

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка до дипломної роботи бакалавра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»


Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»  
на тему: «Підвищення зносостійкості рухомих і нерухомих з'єднань під впливом магнітного поля»


Шифр: ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ

Виконав: студент 3 курсу, група МТВАс -20-2  Р.А. Чумак

Керівник

 д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:

Зав. кафедри ТАМ 

Диха О.В.

1 06 2023 р.

Хмельницький, 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр  
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»  
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»  
Освітня програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою ТАМ  
Диха О.В.  
" 20 " березня 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Чумаку Роману Андрійовичу

1. Тема проекту:  
«Підвищення зносостійкості рухомих і нерухомих з'єднань під впливом магнітного поля»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 16.03 2023р. № 5

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 10.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Технічні умови на технологію обробки магнітним полем.
- 2) Річна програма ремонту.
- 3) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

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

1. Аналіз впливу магнітного поля на властивості металів
2. Технологія і устаткування для модифікації поверхонь тертя магнітним полем
3. Вплив параметрів магнітного поля на процеси тертя
4. Вплив магнітного поля на процеси зношування

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання вручив

6. Дата видачі завдання: 20 березня 2023р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Прим.
1	Аналіз впливу магнітного поля на властивості металів	1.05.2023	
2	Технологія і устаткування для модифікації поверхонь тертя магнітним полем	15.05.2023	
3	Вплив параметрів магнітного поля на процеси тертя	25.05.2023	
4	Вплив магнітного поля на процеси зношування	5.06.2023	
5	Оформлення пояснювальної записки	15.06.2023	

Студент

Чума Чумак Р.А.

Керівник роботи

 Диха О.В.

## РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 88 сторінок, кількість рисунків – 42, таблиць – 11, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 70  
Студент гр. МТВАс-20-2 Чумак Р.А.

Тема «Підвищення зносостійкості рухомих і нерухомих з'єднань під впливом магнітного поля»

Дана бакалаврська дипломна робота присвячена визначенню триботехнічних показників пар тертя «сталь – сталь» з урахуванням встановлення закономірностей впливу магнітного поля на процеси їх тертя і зношування.

Відповідно до цього вирішені наступні завдання:

- розроблена методика та установка для експериментальних досліджень впливу магнітного поля на триботехнічні показники в умовах рухомого та нерухомого контактів;
- досліджений вплив магнітного поля на величину молекулярної складової коефіцієнта тертя сталевих поверхонь;
- визначений вплив параметрів магнітного поля на процеси тертя в умовах рухомого контакту та нерухомого з'єднання стосовно фрикційних гасників коливань;
- визначений вплив магнітного поля на процеси зношування пар тертя ковзання і з'єднань з натягом стосовно фрикційних гасників коливань

**Перелік ключових слів:** сталь, магнітне поле, зносостійкість, коефіцієнт тертя

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ.....	8
1.1.Вплив магнітного поля на властивості металів.....	8
1.2.Конструкторсько – технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей фрикційних гасників коливань.....	24
1.3.Сучасні технологічні методи підвищення експлуатаційних властивостей фрикційних гасників коливань.....	29
2. ТЕХНОЛОГІЯ І УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МОДИФІКАЦІ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ.....	33
2.1.Опис технології, устаткування та матеріалів.....	33
2.1.1.Об'єкт технології.....	33
2.1.2.Матеріали, зразки, деталі.....	36
2.1.3.Установка для дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя під впливом магнітного поля.....	39
2.1.4.Установка для дослідження триботехнічних показників пар тертя ковзання в умовах впливу магнітного поля.....	42
2.1.5.Установка для зміцнення нерухомого з'єднання за умов впливу магнітного поля.....	47
3. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ.....	51
3.1.Дослідження процесів тертя металевих тіл під час вирішення контактних завдань.....	51

ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Піпис	Дата	Підвищення зносостійкості рухомих і нерухомих з'єднань під впливом магнітного поля	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Чумак		<i>Чумак</i>					
Перевір.	Диха		<i>Диха</i>				4	82
Н.контр.	Бабак		<i>Бабак</i>			ХНУ,		
Затвер.	Диха		<i>Диха</i>			гр. МТВАс-20-2		

3.2. Процес намагнічування в умовах контактної взаємодії.....	55
3.2.1.Розрахункові характеристики магнітного поля в умовах ковзного контакту.....	55
3.2.2.Розподіл магнітного поля за умов нерухомого з'єднання.....	60
3.3.Дослідження впливу магнітного поля на молекулярну складову тертя.....	62
4. ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСИ ЗНОШУВАННЯ.....	66
4.1.Вплив магнітного поля на процеси зношування в умовах рухомого та нерухомого контактів.....	66
4.1.1.Вплив магнітного поля на процеси зношування в умовах ковзного контакту.....	66
4.1.2.З'єднання з натягом.....	69
4.2.Вплив магнітного поля на зношування рухомих сполучень.....	71
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	75
Додатки.....	81

