

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: «Підвищення зносостійкості підшипникового вузла
тертя насосів типу НШ шляхом нанесення покриття
методом електроіскрової обробки»

Шифр МРТАМ 24.23603.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАм-23-1



Підпис

М. І. Герасимчук
Ініціали, прізвище

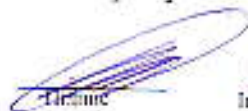
Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.



Підпис

С. Ф. Посонський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.



Підпис

О. В. Лиха
Ініціали, прізвище

— 11 — 12 — 2024 р.

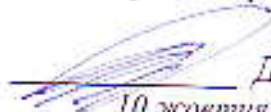
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Освітній рівень магістр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство».

Спеціалізація «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Духа О.В.
10 жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Герасимчуку Максиму Івановичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Підвищення зносостійкості підшипникового вузла тертя насосів типу ПН шляхом нанесення покриття методом електроіскрової обробки.*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 26.08.2024р. № 60 (1/28)

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) на кафедру 16.12.2024 р.
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) *Матеріали курсових проєктів, переддипломної практики.*
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 - 1) Аналіз умов роботи та шляхи зниження інтенсивності зношування шестерних насосів авто техніки
 - 2) Основи надійності шестерених насосів та методи її забезпечення
 - 3) Методики експериментальних досліджень
 - 4) Результати експериментальних досліджень
5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

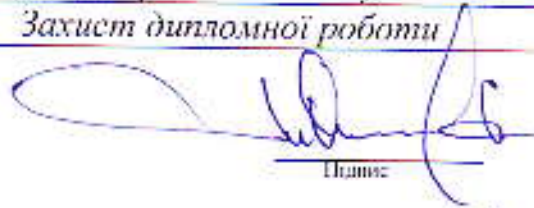
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видач	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 10 жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Срок виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз умов роботи та шляхи зниження інтенсивності зношування шестерених насосів авто техніки	30.10.24	вик
2	Основи надійності шестерених насосів та методи її забезпечення	15.11.24	вик
3	Методики експериментальних досліджень	23.11.24	вик
4	Результати експериментальних досліджень	4.12.24	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	6.12.24	вик
6	Допуск до захисту	12.12.24	вик
7	Захист дипломної роботи	16.12.24	

Студент


Підпис

Герасимчук М. І.
Підпис, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посонський С. Ф.
Підпис, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-23-1 Герасимчук Максим Іванович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Підвищення зносостійкості підшипникового вузла тертя насосів типу НШ шляхом нанесення покриття методом електроіскрової обробки» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 19 найменувань, розмічених на 2 сторінках, та 2 додатків розмічених на 17 сторінках. Роботу викладено на 79 сторінках, з них 72 сторінок основного тексту, на яких розміщено 17 рисунків і 8 таблиць.

До основних переваг методу електроіскрової обробки слід віднести можливість формувати на робочих поверхнях деталей покриття із заданими службовими властивостями, високу адгезію покриття з основою, можливість локальної обробки поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні та екологічність процесу.

Незважаючи на високу ефективність та підвищений інтерес до процесу електроіскрової обробки, в даний час все ж таки недостатньо вивчені властивості зміненого поверхневого шару, що визначають трибологічні властивості покриттів.

У зв'язку з цим представлена магістерська робота спрямована на вивчення мікрогеометричних характеристик, фізико-механічних та фрикційних властивостей покриттів сформованих методом електроіскрової обробки (ЕІО), що визначають інтенсивність втомного зношування робочих поверхонь пар тертя.



Робота виконана на прикладі пари тертя: підшипникова обойма - цапфа круглого шестеренного насоса високого тиску типу НШ, що є частиною стандартної комплектації кожного трактора МТЗ-80 та МТЗ-82. Без такого насосу не обходяться види сільськогосподарської, будівельної та іншої важкої техніки, що доводить актуальність роботи.

Мета роботи: дослідити можливість застосування електроіскрової обробки для відновлення і підвищення зносостійкості підшипникового вузла тертя насосів типу НШ.

Ключові слова: ШЕСТЕРЕННИЙ НАСОС; ПІДШИПНИКОВА ОБОЙМА – ЦАПФА; ЕЛЕКТРОІСКРОВА ОБРОБКА; ПОКРИТТЯ; МІКРОТВЕРДІСТЬ; УМОВНОЇ МЕЖІ ПЛИННОСТІ; ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ШЕСТЕРНИХ НАСОСІВ АВТО ТЕХНІКИ	8
1.1 Призначення та конструкція шестерних насосів авто техніки.	8
1.2 Умови взаємодії робочих поверхонь деталей сполучення підшипникова обойма – цапфа круглого шестеренного насосу	10
1.3 Шляхи зниження інтенсивності зношування деталей пари тертя підшипникова обойма – цапфа круглого шестеренного насоса	18
2 ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ШЕСТЕРЕННИХ НАСОСІВ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	26
2.1 Експлуатаційна надійність насосів	26
2.2 Основні способи відновлення параметрів зношених деталей шестеренних гідронасосів	29
2.3 Метод електроіскрової обробки.	37
3 МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	41
3.1 Методика оцінки значень параметрів шорсткості поверхонь.	41
3.2 Дослідження мікротвердості покриттів, утворених методом електроіскрової обробки	44
3.3 Методика визначення пластичних властивостей поверхонь зразків	49
3.4 Методика визначення умовної межі пластичності поверхонь зразків.	52
3.5 Методика визначення питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків на межі поділу двох твердих тіл.	54

МРТАМ 24.23603.000 ПЗ								
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Підвищення зносостійкості підшипникового вузла тертя насосів типу НШ шляхом нанесення покриття методом електроіскрової обробки.	Літера	Арквш	Аркушів
Іванко Ігор	1	ГТ-2024-001					4	79
Іванко Ігор	1	ГТ-2024-001				ХНУ МІВАм-23-1		

3.6	Методика оцінки фрикційної втоми поверхонь зразків	58
3.7	Лабораторні триботехнічні випробування зразків пар тертя	60
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	64
4.1	Оцінка параметрів шорсткості робочих поверхонь деталей пар тертя	64
4.2	Оцінка механічних властивостей поверхневих шарів зразків пар тертя	65
4.2.1	Мікротвердість	65
4.2.2	Відносне подовження поверхневих шарів	67
4.2.3	Умовна межа плинності.	68
4.3	Дослідження фрикційних властивостей поверхонь деталей пар тертя.	69
4.3.1	Питома міцність зсуву молекулярних зв'язків	69
4.3.2	Фрикційна втома	72
4.4	Коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування	74
	ВИСНОВКИ	76
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77
	ДОДАТКИ	79

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

У повсякденній практиці промислового виробництва існує безліч продуктів для яких важливо, щоб вони мали високу стійкість до стирання, корозії та/або термічного опору. Такими продуктами є газові турбіни, ливарні форми, ріжучі інструменти, насоси, компресори тощо. У такому устаткуванні зазвичай лише їх окремі частини або окремі поверхні піддаються сильним динамічним, механічним, термічним, абразивним, корозійним та іншим подібним навантаженням. Отже, дуже корисно захищати такі поверхні або деталі відповідною оболонкою.

Сьогодні відома низка способів нанесення твердих оболонок на підкладки. Вони можуть бути класифіковані за різними критеріями. Відомими процесами є плакування (прокаткою та вибухом), наплавлення (газ, дуга, плазма, лазерне наплавлення), розпилення (газ, плазма, лазерне напилення) та випаровування. Одним із численних способів нанесення твердих облицювань на нові, пошкоджені або зношені вироби є електроіскрова обробкою. Цей процес характеризується осадженням у першу чергу карбідів та інших твердих сплавів на підкладці у дуже тонких шарах.

Електроіскрова обробка дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними властивостями на нанорівні [1, 2].

Фізична сутність процесу полягає у явищі електричної ерозії та полярному перенесенні матеріалу анода (обробного електрода) на катод (електрод-деталь) при перебігу імпульсних розрядів у газовому середовищі. Метод розроблений Б.Р. Лазаренком та Н.І. Лазаренком, які запропонували фізичну модель процесу, вивчили можливості та технологічні особливості методу, створили дослідні та промислові зразки установок.

До основних переваг методу слід віднести можливість формувати на робочих поверхнях деталей покриття із заданими службовими властивостями, високу адгезію покриття з основою, можливість локальної

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки поверхні, відсутність необхідності в попередній підготовці поверхні та екологічність процесу.

Незважаючи на високу ефективність та підвищений інтерес до процесу електроіскрової обробки, в даний час все ж таки недостатньо вивчені властивості зміненого поверхневого шару, що визначають трибологічні властивості покриттів.

У зв'язку з цим представлена магістерська робота спрямована на вивчення мікрогеометричних характеристик, фізико-механічних та фрикційних властивостей покриттів сформованих методом електроіскрової обробки (ЕІО), що визначають інтенсивність втомного зношування робочих поверхонь пар тертя.

Робота виконана на прикладі пари тертя: підшипникова обойма - цапфа круглого шестеренного насоса високого тиску типу НШ, що є частиною стандартної комплектації кожного трактора МТЗ-80 та МТЗ-82. Без такого насосу не обходяться види сільськогосподарської, будівельної та іншої важкої техніки, що доводить актуальність роботи.

Мета роботи: дослідити можливість застосування електроіскрової обробки для відновлення і підвищення зносостійкості підшипникового вузла тертя насосів типу НШ.

Завдання роботи:

1. Виконати аналіз умов роботи підшипникового вузла тертя насосів типу НШ та визначити шляхи підвищення його триботехнічних властивостей.
2. Дослідити мікрогеометрію, механічні, фрикційні та триботехнічні властивості покриттів, отриманих методом електроіскрової обробки.
3. Дати кількісну оцінку підвищення зносостійкості поверхні пари тертя.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ШЕСТЕРНИХ НАСОСІВ АВТО ТЕХНІКИ

1.1 Призначення та конструкція шестерних насосів авто техніки.

Шестерний насос високого тиску є частиною стандартної комплектації кожного трактора МТЗ-80 та МТЗ-82. Без такого насосу не обходяться й інші види будівельної, сільськогосподарської, робочої дорожньої, міської техніки. Головне завдання шестерного насоса НШ це нагнітання рідини в робочі гідросистеми техніки.

Особливості і параметри шестерний насос має різні, що залежать від його призначення. Наприклад, на тракторах з навісним екскаваторним обладнанням застосовують насос типу НШ-10. Його робота відбувається у горизонтальній площині. Для техніки з навісним обладнанням, застосовують насос типу НШ-32 робота якого відбувається у вертикальній площині. Його також встановлюють на грейдери, бульдозери, ковшові навіси, відвали. Такий тип обладнання забезпечує привід стріл та захватів [3].

Конструкція всіх НШ схожа між собою та має єдиний принцип дії. Розбіжності можуть бути лише у типах техніки до комплектації яких вони входять і конструкційних елементах. Насос шестерний є самостійним агрегатом, що передає рідину в гідравлічній системі. Ведений і ведучий ротори, через обертання, концентрують з боку входу розрідження, внаслідок чого порожнечі та пази заповнюються мастилом або іншою рідиною в результаті тиску.

Круглі насоси застосовують при підвищеному гідравлічному навантаженні. Існують також і плоскі насоси. Ціна та експлуатаційні характеристики круглих значно вищі за плоскі моделі.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Від конструкції привідного валу залежить типове з'єднання із приводом. Це один з важливих чинників. У свою чергу, конструкція буває шприцева або шпонкова.

Несправності шестеренного насоса НШ виникають через кілька основних причин, а саме: зношування насосу за ресурсом, пошкодження приводу або витік. В цьому випадку, в гідравлічну систему надходить недостатня кількість масла або воно зовсім не надходить в систему. Якщо в гідросистемі нагнітається повітря з'являється піна або в гідробаці, зазвичай перевіряють герметичність трубопроводу, цілісність манжети приводу а також температуру масла. Наявність вібрації і гулу при роботі насоса, свідчить про знос муфти приводу, вібрацію запірних клапанів або недостатню фіксацію трубопроводу, а також інших системних вузлів.

У випадку відсутності необхідного значення тиску під час роботи агрегату, потрібно звернути увагу на положення регулювання клапана, стан золотника та на рівень загального зношування насосу. Засмічення фільтра або надмірне навантаження під час експлуатації призводить до періодичного перегрівання насоса. Також слід стежити за рівнем рідини в гідробаку, який може бути занадто низьким.

Для ефективної експлуатації насосу НШ, обов'язково необхідно дотримуватися лімітованого часу. Так, наприклад, для міської техніки – 1000 годин, а для промислової і будівельної техніки експлуатація не повинна перевищувати 3000 годин. Для сільськогосподарської техніки цей період становить 4000 годин. Для зменшення ймовірності поточного ремонту та можливості простоювання техніки, слід змінювати очисний фільтр під час кожної заміни насоса. Також варто звернути увагу на використання лише оригінальних деталей, інакше зношування робочого вузла неодмінно пришвидшиться [3].

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Умови взаємодії робочих поверхонь деталей сполучення підшипникова обойма – цапфа круглого шестеренного насосу

У круглих шестеренних насосах сила, що діє на підшипники, визначається за формулою [4]:

$$F_{НШ} = 0,85 \Delta P b D_e, \quad (1.1)$$

де $\Delta P = P_2 - P_1$ - перепад тиску між камерою нагнітання P_2 та камерою всмоктування P_1 , МПа; b - ширина шестірни, мм; D_e - діаметр шестерні по колу головок зубів, мм.

Тоді навантаження на кожній опорі становитиме:

$$F_{НШ1,2} = \frac{0,85 \Delta P b D_e}{2}. \quad (1.2)$$

За формулою (1.2) для насоса НШ50 А, при $\Delta P = 10$ МПа, $b = 31,4_{-0,02}$ мм, $D_e = 59,8_{-0,030}$ мм, сила, що діє на кожну опору, складе 7980,3 Н.

При теоретичному розв'язанні задачі про напружений стан у зоні контакту пружних тіл припускають, що статична навантаження, матеріали тіл ізотропні, майданчик контакту мала в порівнянні з поверхнями та чинні сили спрямовані нормально до цього майданчика. Максимальне напруження σ_{\max} залежить від пружності матеріалів та геометричних параметрів тіл, що стискаються.

Для розрахунку напружень в зоні контакту підтискна обойма – цапфа скористаємось програмним комплексом САПР SolidWorks. Зокрема, модулем Simulation, який дозволяє проводити розрахунок на міцність конструкцій у пружній зоні.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

На першому етапі будується 3-D модель пари тертя підшипникова обойма цапфа (рис. 1.1), при цьому нехтуючи тими особливостями конструкції деталей, які не є визначальними у формуванні розподілу контактних напружень [5].

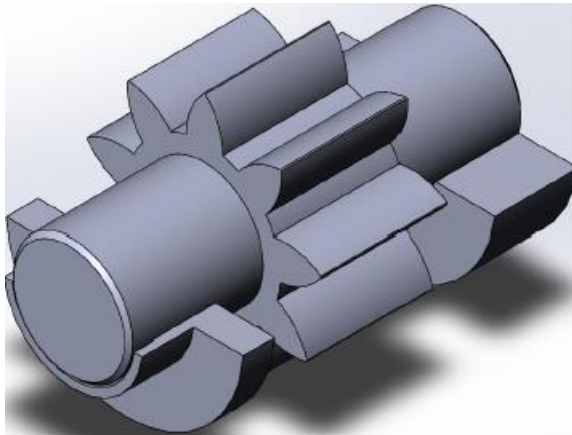


Рисунок 1.1 – 3-D модель пари тертя «цапфа шестерні – підтискна обойма»

На наступному етапі визначаються граничні умови (рис. 1.2) та місця додатки чинного навантаження (рис. 1.3).

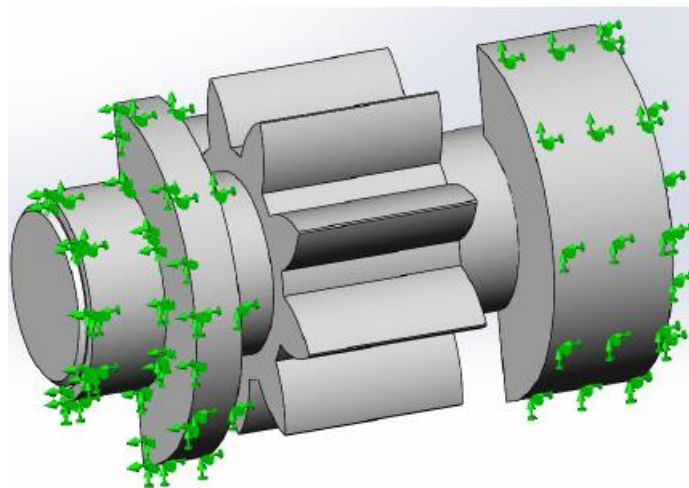


Рисунок 1.2 – Гранична умова «Зафіксована геометрія»

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Граничною умовою є «зафіксована геометрія», оскільки піджимна обойма круглого шестеренного насоса, будучи в корпусі, знаходиться у жорстко зафіксованому стані. Друга гранична умова в місця контакту деталей один з одним «немає проникнення».

