оглядають його для виявлення тріщин, сколів і задирок. При виявленні тріщин та сколів деталей не підлягає відновленню (бракується).

Після дефектації поршень гідроциліндра піддається механічній обробці. На круглошліфувальному верстаті 3A161 шліфують його робочу поверхню. Шліфування проводиться у 2 етапи: попереднє та чистове. Зношування деталі усувають попереднім шліфуванням. Після встановлення та закріплення поршня та шліфувального круга 14A50CM1K 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781 його проводять на наступних режимах: окружна швидкість обертання деталі - 30 м/хв, окружна швидкість обертання абразивного круга - 35 м/с, поперечна 0,01 мм/об. деталі, глибина шліфування – 0,025...0,060 мм. Потім проводять чистове шліфування навколо 24A25CM2K 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781 до шорсткості $K_a=0,63$ на наступних режимах: швидкість обертання деталі – 20 м/хв., швидкість обертання абразивного кола - 35 м/ подача – 0,005 мм/об. деталі, глибина шліфування – 0,005 мм.

Після механічної обробки поршень гідроциліндра піддається повторному очищенню, а потім знежиренню. Знежирення проводять у водному розчині, що містить 5...10 г/л NaOH, 40...50 г/л Na_3PO_4 та 3...5 г/л Na_2SiO_3 . Воно проходить за температури 60...70 °С тривалістю 1,5 хвилини [3]. Далі поршень промивається водою, нагрітою до температури 40...50 °С, і обдувається стисненим повітрям.

Потім слідує МДО (первинна обробка) робочої поверхні поршня гідроциліндра. Після закріплення поршня на підвісці оксидування здійснюють електролізі з наступним вмістом компонентів: KOH - 2 г/л, Na_2SiO_3 - 10 г/л. Режими МДО: густина струму - 25 А/дм², температура електроліту - 40 °С, тривалість оксидування - 90 хв. Збільшення розмірів поршня діаметром становить 120...130 мкм. Під час проведення цієї операції доцільно використовувати ванний спосіб оксидування. Для збільшення продуктивності процесу МДО рекомендується використовувати спеціальний пристрій (рис.

4.12), за допомогою якого можна оксидувати відразу кілька поршнів гідроциліндрів [3]. Воно включає в себе електролітичну ванну 1 і підвіску, що складається з електрода 2 і поперечки 5. Поршні, що відновлюються, по чергово встановлюють на електрод 2, розділяючи їх між собою шайбами 3 і 4. Ці шайби також служать для захисту поверхонь не підлягають МДО. У канавки на робочих поверхнях поршнів встановлюють захисні півкільця 8. Потім електрод 2 закріплюють на поперечці 5 за допомогою гайок 13 і 14, після чого зібрану підвіску кріплять до ванни 1 за допомогою пересувних втулок 6, фіксуються на поперечині 5 гвинтами 10 і гайками. Після цього електрод 2 і корпус електролітичної ванни 1 з'єднують з струмопроводами, включають подачу електроліту, рідини, що охолоджує, і ІТТ установки МДО.

Після МДО поршні знімають з підвіски, видаляють залишки герметика, що використовується для фіксації захисних шайб і напівкільць, промивають проточною водою і стисненим повітрям обдувають.

Потім механічної обробки видаляється технологічний шар МДО покриття. Його знімають за допомогою еластичного абразивного інструменту, він складається з пелюсток шліфувальної шкірки, які закріплені між двома дисками [3, 7]. При обробці задіяна лише периферійна частина пелюсток шкірки. Шліфування здійснюється за рахунок обертання інструменту. Далі поршень піддають чистового шліфування в необхідний розмір круглошліфувального верстата 3A161. При цьому використовують коло 54C25CT1K 35 м/с ПП70-20-20 ДЕРЖСТАНДАРТ 52781 обробку виробляють на наступних режимах: окружна швидкість обертання деталі - 20 м/хв, окружна швидкість обертання абразивного круга - 35 м/с, поперечна подача - 0,005 мм . деталі, глибина шліфування - 0,005...0,010 мм.

Далі поршень очищають та знежирюють. Потім на робочу поверхню поршня наноситься розчин-носій нанопорошку CuO , при цьому розчин-носій має наступні пропорції компонентів по масі: 1 частина нанопорошку CuO + 3 частини Na_2SiO_3 + 3 частини дистильованої води. Після нанесення розчину-носія він висушується на відкритому повітрі протягом 50 хвилин. Далі поршень

гідроциліндра піддається дугового електрофорезу (вторинної обробки) в електролітичній ванні з електролітом наступного складу: КОН – 0,5 г/л, Na_2SiO_3 – 2 г/л.