## ВСТУП

Поліпшення показників тертя та зношування трибосполучень може реалізовано модифікацією їх структурного стану, у тому числі за рахунок впливу різними видами енергій. Тому пошук способів керування силою тертя шляхом стороннього впливу є актуальним. Погано вивченими є питання, пов'язані із впливом магнітного поля на триботехнічні показники пар тертя. Одним із напрямів триботехнології є зміна властивостей поверхневого шару при впливі магнітним полем.

Вплив магнітним полем має низку переваг у порівнянні з іншими видами полів. Цими перевагами є: збереження геометрії та шорсткості поверхні деталей; відсутність витратних матеріалів та додаткових середовищ; простота технологічного оснащення та екологічна чистота; низька вартість технологічної операції намагнічування пар тертя.

В даний час не склалося єдиної теорії про природу впливу магнітного поля на поверхні тіл, що контактують. Незважаючи на наявний експериментальний матеріал та наявність цілого ряду моделей, що пояснюють магнітний ефект при взаємодії тіл, сьогодні немає побудованої теорії, здатної пояснити експериментальні дані з єдиних позицій.

У техніці взагалі і в рухомому складі, зокрема, велике поширення набули гасителі коливань на основі сухого тертя - фрикційні. Такі гасителі використовуються в ресорному підвішуванні локомотивів і вагонів у силу наявності багатьох позитивних якостей, таких як простота конструкції, компактність, невибагливість до сезонного обслуговування тощо, що забезпечує малі витрати на їх виготовлення та експлуатацію.

Для роботи фрикційних гасників зазвичай характерні підвищене зношування деталей, ударні навантаження, можливі заклинювання та нестабільність.

коефіцієнта тертя, що є причиною погіршення загальної надійності, зокрема

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шпинтонного вузла.

Таким чином, пошук та підтвердження технічних рішень, спрямованих на вдосконалення роботи шпинтонного вузла фрикційних гасників коливань при його експлуатації (вертикальне переміщення сухарів щодо втулки шпинтону в умовах тертя ковзання, а також посадка шпинтону в раму візка з гарантованим натягом) є дуже актуальними.

У цьому метою дипломної роботи є дослідження триботехнічних показників пар тертя «сталь – сталь» стосовно фрикційним гасителям коливань з урахуванням встановлення закономірностей впливу магнітного поля на процеси їх тертя і зношування.

Відповідно до цього необхідно вирішити такі взаємопов'язані **завдання:**

– розробка методик та установок для експериментальних досліджень впливу магнітного поля на триботехнічні показники в умовах рухомого та нерухомого контактів;

– дослідження впливу магнітного поля на величину молекулярної складової коефіцієнта тертя сталевих поверхонь;

– дослідження впливу параметрів магнітного поля на процеси тертя в умовах рухомого контакту та нерухомого з'єднання стосовно фрикційних гасників коливань;

– оцінка впливу магнітного поля на процеси зношування пар тертя ковзання і з'єднань з натягом стосовно фрикційних гасників коливань;

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

## 1.1. Вплив магнітного поля на властивості металів

У 1845 р. Фарадей досліджував вплив магнітного поля на ряд речовин і після багатьох експериментів він написав: «Тепер ми можемо вважати, що всі речовини схильні до дії магнітних сил так само, як дії гравітації, електричних сил і сил зчеплення. Однак усі тіла не виявляють такого магнетизму, який уражає заліза». Е. Герберт у 1926 р. описав ефект зміни властивостей феромагнітних матеріалів та їх субкультур за впливом зовнішнього магнітного поля [03, 104]. Фізична природа ефекту магнітного поля (МП) у сфері контакту металевих тіл нині немає загального пояснення. Так ряд авторів розглядає вплив магнітного поля на мартенситне перетворення на сталі з погляду термодинамічного розрахунку [4, 77, 1].

При цьому Д.М. Гаркунов розглядає тертя загалом як явище, обумовлене як зовнішнім впливом, і внутрішніми силами природи, причому до останніх він відносить головним чином електричні і магнітні сили [22].

Однією з причин зростання переміщень дислокацій при впливі магнітного поля вважають вплив електронних спинів, локалізованих на дефектах кристалічної решітки. На це свідчить розвиток спинотроніки – науки про керування електричним струмом у напівпровідниках.