Відповідно до аналізу принципу роботи круглого шестеренного насоса. зовнішнє навантаження «Сила» діє по нормалі до зуба (рис. 1.3).

Симетричний вплив цих сил на зуб формує рівнодіючу гідравлічних сил, значення якої обчислюється за такою формулою (1.2).

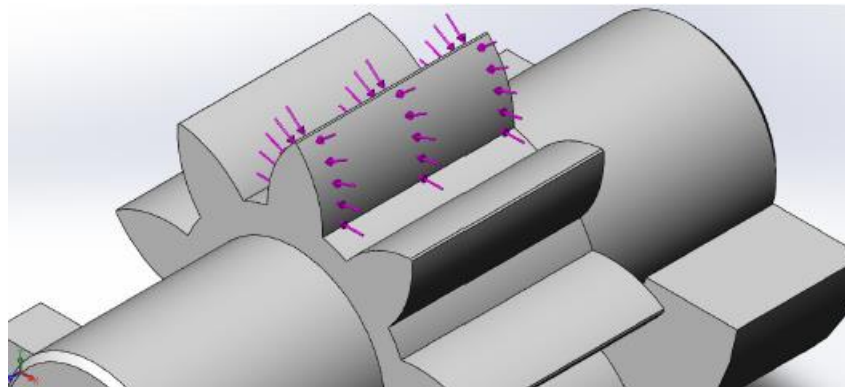


Рисунок 1.3 – Зовнішнє навантаження «Сила»

Для проведення розрахунку до програми введено фізико-механічні властивості матеріалів деталей (табл. 1.1) [6].

Таблиця 1.1 – Основні фізико-механічні властивості матеріалів деталей

Матеріал деталі	Підтискна обойма AK5M7	Цапфа шестерні 18ХГТ
Межа плинності, МПа	195	300
Модуль пружності, МПа	70000	211000
Щільність, кг/м ³	2850	7800
Коефіцієнт Пуассона	0,31	0,27

Далі, для отримання більш точного розподілу напружень створюється сітка з урахуванням кривизни деталей, і запускається програма для розрахунку. Після закінчення програма видає такі результати: напруження, переміщення та деформації.

На рисунку 1.4 показано напружено-деформований стан піджимної обойми в напруженнях по Мізесу. Максимальне значення напружень в зоні контакту підшипникової обойми та цапфи становить 34,2 МПа. Червона та жовта зона – це ділянки, в яких виникають максимальні напруження та близькі до них. Синя зона – ділянка, в якій напруження, близькі до мінімальних.

Отримані результати мають визначальне значення при використанні розрахунково-експериментального методу оцінки інтенсивності зношування пари тертя шестерня - підшипникова обойма та прогнозування ресурсу круглих шестеренних насосів.

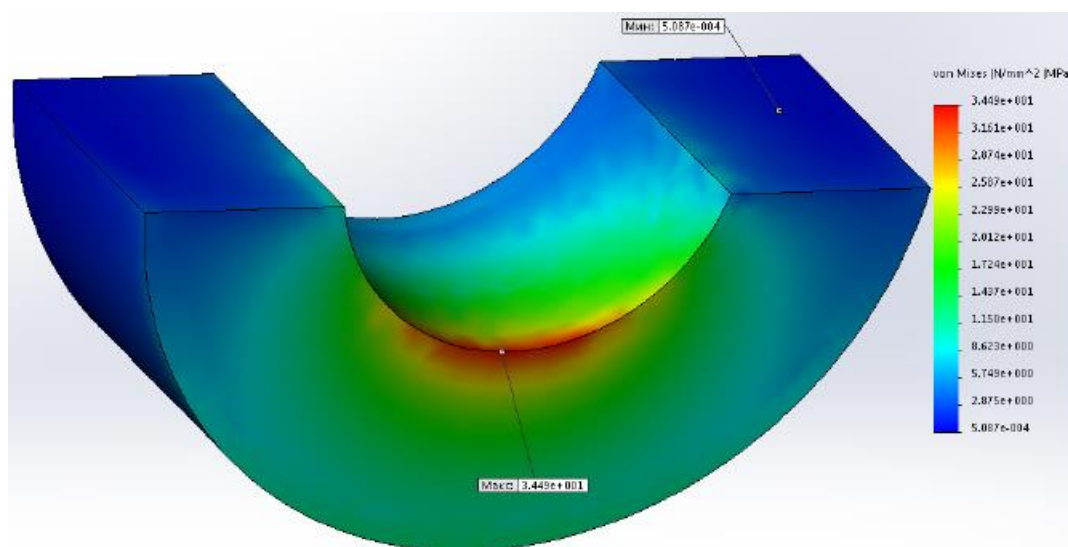


Рисунок 1.4 – Розподіл напружень у зоні контакту шестерні та підтискної обойми

Для подальших розрахунків за номінальний тиск p_a правомірно прийняти максимальні напруження на майданчику контакту σ_{max} , МПа. При

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

цьому, враховуючи, що контактуючі поверхні криволінійні та значення напружень у всіх випадках перевищують 10 МПа, контурний тиск p_c дорівнюватиме номінальному p_a . У зв'язку з цим у розрахунках будемо використовувати значення номінального тиску p_a у сполученнях.

При контактуванні поверхонь тіл з різною твердістю, виступи більш твердої поверхні впроваджуються у виступи сполученої поверхні, а виступи більш м'якої поверхні при цьому розплющуються і змінюють свою форму. Очевидно, що в розрахунках слід приймати макро- та мікрогеометричні параметри поверхні більш твердого тіла та фізико-механічні властивості м'якшого.

Значення порогового контурного тиску, нижче якого буде виконуватися умова зовнішнього тертя, що визначається за формулою [5]:

$$p_c^* = \frac{HB}{2^{v+1} \cdot \Delta^v} \left(1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^v, \quad (1.3)$$

де HB - твердість за Брінеллем; τ_n – питома зсувна міцність молекулярних зв'язків межі розділу двох твердих тіл, МПа. Значення v , b , R_{max} , r , Δ , HB, τ_n визначені за результатами експериментальних досліджень та представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Розрахункові значення та результат розрахунку порогового значення контурного тиску p_c^* , МПа, нижче якого буде виконуватися умова зовнішнього тертя

b	v	Rmax	r	Δ	HB	τ_n	p_c^*
2,5	1,6	0,62	167	0,0021	87	3,91	167084,1

Так як контурний тиск p_c значно менше порогового P_c^* , то можна стверджувати, що деталі сполучення підшипникова обойма – цапфа працюють у режимі зовнішнього тертя.

Розрахуємо значення порогового контурного тиску, перевищення якого призведе до пластичного контакту [5]:

$$\frac{p_c^{**}}{HB} = \frac{0,5 \cdot 5,4^v}{\Delta^v} \cdot \left[\frac{HB \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]^{2v} \quad (1.4)$$

За формулою (1.4) граничне значення контурного тиску $p_c^{**} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ МПа. Так як контурний тиск p_c набагато більше порогового значення P_c^* , то можна стверджувати, що у зонах контакту мають місце пластичні деформації.

Визначимо значення порогового контурного тиску P_c^{***} , МПа, вище якого спостерігатиметься насичений контакт:

$$P_c^{***} = \frac{0,5 \cdot HB}{(b^{1/v} \cdot v)^{v-1}}, \quad (2.5)$$

За формулою (1.5) граничне значення контурного тиску $P_c^{***} = 2,69$ МПа. Так як контурний тиск p_c набагато більше порогового значення P_c^{***} , то можна стверджувати, що у зонах контакту має місце пластичний насичений контакт.

У загальному випадку коефіцієнт зовнішнього тертя f складається з молекулярної складової f_a та механічної f_m :

$$f = f_a + f_m, \quad (1.6)$$

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Молекулярна складова коефіцієнта тертя f_a визначається молекулярною взаємодією в точках торкання ковзних поверхонь $f_a = \frac{\tau_n}{HB}$, а механічна – фізико-механічними характеристиками матеріалів, навантаженням та параметрами мікрогеометрії поверхонь. Тоді для пластичного насиченого контакту коефіцієнт зовнішнього тертя можна записати, як:

$$f = \frac{\tau_n}{HB} + 0,76 \cdot \left(\frac{R_{max}}{r_{пр}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{P_c}{HB} \right)^{0,5} \quad (1.7)$$

У таблиці 1.3 представлені значення коефіцієнта тертя та його складових, розрахованих за формулою (1.7).

Таблиця 1.3 – Результат розрахунку коефіцієнта тертя та його складових

f	f_a	f_m
0,074	0,045	0,029

Враховуючи, що в досліджуваній парі тертя має місце пластичний або пружно-пластичний контакт, скористаємося залежністю для визначення інтенсивності зношування поверхні із джерела:

$$I_{п} = c \left(\frac{P_a}{HB} \right)^{\frac{1+\beta t_{п}}{1-\beta}} \cdot (2\Delta)^{\frac{1+t_{п}}{2}} \cdot \left(\frac{k_f^{\pi}}{\delta_{5B}} \right)^{t_{п}} \cdot \eta_{c,a}^{\frac{(1+t_{п})\beta}{1-\beta}}, \quad (1.8)$$

де c, β, k_f^{π} – коефіцієнти; $t_{п}$ – параметр кривої фрикційної втоми; δ_{5B} – деформація при одноразовому розтягуванні; $\eta_{c,a}$ – коефіцієнт, характеризується ставленням контурної площі контакту до номінальної.

Коефіцієнти c, β, k_f^{π} знаходять із співвідношень:

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\left\{ \begin{aligned} c &= \frac{\nu^{1/2} \Gamma(\nu) \Gamma(1+t_{\text{п}}/2)}{4(\nu+1) \Gamma(\nu+t_{\text{п}}/2)}; \\ \beta &= \frac{1}{2\nu+1}; \\ k_f^{\text{п}} &= \sqrt{\frac{\sigma_{\tau} + 2f_a HB}{\sigma_{\tau} - 2f_a HB}}. \end{aligned} \right. \quad (1.9)$$

де Γ – гамма-функція; σ_{τ} – межа плинності, МПа.

Для двох хвилястих поверхонь коефіцієнт, що характеризується ставленням контурної площі контакту A_c до номінальної A_a визначається за формулою:

$$\eta_{c,a} = \frac{A_c}{A_a} = \frac{1}{F} P_a^{0,9}, \quad (1.10)$$

де $F = k \left\{ \frac{(H_{B1} H_{B2})^{1/4}}{\Theta \cdot R_{\text{пр}}^{1/2}} \right\}^{0,9}$; $k = 0,22 \dots 0,29$ величина, яка залежить від коефіцієнта заповнення профілю хвилями; H_{B1} та H_{B2} – висота хвилі більш м'якого матеріалу та твердішого матеріалу, відповідно, мкм; $R_{\text{пр}}$ – наведений радіус хвиль двох взаємодіючих поверхонь:

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \quad (1.11)$$

де R_{B1} та R_{B2} – радіуси сферичних хвиль більш м'якого матеріалу та більше твердого матеріалу відповідно мкм.

Формула (1.8) справедлива для розрахунку інтенсивності зношування плоских хвилястих поверхонь. У разі контакту криволінійних хвилястих поверхонь відношення $A_c/A_a = 1$ тоді коефіцієнтом η_{ca} можна знехтувати.

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ				

Розрахунок інтенсивності зношування проводиться для граничного тертя та постійної швидкості ковзання, при якій зміна температури на контакт не впливає на природу поверхневого шару.

Значення параметрів t , $\sigma_{0,2}$, (σ_T) і δ_{5B} визначені експериментальними дослідженнями та представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Розрахункові значення та результат розрахунку інтенсивності зношування в сполученні підшипникова обойма - цапфа

c	β	$\sigma_{0,2}$, МПА	t_{II}	fa	k_f^{II}	δ_{5B}	I_{II}
0,07	0,24	150	2,21	0,045	1,05	0,25	$3,72 \cdot 10^{-3}$

1.3 Шляхи зниження інтенсивності зношування деталей пари тертя підшипникова обойма – цапфа круглого шестеренного насоса

При розробці нових технологій відновлення зношених поверхонь деталей важливим етапом є попередній розрахунок на тертя, що дозволяє прогнозувати інтенсивність зношування в залежно від застосовуваних методів та властивостей відновлювальних та зміцнювальних покриттів.

Вибір методу і матеріалів покриттів, що наносяться слід проводити з враховуючи основні положення молекулярно-механічної теорії тертя, ґрунтуючись на знаннях та досвіді фрикційного матеріалознавства. Що стосується поверхневих шарів, необхідно, щоб дотримувалося правило позитивного градієнта механічних властивостей.

Фрикційний зв'язок має бути менш міцним, ніж зв'язок між глибше лежачими шарами. При цьому слід мати на увазі, що за наявності позитивного градієнта механічних властивостей зовнішнє тертя реалізується лише у певному діапазоні значень відношення глибини впровадження h до радіусу r мікронерівностей, дотичної напруги τ_n і межі плинності деформованого матеріалу σ_T :

– при малих значеннях h та великих значеннях τ_n

$$\frac{h}{r} \leq 0,5 \left(1 - \frac{2\tau_n}{\sigma_T} \right); \quad (1.12)$$

– при великих значеннях h та малих значеннях τ_n

$$\sqrt{\frac{h}{r}} \geq \left(\frac{\pi}{5,6} - \frac{1,3\sigma_T}{p_r} \right). \quad (1.13)$$

Таким чином, для забезпечення процесу зовнішнього тертя повинні виконуватися дві умови: позитивний градієнт механічних властивостей та

співвідношення $\frac{h}{r} + \frac{\tau_n}{c\sigma_T} \leq \frac{1}{2}$, де c - коефіцієнт, що залежить від форми виступів та наклепу матеріалів.

Що стосується зсувного опору τ_n , то воно визначається міцністю одиничного зв'язку, що зазвичай оцінюється енергією активації молекулярного зв'язку E_{ak} , необхідної для її руйнування, і числом зв'язків, одночасно виникають усередині цього тіла.

Енергія активації зв'язку, необхідна для її руйнування, залежить від напруженого стану тіла. Залежно від наведеного знака напружень енергія активації зв'язку визначається за формулою:

$$E_{ak} = E_{ak0} \pm \nu p_r, \quad (1.14)$$

де E_{ak0} – енергія активації зв'язку, необхідна для її руйнування до переходу з одного тимчасового положення рівноваги до іншого; ν – коефіцієнт, що має розмірність обсягу, що характеризує величину зазору, який необхідно здійснити для розриву зв'язку.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таким чином, νp_r характеризує роботу, яку потрібно витратити проти зовнішнього поля руйнування зв'язку.

Стосовно поверхневого шару, підданого стискаючим напруженням [4, 5]:

$$\tau_n = \alpha \cdot \exp \frac{E_{ak} + \nu p_r}{k\vartheta}, \quad (1.15)$$

де - коефіцієнт пропорційності; E_{ak} – енергія активації молекулярного зв'язку, необхідна для її руйнування; ϑ – абсолютна температура, характерна для даної речовини та її термодинамічного стану, К; k – константа Больцмана. У формулі (1.8) фізико-механічні властивості матеріалу представлені комплексом:

$$I_p \sim \left(\frac{1+\beta t}{HB^{1-\beta}} \cdot \delta_{5B}^t \right)^{-1}, \quad (1.16)$$

тобто чим вище твердість та величина відносного подовження при розриві, тим вище зносостійкість.

В даний час є великий експериментальний матеріал з вивчення впливу структури металу на механічні властивості. Встановлено співвідношення між межею плинності та розміром блоків мозаїки D (1.17), межею плинності та неоднорідністю міжплощинного відстані $\Delta d/d$ (1.18):

$$\sigma_{\tau} = \alpha_1 D^{-1/2}, \quad (1.17)$$

$$\sigma_{\tau} = \alpha_2 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^{1/2}. \quad (1.18)$$

де α_1 та α_2 -коефіцієнти пропорційності.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Знайдено експериментальні залежності твердості HB від величин $D^{-1/2}$ і $(\Delta d/d)^{1/2}$, які мають лінійний характер і при екстраполюванні відсікають на ординаті відрізок H_0 , тобто:

$$HB = HB_0 + \alpha'd^{-1/2}, \quad (1.19)$$

$$HB = HB_0 + \beta'\eta^{1/2}. \quad (1.20)$$

Залежності (1.17), (1.18), (1.19) та (1.20) можуть бути прийняті за основу при аналізі закономірностей зношування нових та відновлених робочих поверхонь деталей. Ґрунтуючись на результатах аналізу методів відновлення зношених поверхонь деталей, найбільш перспективним є метод електроіскрової обробки, що дозволяє в залежності від обраних електродних матеріалів та прийнятих режимів у широкому діапазоні змінювати фізико-механічні властивості робочих поверхонь деталей, що в кінцевому результаті дозволяє формувати покриття з високими триботехнічними властивостями.