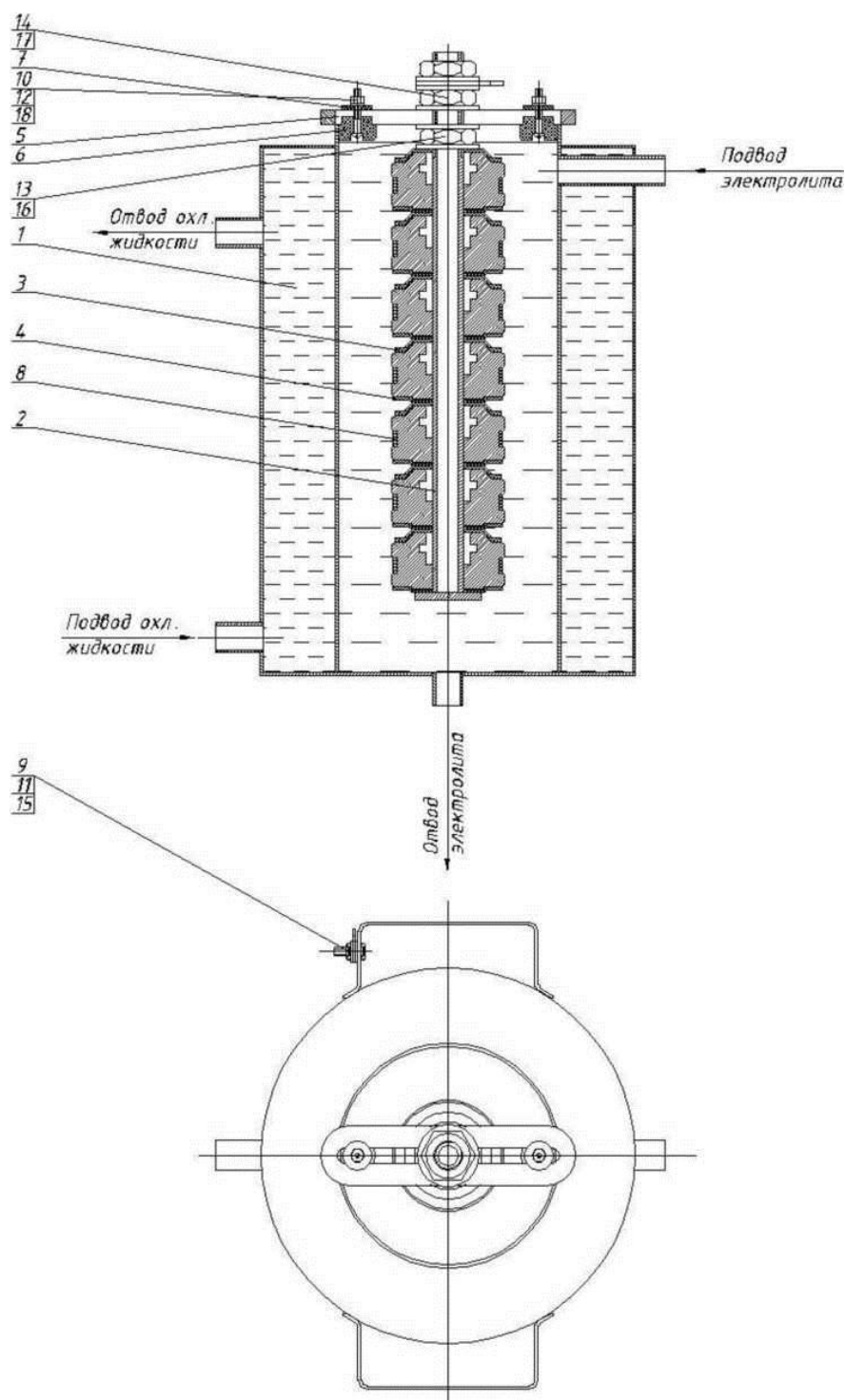


Рисунок 4.12 – Схема пристрою для МДО поршнів гідроциліндрів:

- 1 – електролітична ванна; 2 – електрод; 3,4 – захисні шайби; 5 – поперечка;
6 – втулка; 7 – опорна шайба; 8 - захисні півкільця; 9 – болт; 10 - гвинт;
11-14 – гайки; 15-18 – шайби.

Режими вторинної обробки такі: щільність струму - 25 А/дм^2 , тривалість обробки - 1 хв., Температура електроліту - $15...20 \text{ }^\circ\text{C}$. Необхідно відзначити, що вторинна обробка деталі повинна проводитися тільки ванним способом, тому що при використанні способу з проточною циркуляцією електроліту інтенсифікуватиметься процес розчинення розчину-носія нанопорошку CuO .