«При цьому можливість впливу електронних спинів, локалізованих у дефектах структури, на механічні властивості кристалів донедавна не брали до уваги. Це пов'язано з тим, що процеси взаємодії спинів і дефектів тривалий час імовірно розглядалися як рівноважні, тому вважалося, що вони роблять дуже малий внесок проти пружним і електростатичним взаємодіями, визначальними рухливості дислокацій. Однак, отримання строгих експериментальних доказів впливу спина на пластичну деформацію іонних кристалів у магнітному полі та зростання кількості публікацій на цю

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тему визначили виникнення нового напрямку у фізиці – пластичності спінової мікромеханіки, метою дослідження якої є отримання знань про мікроскопічні спін-залежні процеси,

Також є теоретичне напрям, що у принципі дозволяє виходити моделі залежності коефіцієнта тертя у системі взаємодіючих тіл від напруженості магнітного поля. «Однак дослідження впливу магнітного поля на пластичність металів є найбільшою складністю для експериментаторів, оскільки є цілий комплекс факторів, здатних спотворювати результати експериментів з дослідження пластичності металів у магнітному полі: індукційні струми; термомеханічні ефекти; втягування в магнітне поле захватів випробувальної машини.

На думку [28], «дослідження магнітопластичного ефекту в області високих значень мікрохвильових та постійних магнітних полів, а також дослідження впливу магнітних полів на розвиток тріщин та міцність твердих тіл відносяться до перспективних,» хоч і слабо досліджених напрямів (рисунок 1.1). Таким чином, до альтернативної гіпотези можна віднести насамперед відсутність несуперечливої теорії, здатної описати експериментальні дані з єдиних позицій, причому час отримання інформації, що бракує, явно виходить за тривалість часу на проектування вузлів пар тертя, що пов'язано з недостатньою вивченістю самого природного явища [44].

Розглянемо гіпотези, що пояснюють зміну властивостей матеріалів під впливом магнітного поля. В даний час [47, 3] не склалося єдиної теорії про природу впливу магнітного поля на поверхні контактуючих тіл. Як показано в [64], незважаючи на наявний експериментальний матеріал і наявність цілого ряду моделей, що пояснюють магнітний ефект при взаємодії тіл, сьогодні немає побудованої теорії, здатної пояснити експериментальні дані з єдиних позицій. Понад те, різні автори виходять із протилежних поглядів на фізичну картину явища. Так, наприклад зроблено висновок, «що зовнішнє

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітне поле сприяє зростанню числа активних центрів за рахунок дислокацій, а збільшення площі контакту призводить до усереднення фрикційних зв'язків і зростання коефіцієнта тертя» [95, 35].

У той самий час у [41] щодо зносостійкості стали автори виходять із те, що у «зв'язку з орієнтацією доменів під впливом магнітного поля утрудняється рух дислокацій в поверхневому шарі пропорційно намагніченості зразків». Тому важко пластичне деформування мікровиступів поверхонь і поява схоплювання. Більш того, автори висувають гіпотезу, що фрагменти деформування поверхні (частки зносу), що утворилися, можуть, пластично змінюючись, придбати округлу форму, і, будучи утримуваними магнітним полем в контакті, можуть сприяти зниженню сили тертя. Однак ця гіпотеза не підтверджується наведеними в [55] результатами експериментів, згідно з якими вплив магнітного поля веде до збільшення сили тертя.

Впливом магнітного поля на рух дислокацій також пояснюється зміна властивостей матеріалу [64, 41, 55, 34, 88].

Відомо, що при різанні металів у зоні контакту збуджується термоЕРС, причому процеси, пов'язані з її збудженням, не вивчені, і, як стверджується в [39], подібні явища виникають не тільки в парі «інструмент – заготівля», а й у будь-якій взаємодіючій парі металеві деталі. Відповідно до [39], в зоні різання виникає ерозія металів (руйнування поверхонь деталей та інструменту в полі слабких електричних розрядів) під впливом термоЕРС у зоні різання, що характеризується напруженістю магнітного поля. При цьому, ймовірно, зовнішнє магнітне поле впливатиме на струми, що виникають внаслідок термоЕРС.