З таблиці 1.5 видно, що найбільша щільність дислокацій та найменший розмір блоків, близький до граничного подрібнення, досягається біля поверхонь, оброблених ЕІО, що обумовлено максимальним спотворенням кристалічних ґрат.

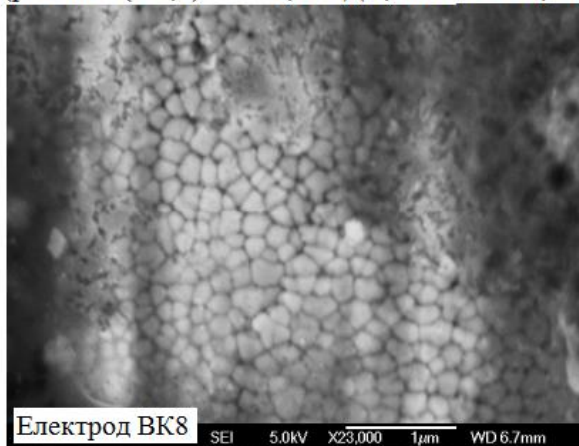
На рисунку 1.5 представлена блокова структура ЗПШ зразка із сталі 45, отримана електродом ВК8 та СТИМ-ЗБОАн.

Прогнозування високих триботехнічних властивостей електроіскрових покриттів пояснюється як структурними змінами, а й особливості параметрів топографії. Їхня текстура має специфічний рельєф як замкнутих западин (рис. 1.6).

При русі таких поверхонь, що захоплюють за собою мастило, утворюються елементарні гідродинамічні клини, дія яких підсумовується та викликає підйом однієї поверхні над іншою.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

(режим 2 (1-0,2) - E = 0,045 Дж, $f_{imp}=600$ Гц; 2 τ)



(режим 7 (2-0,4) - E = 0,09 Дж; $f_{imp}=600$ Гц; 2 τ)

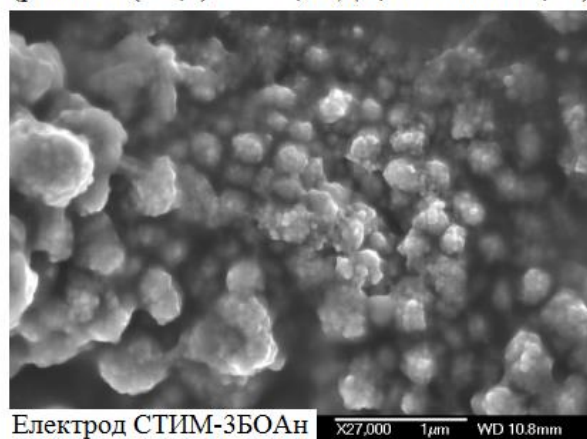


Рисунок 1.5 – Блокова структура ЗПШ на сталі 45 (генератор «БІГ-4»)

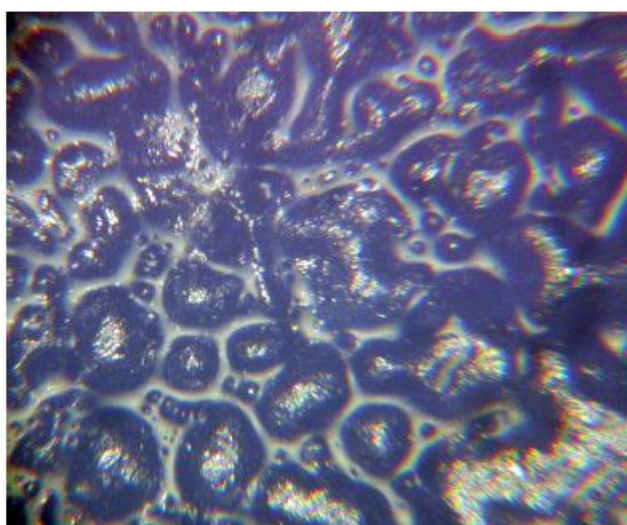


Рисунок 1.6 – Текстура електроіскрових покриттів.

У роботі [8] показано, що у покриттів, отриманих методом ЕЮ, величиною опорної поверхні 80-85%, обсяг западин у 255 разів перевищує об'єм на тій же площі поверхні зразків, отриманих після механічної обробки. Тобто покриття, утворені методом ЕЮ, здатні утримувати на поверхні значно більший обсяг олії, що також сприятливо позначається на триботехнічних властивостях пар тертя.

Для оцінки ефективності застосування методу ЕЮ проведено розрахунок інтенсивності зношування підшипникової обойми круглого шестеренного насосу.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Розглянемо технологічну схему відновлення та підвищення зносостійкості пари підшипникова обойма – цапфа круглих шестеренних насосів, що включає розточування напівотвору підшипникового обойми під ремонтний розмір з наступним зміцненням поверхні методом ЕІО та відновлення методом ЕІО цапфи з наступним шліфуванням у розмір.

Значення порогового контурного тиску, нижче якого буде виконуватися умова зовнішнього тертя, що визначається за формулою (1.3).

Значення v , b , R_{max} , r , Δ , HB , τ_n визначені за результатами експериментальних досліджень та представлені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Розрахункові значення та результат розрахунку порогового значення контурного тиску p_c^* , МПа, нижче якого буде виконуватися умова зовнішнього тертя.

b	v	R_{max}	r	Δ	HB	τ_n	p_c^*
		МКМ				МПа	
2,7	1,5	0,47	125	0,0019	205,2	12,96	415549,1

Так як контурний тиск p_c значно менше порогового $p_c^* = 415549,1$, то можна стверджувати, що поверхні деталей сполучення працюють у режимі зовнішнього тертя.

Розрахуємо значення порогового контурного тиску, перевищення якого призведе до пластичного контакту. За формулою (1.4) граничне значення контурного тиску $p_c^{**} = 2,8 \cdot 10^{-1}$ МПа. Так як контурний тиск p_c набагато більше порогового значення p_c^{**} , можна стверджувати, що у зонах контакту мають місце пластичні деформації.

За формулою (1.5) визначимо значення порогового контурного тиску p_c^{***} , МПа, вище якого спостерігатиметься насичений контакт. З розрахунку

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

видно, що контурний тиск p_c більший за порогів $p_c^{***} = 4,17$, отже, у зоні контакту має місце пластичний насичений контакт.

Тоді для пластичного насиченого контакту коефіцієнт зовнішнього тертя визначимо за формулою (1.7).

У таблиці 1.7 представлені значення коефіцієнтів тертя та його складових у ресурсовизначальних сполученнях гідроагрегатів.

Таблиця 1.7 – Результат розрахунку коефіцієнта тертя та його складових.

f	fa	fm
0,082	0,063	0,019

Враховуючи, що в досліджуваній парі тертя має місце пластичний або пружно-пластичний контакт, скористаємося залежністю (1.8) для визначення інтенсивності зношування при пластичному контакті. Значення параметрів t , $\sigma_{0,2}$, (σ_T) і δ_{5B} також визначені цільовими експериментальними дослідженнями. Розрахункові значення та результат розрахунку інтенсивності зношування представлені у таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Розрахункові значення та результат розрахунку інтенсивності зношування у відновленому сполученні обойма - цапфа.

c	β	$\sigma_{0,2}$, МПА	t_{II}	fa	k_f^{II}	δ_{5B}	I_{II}
0,78	0,25	270	2,27	0,63	1,1	0,13	$2,62 \cdot 10^{-5}$

З аналізу таблиць 1.4 та 1.7 випливає, що при відновленні працездатності ресурсовизначального сполучення підшипникова обойма - цапфа круглих шестеренних насосів, використовуючи запропоновану вище технологічну схему, можна забезпечити зносостійкість деталей на рівні нових та вище.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2 ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ШЕСТЕРЕННИХ НАСОСІВ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Експлуатаційна надійність насосів.

Аналіз експлуатаційної надійності шестеренних насосів є важливим аспектом забезпечення їх ефективної роботи та довговічності. Оцінка проводиться з урахуванням конструктивних, експлуатаційних і технологічних чинників. Основні етапи аналізу:

1. Визначення критеріїв надійності.

Безвідмовність: тривалість роботи без виходу з ладу. Довговічність: ресурс до першого капітального ремонту. Ремонтпридатність: легкість відновлення після відмови. Збережувальність: здатність зберігати характеристики при тривалому простої.

2. Основні фактори, що впливають на надійність

Конструктивні особливості:

- Геометрія зубів шестерень (точність обробки, зносостійкість).
- Міцність і якість матеріалів (сталі, чавуни, композити).
- Стан ущільнень і підшипників.

Експлуатаційні фактори:

- Робочий тиск і температура.
- Частота обертання та режим навантаження.
- Якість мастильного матеріалу (його в'язкість, стійкість до забруднень).

Технологічні фактори:

- Точність виготовлення та збирання.
- Термообробка зубчастих пар.
- Контроль відхилень при складанні.

3. Методи аналізу:

Теоретичні розрахунки:

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Розрахунок навантажень на зуби шестерень (контактна напруга, зусилля на вигин).

- Моделювання зносу зубців (наприклад, за моделлю Архарда).

Експериментальні дослідження:

- Випробування на стендах (оцінка продуктивності, температури, шуму).

- Моніторинг у реальних умовах експлуатації (діагностика вібрацій, аналіз мастила).

Прогнозування відмов:

- Використання моделей надійності, таких як модель Вейбулла.

- Аналіз статистики відмов у реальних умовах.

4. Поширені причини зниження надійності

- Знос і пошкодження зубчастих елементів, торцевих пластин через недостатнє змащення або перевантаження (рис. 2.1 – 2.2).

- Кавітація в насосах при порушенні режимів подачі.

- Гідро абразивне зношування елементів насосу (рис. 2.3 – 2.4).

- Розгерметизація ущільнень через втому матеріалів.

- Збільшення люфтів у підшипниках через тривалу експлуатацію.



Рисунок 2.1 – Вигляд зношеної торцевої пластини насосу НШ.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

5. Шляхи підвищення надійності

Оптимізація конструкції:

- Використання матеріалів із високою зносостійкістю [9, 10].
- Удосконалення профілю зубців (наприклад, евольвентний профіль).

Поліпшення експлуатаційних умов:

- Використання якісних мастильних матеріалів із додаванням присадок.

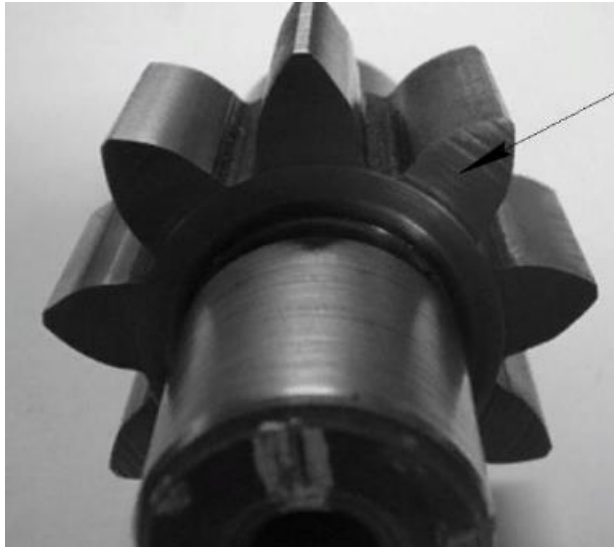


Рисунок 2.2 – Вигляд зношеної торцевої частини шестерні насосу НШ.



Рисунок 2.3 – Вигляд зношеної торцевої частини втулки насоса НШ

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Рисунок 2.4 – Вигляд зношеної цапфи і торця шестерні насосу НШ

2.2 Основні способи відновлення параметрів зношених деталей шестеренних гідронасосів

Відновлення параметрів зношених деталей шестеренних гідронасосів є ефективним способом подовження їх експлуатаційного ресурсу. Основні способи відновлення включають такі методи (рис. 2.5) [3]:

1. Відновлення зубчастих шестерень

Нарощування металу:

- Електродугове наплавлення: використовується для відновлення зношених зубців.
- Лазерне наплавлення: забезпечує точність і мінімальні термічні деформації.

Механічна обробка:

- Зачистка поверхні та повторне формування профілю зубців.
- Використання шліфування для досягнення заданої точності.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

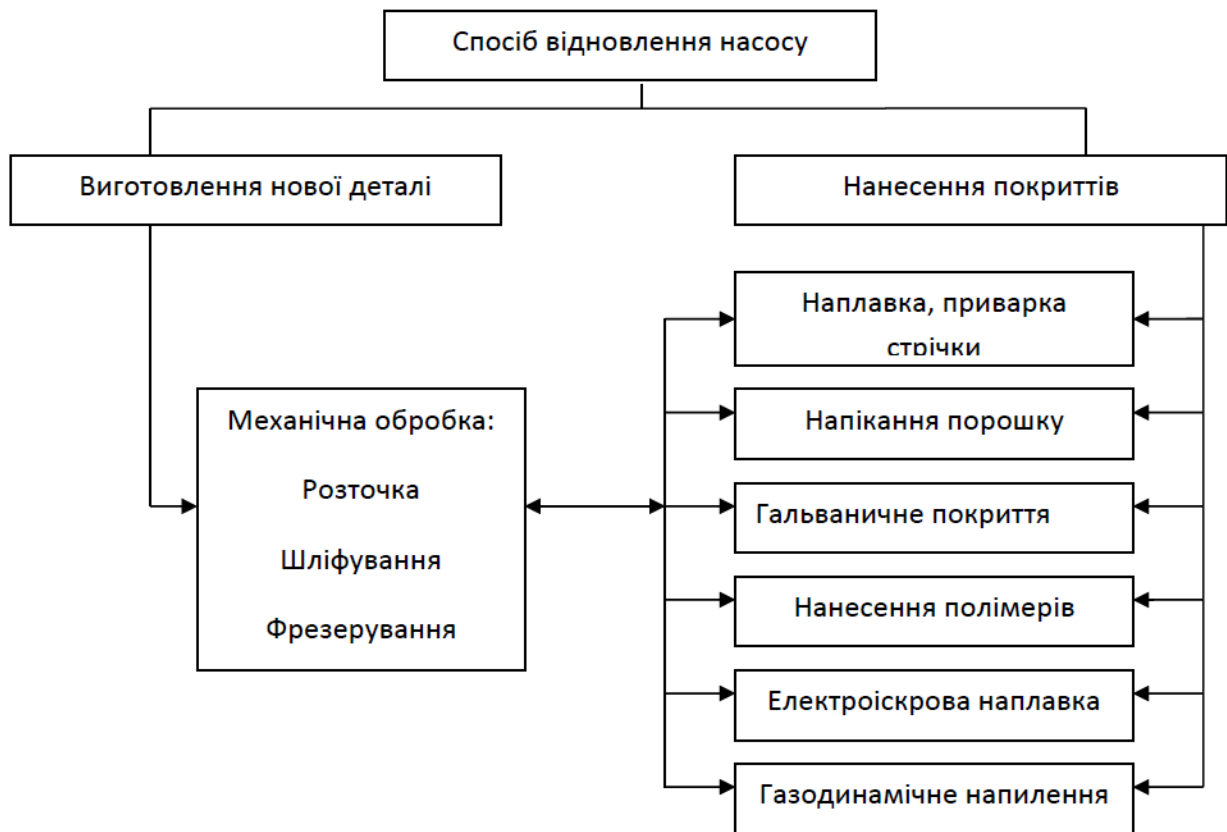


Рисунок 2.5 – Основні способи відновлення деталей насосів

Поверхнєве зміцнення:

- Азотування або цементація для підвищення твердості та зносостійкості.
- Індукційне нагрівання з наступним охолодженням для покращення міцності зубців.

2. Відновлення корпусу гідронасоса

Наплавлення та шліфування:

- Наплавлення зношених місць, таких як посадкові отвори чи площини ущільнень.
- Механічна обробка до заводських розмірів.

Гальванічне покриття:

- Нанесення шару хрому або нікелю для відновлення розмірів та покращення корозійної стійкості.

Полімерні композиції:

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

- Використання полімерів для відновлення посадкових поверхонь або ущільнень.

3. Відновлення валів

Наплавлення та механічна обробка:

- Електродугове або плазмове наплавлення зношених ділянок.
- Точіння та шліфування для досягнення необхідних розмірів.

Гальванічне покриття:

- Хромування або нанесення інших зносостійких покриттів.