Після вторинної обробки поршень гідроциліндра промивають у проточній воді та обдують стисненим повітрям. Потім проводять фінішну механічну обробку. Робочу поверхню поршня піддають притирання в необхідний розмір і шорсткість на верстаті верстата 3807В. При цьому використовують притиральний порошок з бору карбіду зернистістю М40. Обробку роблять із частотою обертання шпинделя - 110 об/хв. Для відновлення робочої поверхні дзеркала гідроциліндра можна використовувати залізнення або метод ДРД.

Готова деталь представлена на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Поршень гідроциліндра ГЦ-75.30.200.000.25 відновлений та зміцнений за рахунок застосування комбінованої технології МДО з подальшим модифікуванням МДО покриття частинками нанопорошку CuO .

ВИСНОВКИ.

Робочі поверхні деталей з алюмінієвих сплавів, таких як поршні гідроциліндрів, мають максимальне зношування від 55 до 120 мкм на діаметр і близько 90 % продефектованих зовнішніх робочих циліндричних поверхонь поршнів підлягають відновленню.

Існуючі способи відновлення та зміцнення зношених робочих поверхонь таких деталей не завжди забезпечують їх необхідну зносостійкість. Найбільш перспективним способом відновлення з одночасним зміцненням таких деталей є МДО з використанням силікатно-лужного електроліту.

Обґрунтовано застосування явища дугового електрофореzu при вторинній обробці для впровадження частинок нанопорошку CuO в пори МДО покриття, що сприятиме його модифікації.

Удосконалена модель струму пробою при вторинній обробці (рівняння 2.25), яка враховує електрофізичні параметри наскрізної пористості, розчину-носія частинок нанопорошку CuO та електрорушійної сили джерела живлення та встановлює взаємозв'язок між розчиненням розчину-носія в електроліті та зменшенням потреб для дугового електрофореzu електричного струму.

Для первинної обробки алюмінієвого сплаву АК7ч оптимальна товщина, мікротвердість і пористість зміцненого шару при співвідношенні катодного і анодного струмів 1,0 забезпечуються використанням електроліту на основі дистильованої води, що містить 2 г/л КОН і 10 г/л Na_2SiO_3 - 25 А/дм², тривалість оксидування – 90 хвилин, температура електроліту – 40 °С. У цьому випадку товщина зміцненого шару (після технологічного видалення) складе – 65...70 мкм на сторону. Мікротвердість МДО покриття – 10 ГПа. Наскрізна пористість зміцненого шару складе трохи більше 12 %.

Рациональний склад розчину-носія частинок нанопорошку CuO та електроліту, а також режими вторинної обробки МДО покриттів, сформованих на деталях з алюмінієвого сплаву АК7ч, що дозволяють включати у зовнішній зміцнений шар найбільшу кількість частинок нанопорошку CuO будуть наступними: розчин нанопорошка CuO + 3 частини Na_2SiO_3 + 3 частини

дистильованої води; КОН – 1 г/л, Na_2SiO_3 – 2 г/л, щільність струму – 25 А/дм^2 (відповідає розрахунковому значенню), тривалість дугового електрофореzu – 1 хв., температура електроліту – 20°C . При цьому товщина зміцненого шару МДО покриття після дугового електрофореzu залишиться незмінною і складе 65...70 мкм. Мікротвердість МДО покриття до і після вторинної обробки дуговим електрофореzом не змінюється і становить 10 ГПа.

Довговічність електроліту при первинній обробці залежить від режимів МДО та тривалості оксидування. Вона становить близько 12 годин, після чого потрібно його коригування.

Вміст міді у порах МДО покриття модифікованого частинками нанопорошку CuO становить 60 %, інші 40 % займають кристали α -кварца.

Коефіцієнт тертя до приробітку в еталонній парі тертя «сталь 40Х – МДО покриття» на 5...7 % нижче, ніж для пари тертя «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO ». Після припрацювання та випробувань протягом 50 годин для пари тертя «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO » коефіцієнт тертя стає в 1,9...2 рази нижчим ніж у еталонній парі тертя. Що свідчить про появу «третього тіла» між поверхнями, що взаємодіють.

Зносостійкість рухомого з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття модифіковане CuO » в 1,5...2 рази вище, ніж у рухомого з'єднання «сталь 40Х – МДО покриття».

Експлуатаційні випробування показали, що при напрацюванні поршнів 100...110 мото-годинах, що становить 20 % від гарантованої заводом-виробником, зносостійкість випробуваних рухомих з'єднань з відновленими і зміцненими МДО покриттями модифікованими частинками нанопорошку CuO деталями була в 2 рази вища ніж у аналогічних рухомих з'єднаннях серійних гідроциліндрів ГЦ-75.30.200.000.25.

Список використаної літератури.