Заміна втулок і підшипників:

- При зносі посадкових місць валу використовують заміну втулок із відновленням геометрії.

4. Відновлення ущільнень

Встановлення нових ущільнювальних кілець:

- Замінюють старі ущільнення на оригінальні або аналогічні за параметрами.

Обробка посадкових місць:

- Шліфування або хромування місць контакту ущільнень із корпусом чи валом.

Використання сучасних матеріалів:

- Полімерні або графітові ущільнення для підвищення зносостійкості.

5. Контроль якості після відновлення [10]:

- Перевірка геометричних параметрів відновлених деталей.

Перевірка геометричних параметрів відновлених деталей шестеренних гідронасосів є важливим етапом, що забезпечує відповідність деталей проектним розмірам та параметрам для гарантування їх нормальної роботи.

Основні етапи перевірки включають:

1. Підготовка до перевірки.

Очистка деталей:

- Видалення залишків мастила, забруднень, та інших сторонніх речовин.

Візуальний огляд:

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Оцінка якості поверхонь (наявність тріщин, пор, вибоїн чи інших дефектів).

Задання допусків і технічних параметрів:

- Визначення розмірів та точності на основі креслень і технічної документації.

2. Інструменти та обладнання для перевірки

Механічні інструменти: мікрометри, штангенциркулі, індикатори годинникового типу.

Оптичні інструменти: оптичні профілографи для аналізу зубців шестерень.

Координатно-вимірювальні машини (СММ): для високоточної перевірки складних геометричних параметрів.

Калібри та шаблони: використовуються для перевірки відповідності стандартним розмірам.

Набори плит і шаблонів для перевірки площинності та прямолінійності.

3. Основні параметри для перевірки.

3.1. Шестерні:

Модуль зубців: перевіряється за допомогою зубомірів або спеціальних індикаторів.

Точність профілю зубців: аналіз за допомогою профілографів.

Радіальне биття шестерні: заміряється індикаторами.

Шорсткість робочих поверхонь: визначається профілометром.

3.2. Корпус насоса:

Діаметри посадкових отворів: вимірюються внутрішніми мікрометрами.

Площинність і перпендикулярність поверхонь: перевіряються за допомогою контрольних плит і щупів.

Геометрична форма (циліндричність, конусність): контролюється за допомогою індикаторних пристроїв або СММ.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Вали:

Діаметр і овальність посадкових місць: заміряється мікрометрами.

Радіальне биття та прямолінійність валу: визначається за допомогою обертових індикаторів.

Шорсткість поверхні: аналізується за допомогою профілометра.

3.4. Ущільнення:

Розміри посадкових місць: вимірюються калібрами.

Концентричність отворів: перевіряється за допомогою СММ або індикаторів.

4. Процес перевірки:

- Порівняння з технічними вимогами: результати вимірювань порівнюються з проектними значеннями та допусками.
- Внесення коригувань: у разі виявлення відхилень проводяться додаткові операції обробки (шліфування, хонінгування тощо).
- Документування результатів: вимірювання заносяться в протокол перевірки, який використовується для оцінки якості відновлених деталей.

5. Результати перевірки

- Деталі, що відповідають технічним вимогам, допускаються до складання.
- У разі невідповідності проводиться додаткове відновлення або заміна деталі.

Цей комплексний підхід дозволяє забезпечити високу якість відновлених деталей та їх надійну роботу в складі гідронасоса.

Гідравлічні випробування на герметичність та продуктивність.

Гідравлічні випробування на герметичність і продуктивність є ключовими етапами контролю якості шестеренних гідронасосів після ремонту або відновлення. Вони дозволяють перевірити, чи відповідає насос технічним вимогам і чи здатен він працювати в заданих умовах без витоків і з потрібною ефективністю.

1. Мета випробувань

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

- Перевірка герметичності гідравлічної системи насоса.
 - Визначення відповідності продуктивності (подачі рідини) заданим параметрам.
 - Виявлення можливих дефектів складання чи відновлення.
 2. Підготовка до випробувань
 1. Попередня перевірка насоса:
 - Візуальний огляд на наявність механічних пошкоджень.
 - Перевірка затяжки з'єднань і кріплень.
 2. Установлення насоса на стенд:
 - Насос фіксується на спеціальному стенді, що має вимірювальні прилади (манометри, витратоміри, тахометри).
 - Підключення до джерела робочої рідини (звичайно це масло або вода з інгібітором корозії).
 3. Задавання умов випробувань:
 - Вибір параметрів: робочий тиск, швидкість обертання, температура рідини.
 - Використання рідини, яка відповідає характеристикам експлуатаційної (в'язкість, щільність).
3. Випробування на герметичність
 1. Процедура:
 - подача робочої рідини під тиском до гідронасоса.
 - Підвищення тиску до номінального або перевищеного значення (зазвичай на 10-20 % вище від робочого тиску).
 - Утримання тиску протягом певного часу (наприклад, 10-30 хвилин).
 2. Контрольні параметри:
 - Відсутність витоків на з'єднаннях, корпусі, ущільненнях.
 - Стабільність тиску в системі.
 3. Оцінка результатів:
 - Якщо виявлено витoki, проводиться ремонт або додаткове ущільнення проблемних місць.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- У разі відсутності дефектів насос визнається герметичним.

4. Випробування на продуктивність

1. Процедура:

- Насос запускається на різних режимах роботи (мінімальне, номінальне і максимальне навантаження).

- Вимірюється обсяг робочої рідини, яку насос подає за одиницю часу (л/хв або м³/год).

2. Контрольні параметри:

- Продуктивність насоса має відповідати паспортним даним.

- Контроль відсутності падіння продуктивності при зміні навантаження.

3. Випробування на ККД:

- Оцінка співвідношення механічної потужності, що подається на вал, і гідравлічної потужності насоса.

5. Аналіз результатів випробувань

Герметичність: насос вважається придатним, якщо не виявлено витоків і падіння тиску.

Продуктивність: насос відповідає вимогам, якщо його продуктивність не нижче 95-98 % від заявленої (в залежності від стандартів).

Наявність шумів або вібрацій: виявлення сторонніх шумів чи надмірної вібрації вказує на можливі дефекти (неправильне складання, зношення деталей).

6. Документування результатів

Результати випробувань записуються в протокол, який містить:

- Робочий тиск і частоту обертання.

- Продуктивність і витрати рідини.

- Відповідність нормам герметичності.

- Висновок про придатність насоса до експлуатації.

7. Заключні дії

- Насос, що пройшов випробування, допускається до експлуатації.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Якщо виявлені дефекти, виконується повторне регулювання, відновлення або заміна пошкоджених елементів.

Такі випробування є обов'язковими для забезпечення безпечної та ефективної роботи шестеренних гідронасосів.

Контроль твердості, міцності та зносостійкості поверхонь.

Контроль твердості, міцності та зносостійкості поверхонь деталей шестеренних насосів є важливим етапом для оцінки їх довговічності та надійності. Він дозволяє переконатися, що відновлені або виготовлені деталі відповідають технічним вимогам і здатні працювати у заданих умовах.

1. Контроль твердості:

Методи вимірювання:

1. Метод Роквелла (HR):

- Використовується для визначення твердості сталевих деталей.
- Використовується масштаб HRC для загартованих поверхонь або HRB для м'якших матеріалів.
- Приклад: перевірка зубчастих поверхонь шестерень.

2. Метод Бринелля (HB):

- Підходить для масивних деталей, таких як корпус насоса.
- Вимірює твердість у вигляді відношення навантаження до площі відбитка кульки.

3. Метод Віккерса (HV):

- Застосовується для тонких шарів, наприклад, покриттів або зміцнених поверхонь.
- Підходить для деталей із дрібними зонами контакту.

4. Ультразвуковий метод:

- Неінвазивний і швидкий метод для контролю деталей, що важко обробити.

Оцінка результатів:

- Твердість повинна відповідати заданим параметрам у кресленнях або технічній документації.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Відхилення можуть свідчити про дефекти термообробки чи наплавлення.

Ці методи забезпечують економічно вигідне відновлення деталей шестеренних гідронасосів і дозволяють подовжити їх експлуатаційний ресурс без заміни на нові компоненти.

2.3 Метод електроіскрової обробки.

Електроіскрова обробка було запропоновано відомими вченими Н. І. та Б. Р. Лазаренко ще у 1943 році. Вона заснована на використанні іскрового розряду. При цьому в каналі розряду температура досягає 10000 °С, розвиваються значні гідродинамічні сили, але самі імпульси відносно короткі і, отже, містять мало енергії, тому вплив кожного імпульсу на поверхню матеріалу невелика. Метод дозволяє отримати хорошу поверхню, але не має достатньої продуктивності. Крім того, при цьому методі знос інструменту відносно великий (досягає 100% обсягу знятого матеріалу) [11-12].

Електроіскрова обробка - це процес імпульсного мікрозварювання, який використовується для дрібного і точного ремонту зношених чи неправильно виготовлених компонентів. Електроіскрова обробка також відома як іскрове зміцнення, електроіскрове зміцнення, електроіскрове легування, наплавлення в імпульсному розплаві та наплавлення в імпульсному електроді. Основні промислові застосування включають усунення дефектів у ливарних формах та інструментах для лиття під тиском. Системи електроіскрового осадження містять конденсаторне джерело живлення, яке генерує короткі імпульси сильного струму через дровий витратний електрод, що обертається. Матеріал електрода осідає на заготівлі за допомогою електричних іскор способом, зворотним іскрової ерозії. У процесі електроіскрової обробки електрод є анодом, а заготівля – катодом. Коли енергія конденсатора вивільняється, постійний струм генерує плазмову дугу при високій температурі (від 8000 до 25000 ° С) [13] між наконечником

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

електрода і оброблюваною деталлю. Плазмова дуга іонізує витратний матеріал, та невелика кількість розплавленого електродного матеріалу переноситься на заготовлю. Передача матеріалу відбувається швидко, а самозагасання відбувається дуже швидко. Ґрунтуючись на коротких тривалих імпульсах сильного струму, процес забезпечує низьке підведення тепла до матеріалу підкладки, що призводить до незначної зміни мікроструктури підкладки або її відсутності.

Таким чином, цей спосіб дає перевагу перед процесами зварювання плавленням (включаючи дугове, лазерне та контактне зварювання) при ремонті матеріалів, які важко зварювати через погані властивості зони термічного впливу (наприклад, розтріскування внаслідок псевдозрідження, високої твердості, низької ударної в'язкості). Компоненти можуть бути відновлені до їх початкових розмірів, оскільки при такому низькому підведенні тепла об'ємний матеріал підкладки залишається близьким до температури навколишнього середовища, що дозволяє уникнути теплових спотворень, усадки та високих залишкових напружень. Крім того, цей процес створює хороший металургійний зв'язок між покриттям та підкладкою.

Електроіскрова обробка особливо підходить для усунення дрібних дефектів, але не підходить для великих дефектів, оскільки процес йде повільно, а максимальна товщина покриття становить близько 2 мм.

Для відновлення деталей шестеренного насосу можна використати принцип процесу електроіскрового легування. На рис. 2.2 наведена загальна схема процесу ЕІЛ з вібруючим анодом у вигляді компактного електрода і зображення верхнього шару, що утворюється [12].

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

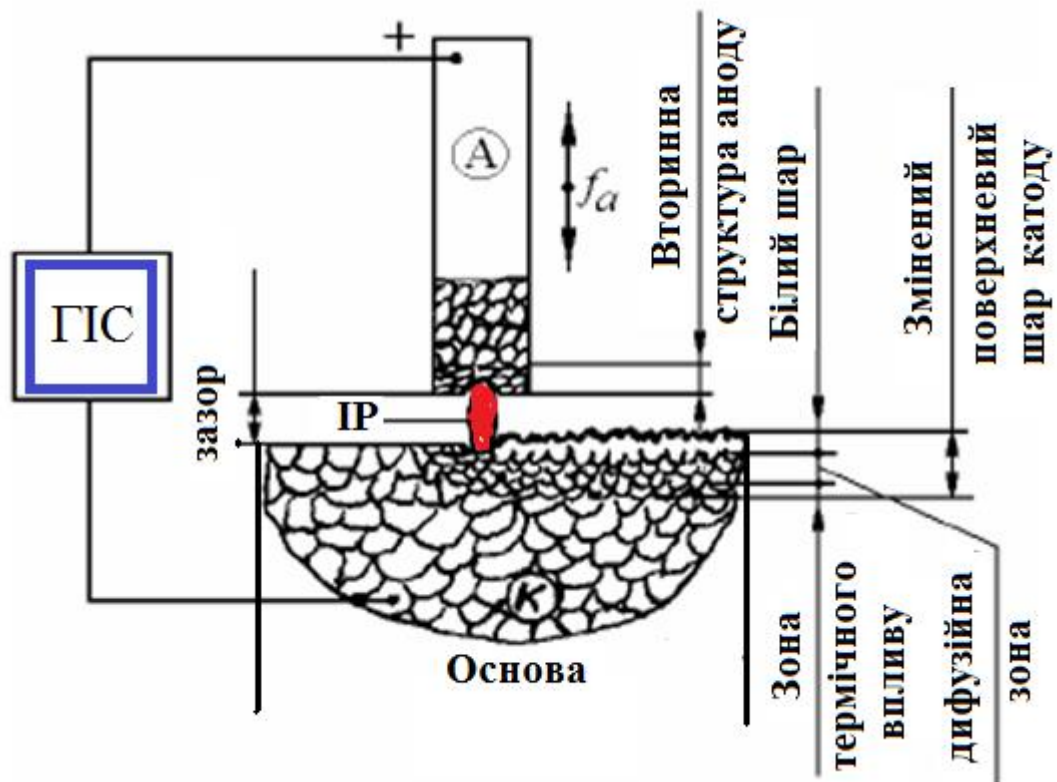


Рисунок 2.2 – Схема електроіскрового легування (ЕІЛ):

ГІС - генератор імпульсного струму; ІР – іскровий розряд; А – анод; К – катод

Процес ЕІЛ починається зі зближення анода (електроду) з катодом (деталлю). На відстані між ними, що дорівнює пробивному, починається розвиток іскрового розряду тривалістю $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с, який у багатьох випадках завершується при контакті електродів [14].

При невеликій напругі між електродами ($U < 100$ В) можливий контактний початок розряду від накопичувального конденсатора генератора імпульсів. Після пробою міжелектродного проміжку (МЕП) за рахунок енергії, що надходить від генератора імпульсів, на поверхнях електродів розвиваються локальні осередки плавлення, випаровування, що викликають електричну ерозію матеріалів електродів (анода та катода).

Переважає перенесення еродованого матеріалу анода на катод забезпечує формування на ньому зміненого поверхневого шару. Після

закінчення імпульсного іскрового розряду та відходу анода від катода завершується розрив електричного кола. Реалізація безперервного процесу ЕІЛ за рахунок періодичної комутації анода з катодом здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад, вібратора із закріпленим на ньому анодом. Конструктивно розроблені інші пристрої періодичної комутації, в тому числі і для процесів формування покриттів методом ЕІЛ порошковими матеріалами [15].

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика оцінки значень параметрів шорсткості поверхонь.

Для оцінки шорсткості поверхні ГОСТ 2789-73 передбачає низку параметрів:

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю від середньої лінії;

R_{max} – максимальна відстань пік-впадин профілю в межах базової довжини;

R_p – максимальна висота виступу межах базової довжини;

t_r - Відносна опорна довжина профілю, на рівні перерізу r .

Вимірювання параметрів шорсткості поверхонь проводилося з використанням сучасного комплексу "Form Talysurf".

Нанесення покриттів при механізованій електроіскровій обробці проводили з використанням незалежного генератора «ELITRON-22В», на 5 енергетичному режимі (енергія імпульсу $A_E = 1,66$ Дж).

Покриття наносили на зовнішні циліндричні поверхні 25 мм, при частоті обертання зразка 1,82 об/хв і поздовжньої подачі обертового стрижневого електрода 0,26 мм/об. Діаметр електрода 3,8 мм.

Розглядалися покриття, нанесені електродами із сталі 65Г та зварювального дроту Св08 на зразки зі сталі 18ХГТ.

Базові довжини досліджуваних філограм приймали відповідно до ГОСТ 2789-73. Параметри шорсткості R_a , R_{max} , R_p визначали з використанням спеціальних пакетів прикладних програм "Talumar Control" і «Talumar Gold», встановлюючи їхнє середнє арифметичне за вимірами в поздовжньому та поперечному напрямках. При довірчій ймовірності 0,90, коефіцієнт варіації 0,21, показник надійності 15 %, кількість повторностей у кожному напрямі прийнято щонайменше 8.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Узагальнення результатів вимірювань параметрів шорсткості електроіскрових покриттів, сформованих різними електродними матеріалами, засноване на порівнянні середніх значень за t-критерієм Стьюдента для незалежних вибірок.

Вибір параметрів шорсткості порівнювали з вибіркою, у якої середнє арифметичне найменше. Нульова гіпотеза звучить так: середні значення двох груп вимірів параметра шорсткості рівні, альтернативна – середні значення у групах не рівні. Якщо рівень значущості поточного значення t-критерію Стьюдента p_t вище прийнятого значення $p = 0,05$, то має місце нульова гіпотеза, і навпаки.

Для застосування даного критерію перевіряли припущення, що значення вимірювань у кожній із груп нормально розподілені та їх дисперсії рівні. Нормальність груп вимірювань перевіряли за критерієм Шапіро-Вілка (W). Нульова гіпотеза звучить так: розподіл вимірювань параметра шорсткості близько до нормального, альтернативна – ні. Якщо рівень значимості поточного значення W -критерію p_w вище прийнятого значення $p = 0,05$, то має місце нульова гіпотеза, і навпаки.

Оцінку однорідності дисперсій двох досліджуваних груп вимірів проводили за критерієм Левіна. Нульова гіпотеза звучить так: однорідність дисперсії ϵ , альтернативна – ні. Якщо рівень значущості поточного значення критерію Левіна p_L вище прийнятого значення $p = 0,05$, то має місце нульова гіпотеза, і навпаки.

Комплексну характеристику шорсткості поверхонь після механічної обробки та ЕІ покриттів, що не вимагають подальшої механообробки, розраховували за формулою [5]:

$$\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{*1/v}}, \quad (3.1)$$

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

де r – наведений радіус вершин виступів, мкм; b та ν – параметри степеневі апроксимації початкової частини опорної кривої профілю.

Наведений радіус вершин виступів визначається як середнє геометричне поздовжнього r^{n^6} і поперечного r^n напрямків вимірювань радіусів, мкм [5]:

$$r = \sqrt{r^{n^6} r^n}, \quad (3.2)$$

Радіуси визначали за допомогою програми «Talymap Control», середня їх по щонайменше восьми найвищим виступам на базовій довжини.

На рисунку 3.1 показані найвищі радіуси та значення одиничних виступів на базовій довжині філограми.

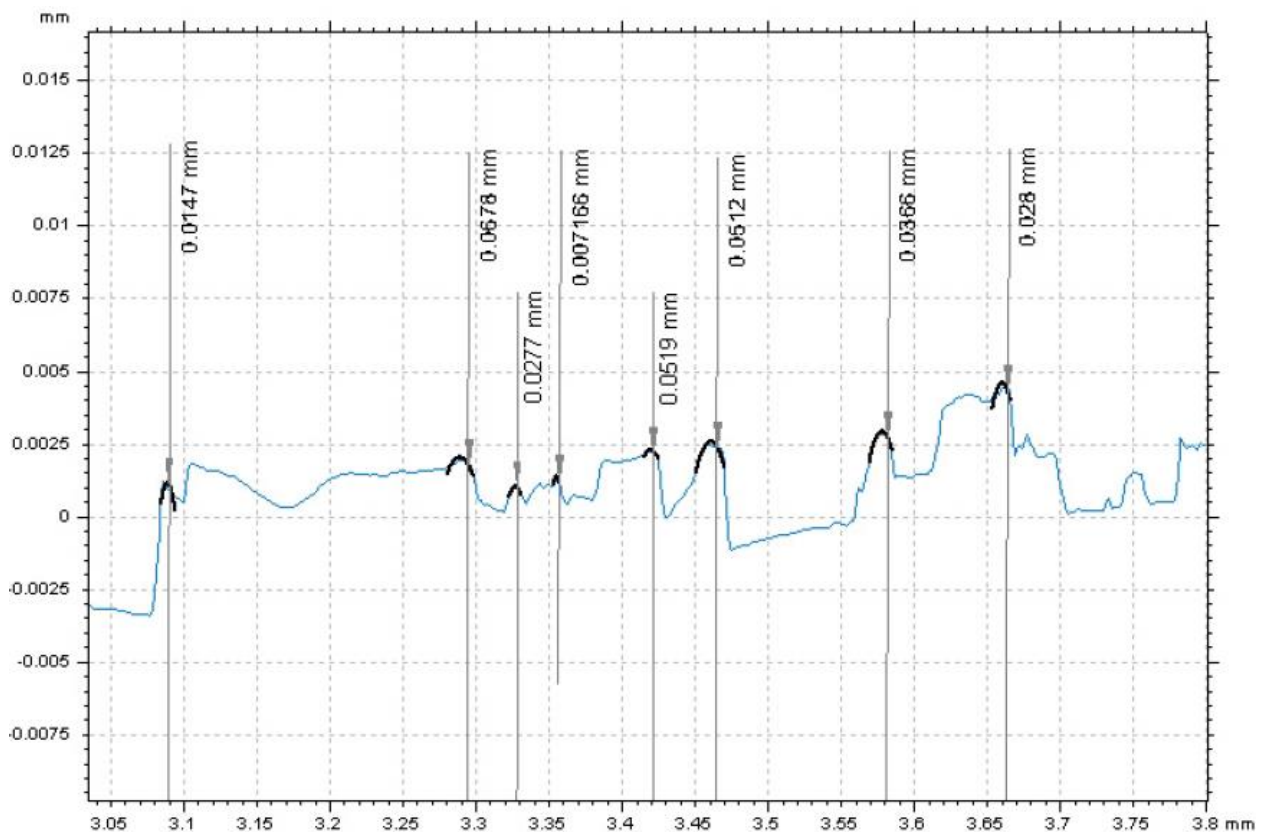


Рисунок 3.1 – Визначення радіусів одиничних виступів на базовій довжині філограми з використанням програми «Talymap Control».

Параметри статичної апроксимації початкової частини опорної кривої профілю b^* і v визначали за відомими залежностями [5]

$$b^* = t_m \left(\frac{R_{max}}{R_p} \right)^v, \quad (3.3)$$

$$v = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1, \quad (3.4)$$

де t_m - відносна опорна довжина по середній лінії:

$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta l_{m_i}}{l_{\bar{0}}}, \quad (3.5)$$

де Δl_{m_i} - довжина перерізу i -ого виступу на рівні середньої лінії, що визначається із філограми, мм.

3.2 Дослідження мікротвердості покриттів, утворених методом електроіскрової обробки

Випробування мікротвердості електроіскрових покриттів проводилося по методом відновленого відбитка відповідно до ГОСТ 9450-76.

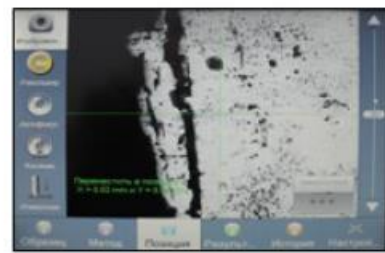
Сутність методу полягає у нанесенні на випробувану поверхню відбитка під дією статистичного навантаження, прикладеного до алмазного наконечнику протягом певного часу. Після видалення навантаження та вимірювання параметрів отриманого відбитка число мікротвердості визначається для чотиригранної піраміди з квадратною основою формулі:

$$H_{\mu} = 0,189 \frac{F_V}{d_v^2}, \quad (3.6)$$

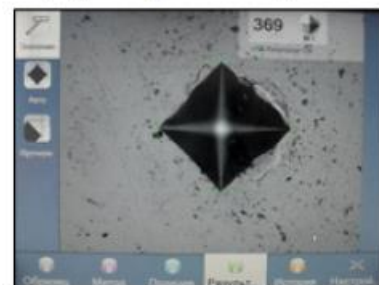
					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

де F_V - сила, прикладена до алмазного наконечника, Н; d_v – середнє арифметичне діагоналі квадрата відбитка, мм.

Для дослідження використовували мікротвердомір Dura Scan 20 (рис. 3.2), призначений для вимірювання мікротвердості металів та сплавів вдавленням алмазного наконечника з автоматичною обробкою результатів та виведенням їх на ПК.



Меню: позиція, вибір точки вдавлення



Меню: результат, вдавлення алмазної піраміди

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд та інтерфейс панелей керування мікротвердоміра Dura Scan 20.

Розподіл мікротвердості за глибиною досліджували на зразках у вигляді плиток, розміром 20x40x10, виготовлених з алюмінієвого сплаву АК5М7, на поверхню яких наносили електроіскрові покриття електродами з міді, молібдену, вольфраму та графіту. Обробка ручна, режими нанесення покриттів представлені у таблиці 3.2.

Мікрошліфи з поперечним розрізом виготовлялися на відрізному верстаті Discotom-6 (рис. 3.3 а) з подачею ЗОР, що виключало нагрівання поверхні зрізу. З метою виключення «заокруглення» поверхневого електроіскрового шару при механічній обробці, фрагменти зразків

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

запресовували у гарячу смолу. Запресування проводилося з використанням автоматичного преса CitoPress-1 (рис. 3.3 б). Режими запресування зразків наведено у таблиці 3.1.

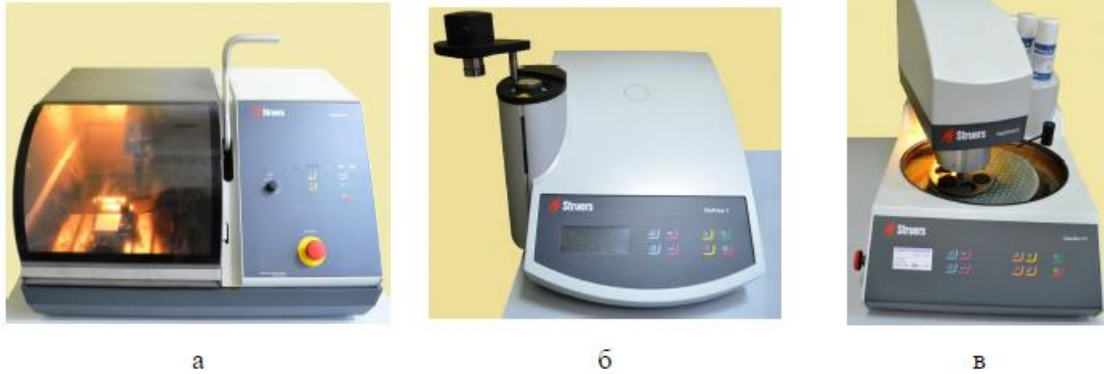


Рисунок 3.3 – Устаткування для підготовки шліфів:

а - відрізний верстат Discotom-6, б - циліндричний прес CitoPress-1, в - шліфувально-полірувальний верстат Tegra Pol-21 з приставкою для автоматичного оброблення Tegra Force-5

Таблиця 3.1 – Режими запресування зразків для дослідження мікротвердості.

Діаметр циліндра, мм	Тип смоли	нагрів			охолодження	
		час, хв	температура, °C	тиск, bar	час, хв	швидкість
40	Miltifast	4,5	180	250	3	висока

Поверхні запресованих зразків обробляли на шліфувально-полірувальному верстаті Tegra Pol-21 з приставкою для автоматичної обробки Tegra Force-5 (рис. 3.3, в) у кілька етапів: вирівнювання, тонке шліфування, чорнове та чистове полірування. Режими механічної обробки зразків із кольорових металів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Режими механічної обробки зразків із кольорових металів [16, 17].

Режим, витратний матеріал	вирівнювання	тонке шліфування	полірування чорнове	полірування чистове	оксидне полірування
Тип диска	Абразивний папір - 220	MD-Largo	MD-Mol	MD-Nap	MD-Chem
Тип суспензії	вода	діамантова, 9 мкм	діамантова, 3 мкм	діамантова, 1 мкм	оксидна суспензія OP-S
Швидкість обертання диска, об/хв	300	150	150	150	150
Зусилля на мікрошліфи, Н	30	30	30	25	15
Час підготовки, хв	До вирівнювання	2	2	2	1

При визначенні мікротвердості на поперечних шліфах з електроіскровими покриттями виконували такі вимоги:

- відстань від центру відбитка до краю покриття має бути не меншою одного розміру відбитка;

- відстань між центрами відбитків, нанесених на поверхню покриття має перевищувати розмір відбитка більш ніж у три рази.

Виміри проводили по лініях, паралельних поверхні покриття, кількість уколів на лінії щонайменше 10.

Кількість ліній вимірів, паралельних поверхні покриття в глиб, визначалося досягненням мікротвердості основного металу.

Сила навантаження на індентор становила від 0,1 до 5 Н, час навантаження 5-15 с.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Кількість повторностей дослідів – 5 (при довірчій ймовірності 0,95, коефіцієнт варіації 0,1 і показник надійності 10 %).

Аналіз результатів вимірювання мікротвердості покриттів, утворених методом електроіскрової обробки, заснований на використанні критеріїв значення математичної статистики. Застосування цього підходу для узагальнення результатів вимірювань обумовлено припущенням про неоднорідності фазового складу покриттів, наявністю пор та дефектів, помилками при вимірі.

При аналізі даних розглядали гіпотезу про порівняння середніх значень мікротвердості двох груп вимірів по глибині шару, застосувавши t -критерій Стьюдента для незалежних вибірок Нульова гіпотеза звучить так: середні значення двох груп вимірювань мікротвердості за глибиною шару рівні, альтернативна – середні значення у групах не рівні. Якщо рівень значимості поточного значення t -критерію Стьюдента p_t вище прийнятого значення $p = 0,05$, то має місце нульова гіпотеза, і навпаки.

Для застосування цього критерію необхідно перевірити припущення про те, що значення вимірювань у кожній із груп нормально розподілені та їх дисперсії рівні.

Нормальність груп вимірювань перевіряли за критерієм Шапіро-Вілка Нульова гіпотеза звучить так: розподіл вимірів на досліджуваній глибині зміненого поверхневого шару близько до нормального, альтернативна – ні. Якщо рівень значущості p_w вищий за прийняте значення $p = 0,05$, то має місце нульова гіпотеза, і навпаки.

Оцінку однорідності дисперсій двох досліджуваних груп вимірів мікротвердості на глибині проводили за критерієм Левіна. Нульова гіпотеза звучить так: однорідність дисперсії ϵ , альтернативна – ні. Якщо рівень значимості поточного значення критерію Левіна p_l вище за прийняте значення $p = 0,05$, то має місце нульова гіпотеза, і навпаки.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Методика визначення пластичних властивостей поверхонь зразків

Гранична пластична деформація – це деформація, відповідна моменту руйнування металу. Цей параметр характеризує пластичність матеріалу та при лабораторних випробуваннях. виражається як відносне подовження - δ_{5B} .

Для експериментальної оцінки відносного подовження поверхневих шарів металів застосовується метод вдавлювання в досліджувану поверхню наконечника з діамантовим конусом [17].

Сутність методу полягає у вдавлюванні наконечника з алмазним конусом у випробовуваний зразок (виріб) під дією навантаження, вимірювання глибини відновленого відбитка t та його діаметра d , значенням яких оцінюють відносне подовження при розтягуванні поверхневих шарів металів. При впровадженні індентора у поверхню випробовуваного зразка, що має пластичність, навколо пластичного відбитка утворюється наплив витісненого матеріалу (внаслідок обмеженої можливості останнього до течії). Розподіл обсягу матеріалу в зоні напливу залежить від механічних характеристик деформованого середовища і, перш за все, його здатності пластично деформуватися, не руйнуючись. При цьому рівні витіснені обсяги матеріалів, що володіють різною здатністю до пластичної деформації, що розподіляються в зоні напливу по-різному, наприклад, як схематично зображено на рисунку 3.4.

При однаковій глибині відновленого відбитка від впровадження конічного індентора, у середовища з більшою пластичністю діаметр відбитка по вершині напливу d_{B2} (рис. 3.4 б) має бути менше, ніж у середовища з меншою пластичністю d_{B1} (рис. 3.4 а). Це є особливістю даного методу визначення пластичності, оскільки її величина, таким чином, є функцією не одного, а двох щодо незалежних один від одного параметрів пластичного відбитка (h і d_B), за значеннями яких оцінюють відносне подовження при розтягуванні поверхневих шарів металів.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

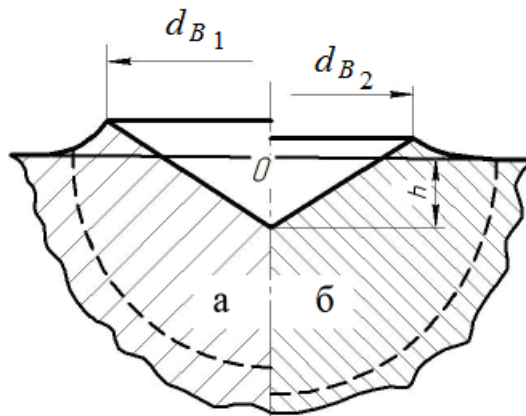


Рисунок 3.4 – Профіль відбитка при вдавлюванні конічного індентора в метал низькою (а) та високою (б) пластичністю.