1. Завод «Ремсинтез». <https://remsintez.com.ua/ua/p1623094268-sivalka-zernova-vid.html>
2. Гапонова О. П. Сталі та сплави з особливими властивостями : Навч. посібник / О. П. Гапонова, А. Ф. Будник. – Суми : СумДУ, 2014. – 240 с. – ISBN 978-966-657-507-7.
3. Основи технології мікродугового оксидування: Навчальний посібник. - К.: «ІД Альянс», 2008 - 80 с.
4. Мікродугове оксидування: теорія, технологія, обладнання/І.В. Сумінов, А.В. Епельфельд, та інших. – К.: ЕКОМЕТ, 2005. – 368 с.
5. Новіков, О.К. Пористість МДО-покриттів на відновлених поверхнях деталей із алюмінієвих сплавів [Текст] / О.К. Новіков, В.В. Жуків //Ремонт, відновлення, модернізація. – 2005. – № 6. – С. 7-9.
6. Smirnova A. Yu., Shtefan V. V. Korrozionnaya stoykost' MDO-pokrytiy na titane, sformirovannykh v W-, Mo-, V-, Ce-soderzhashchikh elektrolitakh [Corrosion resistance of MDO coatings on titanium formed in W-, Mo-, V-, Ce-containing electrolytes]. Corrosion: Materials, protection, 2014, no. 8, pp. 14–19.
7. Beer S. Aluminum Cylinder Blocks / S. Beer, J. Klodt, H. Moding, B. Sommer, O. Vogt, H.Kohler, U. Bredenbreuker, J. Niehues // Munich, Germany: Verlag Moderne Industrie,– 2006. – pp. 70-90
8. Електролітно-плазмова обробка: моделювання, діагностика, управління: монографія / Є. В. Парфьонов, Р. Р. Нев'янцева, С. А. Горбатков, А. Л. Єрохін. - К.: Машинобудування, 2014. - 380 с.
9. Дубовий О. М. Інженерне матеріалознавство : підручник / О. М. Дубовий, Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева та ін. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с.
10. Тертя, знос та мастило (трибологія та триботехніка) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Е.К. Берлінер, Е.Д. Браун [та ін]; за заг. ред. А.В. Чичинадзе. - К.: 83 Змн. Арк. № докум. Підпис Дата Арк. ДРБМТВА 23.20104.000. ПЗ Машинобудування, 2003. - 576 с.

11. Руденко В. М. Математична статистика. Навч. посіб. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 304 с.
12. Повстяной О.Ю., Рудь В.Д., Імбірович Н.Ю. «Комп'ютерно-інформаційні технології в сучасному матеріалознавстві»: монографія. Луцьк, 2019. 225 с.
13. Міхєєв, А.Є. Технологічні можливості мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів [Текст]/О.Є. Міхєєв, Н.А. Терьохін, В.В. Стацура// Вісник машинобудування. – 2003. – № 2. – С. 56-63.
14. Коломейченко, О.В. Мікродугове оксидування як спосіб відновлення та зміцнення деталей машин [Текст]/О.В. Коломейченко, В.К. Логачов, Н.С. Чернишов // Інженерія поверхні та реновація виробів: матер. 2- й Міжнар. наук.-техн. конф. - Київ: АТМ України, 2002. - С. 73-76.
15. Кузнецов, Ю.А. Відновлення та зміцнення деталей машин та обладнання АПК мікродуговим оксидуванням [Текст]: автореф. дис. докт. техн. Наук/Ю.А. Ковалів. - К., 2006. - 35 с.
16. Смілянський В.К. Методика технологічного проектування МДО [Текст]/В.К. Смілянський, О.Ю. Герцій// Автомобільна промисловість. – 2001. – № 2. – С. 31-33.
17. Куц Ю.В., Повстяной О.Ю. «Сучасні методи дослідження мікроструктур за допомогою комп'ютерного матеріалознавства з використанням прикладних програм». Наукові нотатки. 2014. Випуск 45. С. 323-329.
18. Імбірович Наталія Юріївна «Розроблення оксидокерамічних покриттів на цирконієвих та титанових сплавах плазмоелектролітною обробкою»: дис. канд. техн. наук: 05.02.01. Луцький держ. технічний ун-т. Луцьк, 2006. 125 с.
19. К.А. Ющенко Інженерія поверхні. Київ: Наук-а думка, 2007. 559 с.
20. Kurita H.. Hypereutectic Al-20 %Si Alloy Engine Block Using HighPressure Die-Casting / H. Kurita, H. Yamagata, H. Arai and T. Nakamura, SAE Technical Paper, 2004.- 56 p.

21. Yerokhin A.L. Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process / Yerokhin A.L., Shatrov A., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A., Leyland A., Matthews A // Surface and coatings Technology, 2005, v. 199, p. 150-157.

22. Сідашенко О.І. Ремонт машин і обладнання: підручник / О.І. Сідашенко, О.А. Науменко, Т.С. Скобло та ін.; за ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К.: Аграр Медіа Груп, 2018. – 632 с.