Як досліджувані зразки прийняті:

- алюмінієвий сплав АК5М7;
- алюмінієвий сплав АК5М7 з електроіскровим покриттям із міді;

Зразки готували з дотриманням таких вимог:

- поверхня, на якій проводиться вимірювання, повинна допускати виконання не менше ніж шести відбитків;
- параметр шорсткості Ra опорної поверхні зразка має бути не більше 0,8 мкм, а поверхні, що випробовується, - не більше 0,2 мкм за ГОСТ 2789-73.

Для проведення випробувань з метою контролю глибини впровадження h , алмазний наконечник типу НК (ГОСТ 9377-81), що застосовується для вимірювання твердості за методом Роквелла, був встановлений на випробувальну машину UAI-7000 М (рис. 3.5)

Під час проведення випробувань, на досліджувану поверхню кожного зразка наносилося по 5 відбитків на задану глибину h , маючи при цьому їх рівномірно по підготовленій ділянці поверхні. Глибину застосування конуса для кожної обробленою методом ЕІО поверхні приймали індивідуально (згідно з результатами дослідження мікротвердості), виходячи з того, щоб

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

товщина зміцненого шару або покриття після механічної обробки була більше значення h щонайменше, ніж 20 %. Глибина застосування конуса для не оброблених методом ЕІО поверхонь прийнята рівною $h = 0,2$ мм. Вимірювання діаметра відбитків d проводилося за допомогою аналізатора фрагментів мікроструктури твердих тіл Siams 700 (рис. 3.6) на базі оптичного мікроскопа (GX51 Olympus).



Рисунок 3.5 – Універсальна випробувальна машина UAI-7000 М

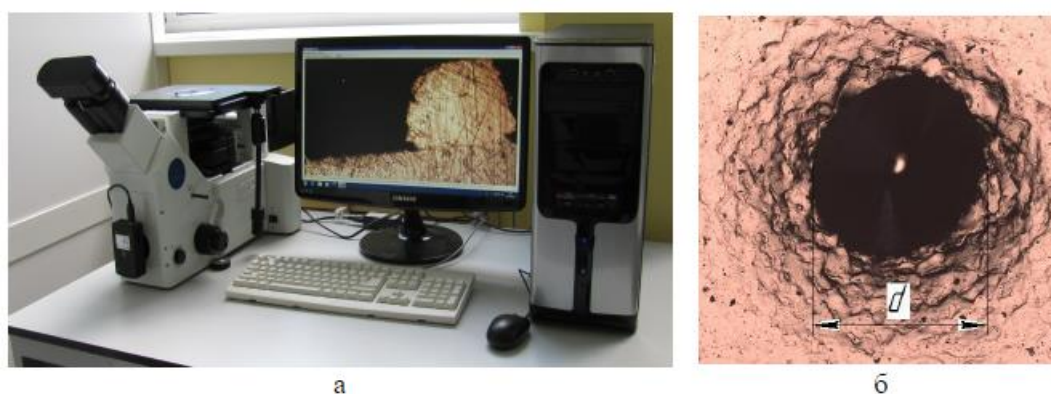


Рисунок 3.6 – аналізатор фрагментів мікроструктури твердих тіл Siams 700 (а); знімок відбитка, отриманий на зразку (б)

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

При цьому вимір діаметрів кожного з п'яти відбитків здійснювалося у двох взаємно перпендикулярних напрямках, після чого визначалося середнє арифметичне значення. Різниця вимірів діаметрів одного відбитка має перевищувати 0,02 від меншого їх.

Потім, для кожного з п'яти відбитків визначали коефіцієнт у формулі:

$$y_i = \frac{h_i}{d_i}, \quad (3.7)$$

і для кожного зразка знаходили середнє арифметичне за формулою:

$$y = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y_i . \quad (3.8)$$

Значення параметра відносного подовження δ_{5B} приймали в залежно від значення коефіцієнта y за таблицею, поданою в [5].

3.4 Методика визначення умовної межі плинності поверхонь зразків.

Межею плинності називають механічну характеристику матеріалу, характеризує напругу, при якому деформації продовжують зростати без збільшення навантаження.

Застосування традиційних методів визначення механічних властивостей (випробування на розтягування вирізаних зразків) має об'ємний характер і не дозволяє отримати дані щодо межі плинності поверхневих шарів або покриттів. А випробування на розтягування вирізаних електроіскрових покриттів або зміцнених шарів не є можливим через малу товщину (від 50 мкм) та їх неоднорідної структури. До того ж підготовка таких зразків – процес досить трудомісткий і часом неможливо правильно поділити основу від покриття або від зміцненого шару.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Існує метод визначення умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$ металевих поверхонь виміром твердості на межі плинності $H_{0,2}$ вдавнення кулі (ГОСТ 22762-77). Твердість на межі плинності характеризується напругою в лунці при вдавлюванні кулі, коли у ній з'являється середня залишкова деформація, близька до 0,2 %, що виникає при відношенні діаметра лунки до діаметра кулі, що дорівнює 0,09. Для здійснення даного експерименту необхідно фіксувати глибину проникнення кульки та навантаження. У зв'язку з цим, для визначення твердості на межі плинності, індентор з кулькою діаметром $D=10$ мм був встановлений на випробувальну машину UAI-7000 М (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Універсальна випробувальна машина UAI-7000 М.

Метод виміру твердості на межі плинності відноситься до методу неруйнівного контролю. Мінімальна товщина досліджуваного зразка має бути не менше 8-кратної розрахованої глибини відбитка h . Параметр шорсткості Ra досліджуваної поверхні зразка повинен бути не більше 0,32 мкм.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Для досліджень прийнято такі ж зразки, що і для визначення відносного подовження (п. 3.4). При проведенні випробувань, досліджувану поверхню за допомогою випробувальної машини впроваджується індентор із кулькою діаметром $D=10$ мм на глибину $h = 0,02$ мм. При цьому фіксується додане на кульку навантаження F .

Після проведення випробувань твердість на межі плинності ($H_{0,2}$) визначали за формулою:

$$H_{0,2} = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d_{в}^2} \right)} = 156,9 \frac{F}{D^2}, \quad (3.9)$$

де $d_{в}$ - діаметр відбитка, мм.

Значення умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$ приймається за значенням твердості межі плинності з таблиці [16].

3.5 Методика визначення питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків на межі поділу двох твердих тіл.

Для визначення питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків на межі розділу двох твердих тіл найбільшого поширення набув спосіб, який полягає в тому, що при визначенні опору відносному руху виключаються або зводяться до зневажливо малої величині опору, обумовлені деформуванням поверхневих шарів. Цього можна досягти, якщо кульовий індентор 1 (рис. 3.8), запресований в оправку 3, здавлювати між плоскою паралельними зразками 2 нормальною силою F_N і одночасно обертати його [19].

Дослідження проводили на зразках без покриттів, виготовлених з матеріалів деталей пар тертя гідроагрегатів, та з покриттями, нанесеними методом ЕЮ та ФАБО. Вимоги до зразків представлені у таблиці 3.3.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

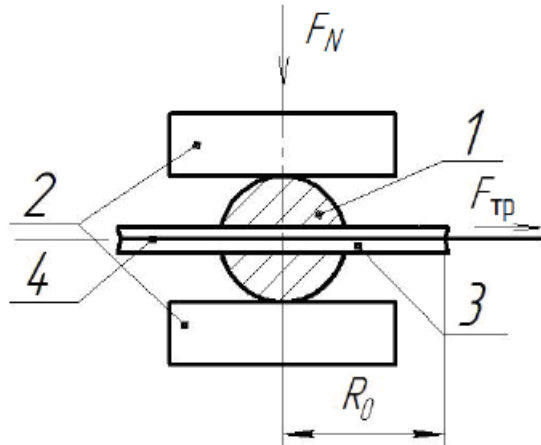


Рисунок 3.8 – Схема визначення питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків межі поділу двох твердих тіл.

Таблиця 3.3 – Вимоги до зразків досліджуваних пар тертя.

Матеріал зразка пари тертя		Покриття	НВ	Δ	
1	Що зношує	сталь 18ХГТ	без ЕП покриття	-	$2,1 \times 10^{-3}$
	Що зношується	АК5М7	без ЕП покриття	87	-
2	Що зношує	сталь 18ХГТ	ЕП зі сталі 65 Г	-	$1,9 \times 10^{-3}$
	Що зношується	АК5М7	ЕП з міді М1	205,2	-

Плоскі зразки розміром 20×40 мм та товщиною не менше 7 мм виготовляли із зношуваних матеріалів зразків (табл. 3.3). Робочі поверхні обробляли в залежності від вимог до якості поверхонь деталей пар тертя (табл. 3.3).

Індентор у вигляді кулі виготовляли з матеріалів пар тертя, що зношуються.

Для проведення експерименту діаметр кулі приймали не менше 15 мм з метою зручності подальшої його механічної обробки. Потім кульовий індентор запресовували у виправлення у вигляді шків. радіусом 25 мм, по колу якого пропускали трос 2 мм. Один кінець троса кріпили до оправки, а

протилежний до електронного динамометра Sauter FL 200. Потім плавно, без ривків, тягли за динамометр і фіксували значення сили тертя $F_{тр}$.

Весь пристрій змонтовано на розривній машині Hegewald&Peschke, яка забезпечує плавне нормальне навантаження на плоскі зразки з точністю до 1 Н (рис. 3.9).

За умови пластичного або пружно-пластичного деформування в зонах контакту, що надається навантаження F_N повинна бути такою, щоб забезпечувалося відношення діаметрів відбитків до діаметра індентора $0,064 \leq d/D \leq 0,6$.

Враховуючи, що у такому діапазоні зміни діаметрів відбитків середні напруження на контакті незмінні і дорівнюють твердості, навантаження, при яких необхідно проводити випробування при пластичному або пружно-пластичному контакті, змінюються в межах:

$$0,126 \cdot 10^{-3} \cdot R_K^2 \cdot HB \leq F_N \leq 1,26 \cdot R_K^2 \cdot HB, \quad (3.10)$$

де R_K - радіус кульового індентора, мм.

У таблиці 3.4 представлені значення нормального навантаження F_N прийняті щодо випробувань, з урахуванням умови 3.7.

Величина дотичних напружень за вимірною силою тертя, необхідної для обертання щодо осі симетрії, перпендикулярної до робочих поверхонь плоских зразків, визначається співвідношенням [5]:

$$\tau_n = \frac{3F_{тр}R_0}{4\pi r_B^3}, \quad (3.11)$$

де R_0 - радіус оправки, мм; r_B - середній радіус відбитків на протилежних пластинах, мм.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Діаметри відбитків вимірювали за допомогою аналізатора фрагментів мікроструктури твердих тіл Siams 700 (рис. 3.6 а) на базі оптичного мікроскопа Olympus GX51.

Фрикційні параметри τ_0 та β визначали методом розвантаження графічно [5]. Для цього знаходили координати τ_n та p_r першої точки функції $\tau_n = \psi(p_r)$. При пластичних та пружно-пластичних деформаціях у зоні контакту значення p_r обчислюється за такою формулою:

$$p_r = \frac{F_N}{\pi r^2} \quad (3.12)$$

Таблиця 3.4 – Нормальне навантаження F_N для випробування зразків пар тертя.

Матеріали зразків пар тертя		Межі F_N , Н		Прийняте значення F_N , Н
зношувального	зношуваного	min	max	
сталь 18ХГТ	алюмінієвий сплав АК5М7	0,61	6166	6000
сталь 18ХГТ з ЕП із сталі 65Г	алюмінієвий сплав АК5М7 з ЕП із міді М1	0,61	6166	6000



Рисунок 3.9 – Універсальна випробувальна машина Hegewald&Peschke.

Потім, незначно, на 15 – 20 % знижували нормальне навантаження та знову за формулами 3.11 і 3.12 визначали значення τ_n і p_r .

За отриманими координатами точок у програмі «Компас-3D» будували графік залежності $\tau_n = \psi(p_r)$ (рис. 3.10).

Фрикційні параметри τ_0 та β знаходили наступним чином. Визначивши у програмі «Компас-3D» кут нахилу W відрізка до осі p_r , квадрату тангенсу цього кута знаходили параметр β . Перетин прямої з віссю τ_n дає значення параметра τ_0 .

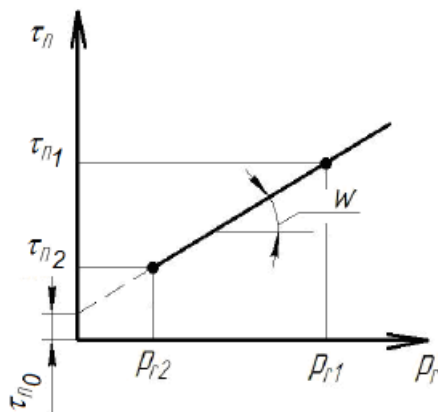


Рисунок 3.10 – Графік залежності τ_n і β від p_r

Потім за знайденими значеннями фрикційних параметрів τ_0 та β визначали величину дотичних напружень τ_n зношеного зразка.

3.6 Методика оцінки фрикційної втоми поверхонь зразків.

Згідно з уявленнями про знос твердих пар тертя, опір руйнування при дії змінних напружень, обумовленої контактною взаємодією тіл при ковзанні, характеризується кривою фрикційної втоми (поверхневе ушкодження). У цьому випадку крива фрикційної втоми (крива Велера) представлятиме залежність між зусиллям, прикладеним на поверхню матеріалу F , та числом циклів його повторення n до граничного руйнування матеріалу поверхневого шару.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Випробування на фрикційну втому поверхонь зразків проводили на трибометрі "TRB-S-DE", представленому на рисунку 3.11, відповідно до методики, описаної у джерелі [17].

Прилад має стіл, що обертається 1, на якому кріпиться випробуваний зразок 2 у вигляді диска. Над столиком, через вісь 3 кріпиться рухома стійка 4, до нижньої частини якої перпендикулярно поверхні зразка встановлюється індентор 5. Рухома стійка разом з індентором та вантажем кріпиться до корпусу 7, який може пересуватися по напрямних 8 за рахунок мікрометричного гвинта 9. Завдяки цьому змінюється радіус дотику індентора та поверхні зразка.

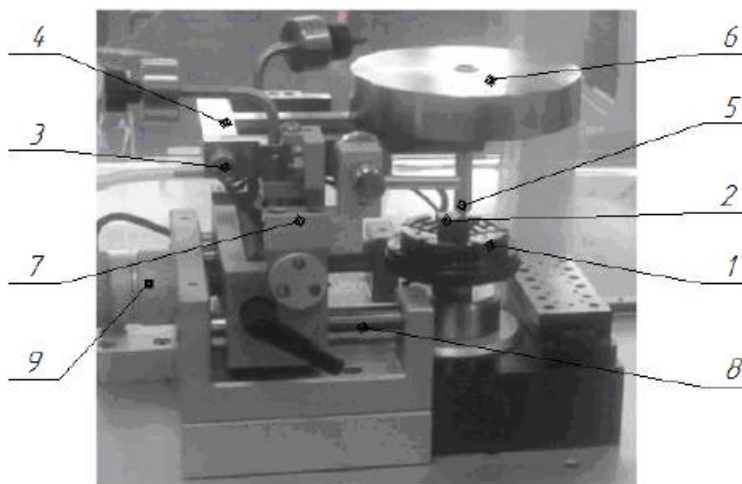


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд трибометра "TRB-S-DE"

Для випробувань приймали зразки з антифрикційного алюмінієвого сплаву діаметром 20 мм з електроіскровим покриттям із міді М1 і без нього.

В якості індентора використовували кульку зі сталі ШХ15 діаметром 3 мм. Швидкість обертання зразка, при якій відсутнє нагрівання пари тертя, складає $9 \cdot 10^{-3}$ м/сек і автоматично підтримується через програму управління Instrum X.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Навантаження, що діє на індентор, підбирається експериментально, при умови відсутності різання. Після знаходження координат першої точки, навантаження знижується на 15–20 % та експеримент повторюється.

За результатами випробувань будується графік залежності кількості циклів від величини чинного навантаження (рис. 3.12).

Кут нахилу прямої до осі n_e визначали з використанням програми "Компас-3D". Тоді, за знайденим кутом нахилу, коефіцієнт фрикційної втоми t_{II} дорівнюватиме:

$$t_{II} = ctg\alpha_{t_{II}}. \quad (3.13)$$

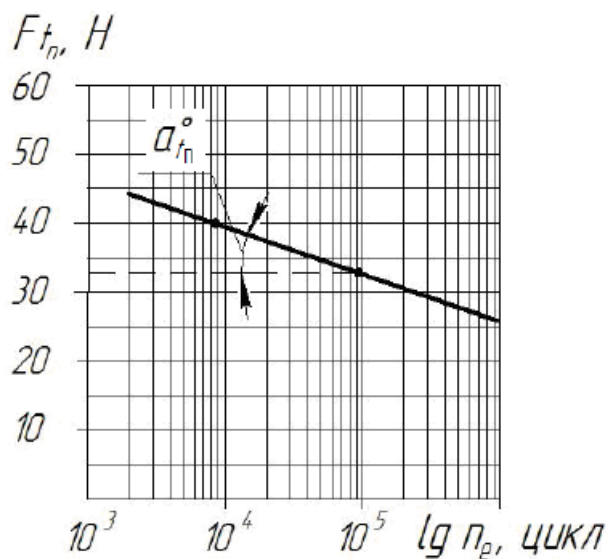


Рисунок 3.12 – Графік залежності F_{t_n} від n_e .

3.7 Лабораторні триботехнічні випробування зразків пар тертя.

Порівняльні триботехнічні випробування еталонних (без покриттів) та оброблених електроіскровим методом поверхонь пар тертя проводили на модернізованій машині тертя СМТ-1М, представленій на рисунку 3.13, прототипом якої була машина 2070 СМТ-1.

У модернізованій машині тертя сигнали від енкодера, датчиків вимірювання зусилля та моменту через конекторний блок NI SCB-68 та

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

багатофункціональну плату збору даних NI USB-6251 надходять на комп'ютер. На комп'ютері встановлено віртуальний пристрій UTM 2070, що дозволяє аналізувати інформацію з датчиків машини тертя.

На робочому вікні пристрою відображається навантаження, кН; частота обертання «ролика», об/хв; температура, град; момент тертя, Н·м; коефіцієнт тертя.



Рисунок 3.13 – Загальний вигляд модернізованої машини тертя СМТ-1М:

1 – підставка; 2 – станина; 3 – камера випробувальна; 4 – механізм навантаження; 5 – термінал для збору інформації; 6 – екран для виведення інформації; 7 – силові електроприводи; 8 – кнопка аварійного відключення.

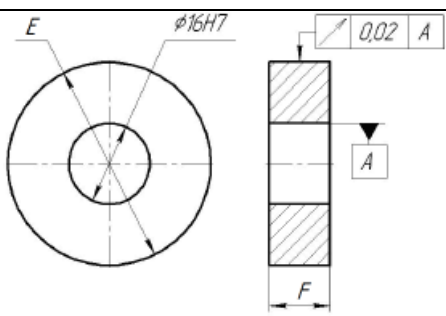
Зразки приробляли так, щоб номінальна площа прилягання становила щонайменше 100 %. Контроль здійснювали методом планиметривання плям контакту, що забезпечує похибку не більше 1 %. Після досягнення вказаного прилягання зразки маркували на неробочих поверхнях із зазначенням взаємної орієнтації при встановленні на випробувальну машину, потім промивали в ацетоні, висушували і зважували.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Підготовлені зразки встановлювали на випробувальній машині та рухали зразок «ролик» з частотою 380 об/хв., яка забезпечує швидкість ковзання пари тертя 0,8 м/с. Мастильний матеріал – олія гідравлічна МГЕ-46В, подача мастила разова в картер.

Випробування пар тертя проводили на кшталт «ролик-колодка». Матеріал та розміри зразків представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розміри та матеріал зразків для триботехнічних випробувань.

Колодка			Ролик		
					
Розміри, мм					
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Для експериментального навантаження 34,2 МПа сила навантаження 3940 Н					
20	29	11	30 ⁰	40	12
Алюмінієвий сплав АК5М7			18ХГТ		
Алюмінієвий сплав АК5М7 з ЕІО з міді М1			18ХГТ з ЕІО зі сталі 65Г		

До зразків прикладали дискретно наростаюче навантаження, відповідно до РД 50-662-88, і визначали значення тиску, при якому відзначається заїдання зразка $R_{M.H}$. Виникнення заїдання контролювали за значному («катастрофічному») підвищенню моменту тертя та температури.

Зносостійкість та коефіцієнт тертя зразків визначали при навантаженні, що відповідає розрахунковому тиску в поєднанні. Тривалість випробувань на зношування становила 8 годин.

Кількість повторювань дослідів – 8 (при довірчій ймовірності 0,90, коефіцієнт варіації 0,26, показник надійності 15%).

Оцінку зносостійкості проводили за такою формулою:

$$I = \frac{W}{L}, \quad (3.14)$$

де W – лінійне зношування зразка, м; L – шлях тертя зразка, відповідний зносу, м.

Лінійне зношування зразка визначали за формулою:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F_c}, \quad (3.15)$$

де ΔG – зміна маси зразка під час випробування, кг; γ – щільність зношеного матеріалу, кг/м³; F_c – контурна площа контакту зразків, м².

Шлях тертя зразка, що відповідає лінійному зносу зразка:

$$L = N \cdot l, \quad (3.16)$$

де l – лінійний розмір поверхні тертя сполученого зразка напрямку ковзання, м; N – число циклів, за кожен з яких поверхні тертя зразка проходять шлях l .

Інтенсивність зношування пари загалом визначали як суму інтенсивностей зношування I_{Σ} елементів пари.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Оцінка параметрів шорсткості робочих поверхонь деталей пар тертя.

Оцінку параметрів шорсткості проводили для поверхонь після механічної та електроіскрової обробки відповідно до методики, описаної у пункті 3.1 глави 3.

У таблиці 4.1 подано значення параметрів шорсткості профілів, сформованих після механічної обробки нових деталей круглих шестеренних насосів та оброблених електроіскровим методом. Подані значення узагальнені за 42 філограмами, знятими в поздовжньому напрямку щодо спрямування подачі.

Отримані результати вимірювань узгоджуються з параметрами шорсткості, вказаними на робочих кресленнях деталей, і корелюють з результатами досліджень поверхонь після різних видів механічної обробки [17-19].

Таблиця 4.1 – Значення параметрів шорсткості профілів, сформованих після механічної обробки

Вид механічної обробки	Деталь	Матеріал деталі / покриття	b	v	R_{\max} , мкм	r , мкм	Δ
Кругле шліфування	Цапфа шестерні	сталь 18ХГТ	2,4	1,6	0,62	167	$2,1 \times 10^{-3}$
		сталь 18ХГТ / ЕЮ сталь 65Г	2,7	1,5	0,47	125	$1,9 \times 10^{-3}$

4.2 Оцінка механічних властивостей поверхневих шарів зразків партертя.

4.2.1 Мікротвердість.

Вимірювання мікротвердості покриттів, сформованих методом електроіскрової обробки, проводили з метою визначити кількісні значення та їх градієнт за глибиною.

Розглянемо результати статистичної оцінки вимірів мікротвердості по глибині покриттів, сформованих на режимах, не змінюють розміри деталей.

З таблиці А.1 додатку А видно, що всім досліджуваним груп вимірів мікротвердості рівень значимості критерію Шапіро-Вилка p_w більше $p = 0,05$, що підтверджує нульову гіпотезу про нормальний розподіл значень вимірів у групах.

Значення рівня значущості критерію Левіна двох досліджуваних груп вимірювань мікротвердості p_L більше від прийнятого значення рівня значущості $p = 0,05$, що також підтверджує нульову гіпотезу про присутність однорідності дисперсій.

Таким чином, застосування t-критерію Стьюдента для порівняння середніх значень мікротвердості двох груп вимірів по глибині покриття правомірно.

Розглянемо результати статистичної оцінки вимірів мікротвердості по глибині покриттів, сформованих на режимах, не змінюють розміри деталі, але спрямованих на підвищення триботехнічних характеристик поверхні за рахунок обробки антифрикційними матеріалами. Порівнювалися послідовно дві групи вимірювань: група на рівні i з групою на попередньому рівні $i-1$ (де $i = 10, 20, \dots, k$, мкм).

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

З таблиці А.1 видно, що рівень значущості t-критерію Стьюдента порівняння середніх двох сусідніх груп менше прийнятого значення $p=0,05$, тобто має місце альтернативна гіпотеза про рівність середніх.

На підставі цього можна зробити висновок, що при електроіскровій обробці на 2, 3 та 4 режимах генератора (ALIER-31) на поверхні зразка утворюється змінений поверхневий шар (ЗПШ), мікротвердість якого статистично значно знижується по глибині до значення мікротвердості матеріалу основи

На рисунку 4.1 показано графіки розподілу середніх значень мікротвердості по глибині сформованих покриттів на досліджуваних режимах генератора (ALIER-31).

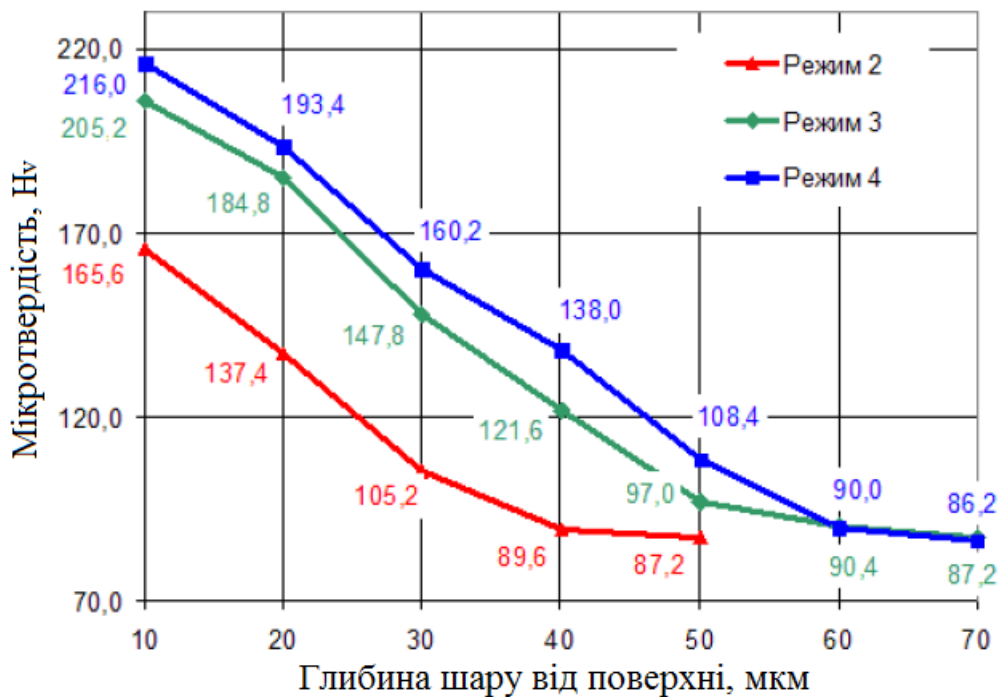


Рисунок 4.1 – Розподіл мікротвердості за глибиною покриття, сформованого на алюмінієвому сплаві АК5М7 електродом з міді

Аналізуючи мінливість варіаційних рядів значень мікротвердості на досліджуваній глибині (не більше 10%), можна зробити висновок про однорідність фазового складу, незначну кількість пор та дефектів, високої точності вимірів.

4.2.2 Відносне подовження поверхневих шарів.

Сприятливе поєднання таких механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів, як твердість і пластичність, істотно впливає на них зносостійкість. При відновленні та зміцненні робочих поверхонь деталей перевагу слід віддавати покриттям, що мають високу твердість, водночас здатних до значних деформацій без руйнування.

У таблиці 4.2 наведено результати дослідження відносного подовження поверхонь зразків без покриттів та з покриттями, сформованим методом ЕІО.

Таблиця 4.2 – Результати оцінки відносного подовження поверхневих шарів зразків без покриттів та з покриттями, сформованими методом ЕІО

Матеріал поверхні	Глибина впровадження конуса h , мм	Діаметр відбитку d_B , мм	Параметр $y = \frac{h}{d_B}$	Відносне подовження, δ_{5B}
алюмінієвий сплав АК5М7	0,2	0,98892	0,20224	0,25
алюмінієвий сплав АК5М7 з ЕІО з міді М1	0,04	0,20628	0,19391	0,13

Аналізуючи отримані результати, видно, що відносного значення подовження поверхневих шарів після електроіскрової обробки відрізняються від поверхонь без покриття. При цьому після обробки алюмінієвого сплаву АК5М7 значення відносного подовження на поверхні зразка знизилося, тобто, поверхня стала менш пластичною.

Зіставляючи результати досліджень щодо подовження покриттів з результатами дослідження мікротвердості, що простежується очевидна закономірність. При обробці алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом з міді М1 мікротвердість на поверхні збільшилася до 2,36 рази, причому значення відносного подовження знизилося в 1,92 рази.

Таким чином, на даному етапі досліджень можна з упевненістю припустити, що при зміцненні поверхонь методом ЕІО триботехнічні характеристики пар тертя будуть вищими, ніж у зразків пар тертя без покриттів.

4.2.3 Умовна межа плинності.

Аналізуючи залежність умови зовнішнього тертя $\frac{h}{r} + \frac{\tau_n}{c\sigma_T} \leq \frac{1}{2}$, видно, що друга складова суми значною мірою залежить від межі плинності поверхневого шару. Зі збільшенням цього значення, відношення $\frac{\tau_n}{c\sigma_T} \rightarrow \min$.

Отже, можна очікувати, що порушення фрикційного зв'язку відбуватиметься по поверхні розділу двох тіл, не торкаючись шарів основного металу.

Метою даного експерименту є визначення значень умовного межі плинності на поверхнях зразків без покриттів та з покриттями, сформованим методом ЕІО. Результати оцінки представлені у таблиці 4.3.

З таблиці видно, що після електроіскрової обробки поверхні зразка з алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом із міді М1 значення умовної межі плинності збільшилася на 80%.

Літературні дослідження впливу електроіскрової обробки металевих поверхонь на їхні механічні характеристики, показали, що за певних умов процесу формується субструктура, межі зерен якої є області, обмежені дислокаційною сіткою. Тобто на поверхнях зразків формуються структури та

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

субструктури нанорозмірної величини, властиві їм абсолютно нові механічні властивості, що пояснює одержані в результаті експерименту результати.

Таблиця 4.3 – Результати оцінки умовної межі плинності поверхневих шарів зразків без покриттів та з покриттями, сформованими методом ЕІО

Матеріал поверхні	Навантаження на індентор F , Н	Твердість на межі плинності $H_{0,2}$, МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа
алюмінієвий сплав АК5М7	338	530	150
алюмінієвий сплав АК5М7 з ЕІО із міді М1	608	954	270

4.3 Дослідження фрикційних властивостей поверхонь деталей пар тертя.

4.3.1 Питома міцність зсуву молекулярних зв'язків.

Фрикційний контакт, як правило, характеризується наявністю між твердими тілами проміжного шару, що є плівкою мастила, оксиду, адсорбованих парів води та плівку деградованого матеріалу основи. Цей прошарок повинен мати менше опір зсуву, ніж основні матеріали. Область, що складається з плівки та деградованого матеріалу основи називають третім тілом.

Схематичний розріз контакту двох твердих тіл показаний рисунку 4.2. Трете тіло складається з кількох шарів. Верхній шар є граничною плівкою мастила, що адсорбована або хемосорбована.

Під цією плівкою зазвичай розташовується плівка оксидів металу або іншої хімічної сполуки - сульфїду, хлориду, фосфїду, і нарешті, під цією плівкою лежить тонкий шар розпушеного матеріалу основи.

Молекулярна взаємодія поверхонь призводить до утворення більш менш міцного з'єднання. При тангенціальному переміщенні одного тіла щодо іншого третє тіло перебуває у режимі безперервної формозміни. Рухливості третього тіла на металах сприяє те, що поверхневий шар стає насичений вакансіями, щільність яких приблизно на два порядки більша, ніж обсягом металу [11]. Зсувний опір третього тіла змінюється в широких межах і залежить від властивостей частин, що його утворюють.

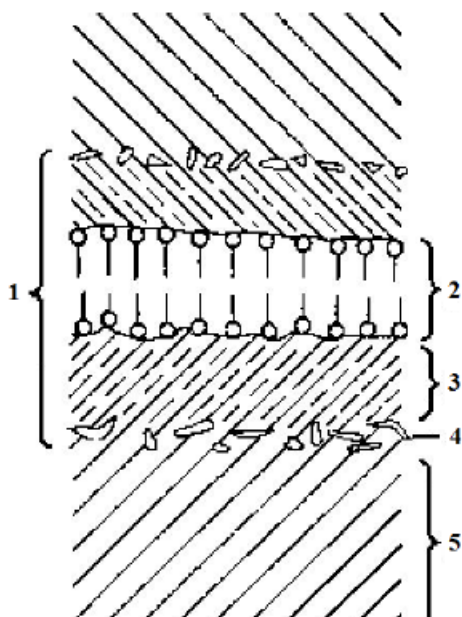


Рисунок 4.2 – Будова контакту (схема): 1 – третє тіло; 2 – адсорбований шар; 3 – оксиди та інші хімічні сполуки; 4 – розпушений шар; 5 – основний матеріал.

Експериментально доведено, що питома міцність зсуву молекулярних зв'язків на межі поділу двох твердих тіл підпорядковується біноміальному закону:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (4.1)$$

де τ_0 – зсувний опір при екстраполяції нормального тиску до нуля, МПа; β – коефіцієнт зміцнення молекулярного зв'язку; p_r – фактичний тиск на контакті при пластичному контакті приблизно рівний HB , МПа.

Тоді з урахуванням (4.1) молекулярну складову коефіцієнта зовнішнього тертя можна записати:

$$f_a = \frac{\tau_0}{HB} + \beta. \quad (4.2)$$

Визначення складових питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків τ_0 і β проведено відповідно до методики, описаної в розділі 3. Результати експерименту представлені в таблицях 4.4 та 4.5.

Аналіз результатів дослідження фрикційних параметрів молекулярної складової коефіцієнта зовнішнього тертя, представлених у таблиці 4.5 показав, що у всіх досліджуваних парах, в яких на поверхню зразків нанесено покриття методом електроіскрової обробки, значення питомої зсувної міцності знижується. Встановлену закономірність можна пояснити високою маслоємністю електроіскрових покриттів. За даними літературних досліджень, зі збільшенням товщини плівки мастила значення τ_0 зменшується, а коефіцієнт β залишається незмінним.

При формуванні зміненого поверхневого шару електродом з міді М1 методом електроіскрової обробки на поверхні з алюмінієвого сплаву АК5М7, значення питомої зсувної міцності молекулярних зв'язків побільшало. При цьому з формули (4.2) видно, що вплив збільшив твердість поверхні. При цьому коефіцієнти τ_0 та β змінилися не суттєво.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.4 – Результати визначення залежності $\tau_n = f(p_r)$.

Пара тертя		Параметри випробувань										W^0
		F_{N1} , Н	F_{TP1} Н	r_{B1} , мм	Корд. 1 крапки		F_{N2} Н	F_{TP2} Н	r_{B2} мм	Корд.2 крапки		
τ_{N1} , МПа	P_{η} , Мпа				τ_{N2} МПа	P_{η} МПа						
Кульковий індентор	Плоско паралельні пластини	6000	68,2	4,4	4,8	98,7	5100	54,2	4,1	4,7	96,6	10
18ХГТ з ЕІО із сталі 65Г	АК5М7 з ЕІО з міді М1	6000	99,3	4,3	7,5	103,3	5100	79,1	4,0	7,4	101,5	13

Таблиця 4.5 – Фрикційні параметри молекулярної складової коефіцієнта зовнішнього тертя.

Пара тертя		Експериментальні данні			Розрахункові данні	
кульовий індентор	плоско паралельні пластини	τ_0 , МПа	β	НВ, МПа	τ_n , МПа за ф. (4.6)	f_a за ф.(4.7)
18ХГТ	АК5М7	1,3	0,03	87	3,91	0,045
18ХГТ з ЕІО із сталі 65Г	АК5М7 з ЕІО з міді М1	2,7	0,05	205,2	12,96	0,063

4.3.2 Фрикційна втома.

Залучення концепції механіки трибофатичних систем має вирішальне значення для розкриття механізму руйнування під час тертя. Аналіз характеру впливів, виконаний на моделі жорсткого сферичного виступу, що ковзає по напівпростору, що деформується, показав, що в останньому виникає складний напружений стан: перед виступом існує зона стиснення, а за ним – зона розтягування. В результаті виникає знакозмінний цикл навантаження матеріалу. Багаторазові повторні деформації призводять до накопичення пошкоджень під поверхнею матеріалу, де утворюються пори.

Під впливом напружень вони переростають у тріщини, що призводять до відокремлення частки зносу.

Для визначення значень параметра фрикційної втоми поверхневих шарів зразків без покриттів та з покриттями, сформованими методом ЕЮ, поставлені модельні експерименти в відповідно до методики, представленої в розділі 3. Результати оцінки параметра фрикційної втоми представлені в таблиці 4.6.

На рисунку 4.3 представлено графічну інтерпретацію залежностей фрикційно-механічної втоми досліджуваних зразків.

З таблиці 4.6 видно, що з досліджуваних матеріалів значення параметри фрикційної втоми змінюються в діапазоні від 2 до 3 одиниць, що характерно для пружно-пластичного контакту поверхонь.

Таблиця 4.6 – Результати оцінювання фрикційної втоми

Зразки	Навантаження, Н	Сила тертя, Н	Глибина впровадження, мкм	Кількість циклів, n_{e1}	Навантаження, Н	Сила тертя, Н	Глибина впровадження, мкм	Кількість циклів, n_{e2}	Кут нахилу, α_T	T_n
Al	40	2,8	24	5600	32	2,1	18	40200	24,3	2,21
Al+M1 ЕЮ	40	2,7	20	6400	32	1,8	14	50350	23,8	2,27

Електроіскрова обробка на параметр фрикційної втоми незначний вплив. При цьому видно, що зміцнення алюмінієвого сплаву електродом з міді дозволило підвищити цей параметр. При нанесення на поверхню сірого чавуну покриття з ніхрому Х20Н80 фрикційна втома знизилася, а після наступної електроіскрової обробки міддю стала вищою, навіть у порівнянні зі зразком без покриття.

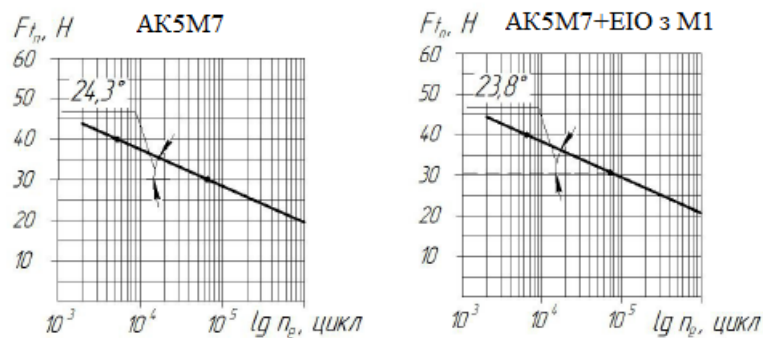


Рисунок 4.3 – Залежність фрикційно-механічної втоми

4.4 Коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування.

У таблиці 4.7 представлені результати експериментальної оцінки параметрів трибосполучень.

З таблиці видно, що навантаження в досліджуваних парах тертя вище, ніж розрахункове максимальне напруження на майданчику контакту трибосполучення, а електроіскрова обробка поверхні зразків з алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом з міді сприяла не значному збільшенню коефіцієнта тертя з 0.07 до 0.08.

Дослідження зношуваних зразків у парах тертя при розрахунковому експлуатаційному навантаженню показало, що в досліджуваній парі тертя після нанесення електроіскрового покриття інтенсивність зношування зношеного зразка знизилася щодо зразка пари тертя без покриття з 3,74 до 2,73, тобто зносостійкість підвищилась в 1,38 рази.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Таблиця 4.7 – Статистичні характеристики вибірок параметрів трибосполучення круглих шестеренних насосів

Параметр спряження	\bar{X}	Значення 95% довірчого інтервалу		P_W	Параметри закону розподілу виборки	
		нижнє	верхнє		μ	ε
Пара тертя: ролик 18ХГТ – колодка АК5Н7 (N=10)						
Навантаження до задиру, Рмп, МПа	37,5	35,1	39,8	0,77755	37,5	3,27
Коефіцієнт тертя при навантаженні 34,2 МПа	0,071	0,069	0,074	0,16776	0,071	0,0035
Інтенсивність зношування колодки при навантаженні 34,2 МПа, I_k	$3,74 \times 10^{-5}$	$3,12 \times 10^{-5}$	$4,36 \times 10^{-5}$	0,81453	$3,74 \times 10^{-5}$	$0,867 \times 10^{-5}$
Інтенсивність зношування ролика при навантаженні 34,2 МПа, I_p	$1,8 \times 10^{-9}$	$1,55 \times 10^{-9}$	$2,05 \times 10^{-9}$	0,8514	$1,8 \times 10^{-9}$	$3,50 \times 10^{-9}$
Сумарна інтенсивність зношування при навантаженні 34,2 МПа, $\sum I$	$3,74 \times 10^{-5}$	$3,12 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-5}$	0,81445	$3,74 \times 10^{-5}$	$0,867 \times 10^{-5}$
Сумарна зносостійкість при навантаженні 34,2 МПа, ε	$2,81 \times 10^4$	$2,32 \times 10^4$	$3,31 \times 10^4$	0,60312	$2,81 \times 10^4$	$0,689 \times 10^4$
Пара тертя: ролик 18ХГТ з ЕІО зі сталі 65Г – колодка АК5Н7 з ЕІО з міді М1 (N=8)						
Навантаження до задиру, Рмп, МПа	38,4	36,86	40,01	0,99578	38,4	1,884
Коефіцієнт тертя при навантаженні 34,2 МПа	0,086	0,083	0,088	0,97737	0,086	0,003
Інтенсивність зношування колодки при навантаженні 34,2 МПа, I_k	$2,73 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-5}$	$3,31 \times 10^{-5}$	0,08751	$2,73 \times 10^{-5}$	$0,696 \times 10^{-5}$
Інтенсивність зношування ролика при навантаженні 34,2 МПа, I_p	$1,97 \times 10^{-9}$	$1,68 \times 10^{-9}$	$2,25 \times 10^{-9}$	0,12741	$1,97 \times 10^{-9}$	$0,341 \times 10^{-9}$
Сумарна інтенсивність зношування при навантаженні 34,2 МПа, $\sum I$	$2,73 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-5}$	$3,31 \times 10^{-5}$	0,08756	$2,73 \times 10^{-5}$	$0,696 \times 10^{-5}$
Сумарна зносостійкість при навантаженні 34,2 МПа, ε	$3,88 \times 10^4$	$3,08 \times 10^4$	$4,69 \times 10^4$	0,06763	$3,88 \times 10^4$	$0,967 \times 10^4$

ВИСНОВКИ

1. Розрахунково-експериментальна оцінка інтенсивності зношування підшипникової обойми за умов взаємодії показала, що застосування методу ЕІО дозволить отримувати покриття, зносостійкість яких вище, ніж у партертя без покриттів.

2. Дослідження мікротвердості електроіскрових покриттів показало, що при обробці алюмінієвого сплаву АК5М7 на 4 режимі генератора «ALIER-31» електродом з міді мікротвердість збільшується на 205,8 %, на 3 режимі - на 136 %, на 2 режимі - на 89 %.

3. Встановлено, що при електроіскровій обробці зразка алюмінієвого сплаву АК5М7 електродом із міді М1 значення відносного подовження знизилася в 1,92 рази порівняно із зразком без покриття, значення умовної межі плинності збільшилася на 80 %, а зносостійкість підвищилася в 1,38 рази.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Johnson Roger N., Sheldon G. L. Advances in the electrospark deposition coating process. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films 4.6. 1986. P. 2740-2746.
2. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. Coatings. 2023. No 13(8). P. 1473.
3. Ісаєнко В. Ю. Підвищення експлуатаційної надійності гідравлічних насосів модифікації НШ-К застосуванням епіламних покриттів робочих поверхонь деталей / В. Ю Ісаєнко, П.Т. Мельянцов // Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo- Praktycznej " Inżynieria i 84 technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016" (30.12.2016) - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. - S 22-28.
4. Основи розрахунків на міцність: Опорний конспект лекцій / В.І. Мороз, О.А. Логвіненко, В.І. Іщенко, О.В. Фомін. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 124 с.
5. Малащенко В.О., Ніколайчук В.В., Тимейчук О.Ю. З'єднання змінної жорсткості: монографія. Рівне: НУВГП, 2020. 97 с
6. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г.Фесенко та [ін.] – Д.: РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.
7. Zhengchuan Zhang, et al. Промислове нанесення покриттів на втулку підшипника за технологією електроіскрового легування. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2022. № 1 (52). С. 15-23.
8. Завойко О. С., Новіков С. М. Механізм процесу електроіскрового легування із газовим осадженням. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 3 (48). С. 119-126.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

9. ГОСТ ISO 12301-95 Підшипники ковзання. Методи контролю геометричних показників і показників якості матеріалів.

10. ГОСТ ISO 4386-2-99 Підшипники ковзання. Металеві багат шарові підшипники ковзання. Руйнівні випробування міцності з'єднання антифрикційного шару і основи.

11. Завойко О.С. Теоретичні основи електротехнології зміцнення металів./ О.С. Завойко. – Чернівці: Рута, 2003. – С. 8-24.

12. Щепетов В. В., Довгаль А. Г., Бурдюженко Л. В. Електроіскрове легування для підвищення триботехнічних характеристик деталей авіаційної техніки. *Advances in aerospace technology*. 2004. No 19.1. P. 83-87.

13. Marchenko D. D., Matvyeyeva K. S. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology* 28.1/107. 2023. P. 65-72.

14. Qian, J.; Yang, F.; Wang, J.; Lauwers, B.; Reynaerts, D. Material removal mechanism in low-energy micro-edm process. *CIRP Ann.* 2015, 64, 225–228

15. Pawar, P.; Ballav, R.; Kumar, A. An overview of machining process of alumina and alumina ceramic composites. *Manuf. Sci. Technol.* 2015, 3, 10–15

16. Руденко Л. Ф., Говорун Т. П. Леговані сталі та сплави. Суми: СумДО, 2012. 171 с. ISBN 978–966–657–431–5.

17. Дем'янчук Я. М., Войцехівська Т. Й., Сумер А. Р. Вплив хімічного складу електродів для електроіскрового легування на трибологічну поведінку штоків нафтових насосів. *Наукові нотатки*. 2015. № 49. С. 47-50.

18. Radek Norbert, Konrad Bartkowiak. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*. 2010. No 5. P. 417.

19. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*. 2022. No 12(10). P. 1536.

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

ДОДАТКИ

					ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Таблиця А.1 – Характеристики статистичної оцінки вимірювань мікротвердості за глибиною на алюмінієвому сплаві АК5М7 х мідним електродом М1 ($\overline{H}_{\mu}^{\text{мідь}} = 82,2 \text{ МПа}$).

$h_{i'}$ мкм	\overline{X} , МПа	V , %	P_W	P_L	P_t	$K_{\text{зм}}$
2 режим генератора «ALIER-31»						
10	165,6	10	0,22020	--	--	1,9
20	137,4	7	0,07214	$P_L(20;10) = 0,664654$	$P_t(20;10) = 0,009542$	1,58
30	105,2	11	0,39735	$P_L(30;20) = 0,860056$	$P_t(30;20) = 0,001421$	1,21
40	89,6	5	0,93666	$P_L(40;30) = 0,221934$	$P_t(40;30) = 0,022331$	1,03
50	87,2	8	0,97958	$P_L(50;40) = 0,360342$	$P_t(50;40) = 0,519635$	--
3 режим генератора «ALIER-31»						
10	205,2	2	0,43674	--	--	2,36
20	184,8	2	0,56568	$P_L(20;10) = 0,408085$	$P_t(20;10) = 0,017135$	2,12
30	147,8	4	0,40955	$P_L(30;20) = 0,880227$	$P_t(30;20) = 0,000136$	1,69
40	121,6	3	0,91119	$P_L(40;30) = 0,620525$	$P_t(40;30) = 0,006158$	1,39
50	97,0	2	0,99980	$P_L(50;40) = 0,068088$	$P_t(50;40) = 0,002960$	1,11
60	90,4	5	0,36329	$P_L(60;50) = 0,232784$	$P_t(60;50) = 0,014117$	1,04
70	87,2	3	0,95464	$P_L(70;60) = 0,329528$	$P_t(70;60) = 0,182257$	--
4 режим генератора «ALIER-31»						
10	216,0	8	0,25223	--	--	2,52
20	193,4	3	0,57597	$P_L(20;10) = 0,166860$	$P_t(20;10) = 0,210015$	2,24
30	160,2	7	0,94808	$P_L(30;20) = 0,253421$	$P_t(30;20) = 0,000367$	1,86
40	138,0	8	0,59566	$P_L(40;30) = 0,867178$	$P_t(40;30) = 0,013645$	1,60
50	108,4	13	0,40161	$P_L(50;40) = 0,592262$	$P_t(50;40) = 0,005760$	1,26
60	90,0	5	0,93696	$P_L(60;50) = 0,054179$	$P_t(60;50) = 0,023286$	1,04
70	86,2	6	0,17203	$P_L(70;60) = 0,702114$	$P_t(70;60) = 0,271242$	--

										Арк.
										80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 23.20102.000. ПЗ					