[58] висловлена гіпотеза, що зовнішнє електричне поле може впливати на величину і полярність термоелектричного струму. У зв'язку з цим можуть посилюватися або уповільнюватися окислювальні процеси, таким чином, в зоні тертя наростаюча окисна плівка перешкоджатиме безпосередньому

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаємодії поверхонь. Таке явище може супроводжуватися зміною контактного електричного опору та можливим зменшенням зносу поверхонь тертя. Якщо зовнішнє поле впливає на термоЕРС, слід очікувати інтенсифікації процесів на поверхні або зворотного явища, при якому можуть прискорюватися або сповільнюватися ці процеси, особливо на початковому і заключному етапах контакту. При цьому зовнішнє поле може збільшувати ефект генерації та поглинання електронів як з поверхонь тертя, так і серед проміжного шару (окисів, діелектричних домішок), що, ймовірно, призводить до виникнення електромагнітного поля, що підсилює ефект міжатомарного тяжіння між парами тертя, як наслідок, зростає коефіцієнт тертя. Відповідно, зовнішнє магнітне поле також має впливати на величину і полярність термоелектричного струму і коефіцієнт тертя для моделі [9] процесів в контакті, заснованої на аналізі взаємодії поверхонь на атомарному рівні.

У ряді робіт [5, 3, 33, 34] розглянуто вплив поля на внутрішнє тертя у різних речовинах. У [33] виявлено, що при застосуванні імпульсного магнітного поля рівень внутрішнього тертя в сталях стрибкоподібно зростає, після вимкнення поля зберігається протягом нетривалого часу, а потім монотонно зменшується, повертаючись до вихідного значення. Також у [34] відзначено збільшення внутрішнього тертя в бронзі після впливу імпульсного магнітного поля, причому при повторному впливі спостерігалось тимчасове зниження внутрішнього тертя, а при подальшій магнітопластичній деформації – збільшення. При цьому в рамках магнітострикційної моделі неможливо пояснити неоднозначну залежність явища, що спостерігається від напруженості магнітного поля, а також різні за знаком зміни внутрішнього тертя в металі,

В [37] вивчено вплив магнітного поля на електропластичний ефект у кремнії. Як показали експерименти, швидкість руху дислокацій у зразках при збудженні постійним електричним струмом, які пройшли обробку

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

магнітним полем, була меншою, ніж у зразках, які зазнавали впливу тільки струмом. Виникає питання, як впливатиме на сумарний коефіцієнт тертя спільну дію пристроїв, що підвищують коефіцієнт тертя за рахунок впливу магнітного поля та електричного струму.

Зміна рухливості домішок. Д.М. Гаркунов, І.П. Суранов та Г.Б. Коптяєва внаслідок дослідження природи підвищення зносостійкості матеріалів магнітною обробкою пояснюють зміну їх фізичних властивостей при впливі магнітного поля насамперед зміною поведінки легкорухливих компонентів, добавок, домішок у матеріалі деталей. Очевидно, ефект підвищення зносостійкості деталей та інструменту магнітною обробкою залежить від напрямку та напруженості магнітного поля, що забезпечують швидке та повне відведення збуджених молекул та атомарного водню із зони контакту поверхневого шару [24].

Автори робіт [72, 73] пояснюють збільшення стійкості роботи ріжучого інструменту результатом магніострикційного зміцнення та магнітодисперсійного твердіння сталі.

У роботі [79] передбачається, що причиною зміни властивостей намагніченого інструменту може бути процеси електромагнітної індукції. У роботі [23] передбачається, що підвищення зносостійкості намагнічених деталей обумовлено взаємодією збуджених молекул водню, що дозволяє забезпечити швидке відведення молекул і атомарного водню із зони тертя [79, 82].

У роботах [79, 82] вказується, що у зв'язку з впливом магнітного поля змінюється розташування точкових дефектів, що веде до виникнення диполів. Взаємодія магнітного поля з диполями призводить до розпаду дефектних елементів.

У роботах [3, 20, 21] висловлено припущення, що при терті намагнічених деталей в умовах використання мастильного матеріалу зниження інтенсивності зношування може бути пов'язане з поліпшенням властивостей мастил.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Японські дослідники [02] наголосили, що змінне магнітне поле полегшує пластичну деформацію, і пов'язали цей ефект з особливостями феромагнітних матеріалів.

У роботі [30] розглядається вплив змінного магнітного поля на тертя та зношування феромагнітної сталі. Зазначається, що відбувається зменшення величини зносу, зростає мікротвердість, збільшується трибоокислення поверхонь тертя.

Вплив на зону контакту магнітним полем на думку авторів [61] дозволяв кілька (до 22%) збільшити коефіцієнт тертя. Це збільшення автори пов'язують із приростом тиску пари тертя, і навіть з фізичними явищами, які відбуваються лежить на поверхні зони тертя. Тим не менш, вивчення впливу магнітного поля на поверхні тертя представляє інтерес у теоретичному аспекті та сфері застосування до інженерних завдань. Відомий магнітопластичний ефект [66], суть якого полягає в ослабленні взаємодії дислокацій із перешкодами.

У роботі [5] наводяться результати дослідження визначення трибологічних характеристик пари тертя «колесо – рейка» при вплив зовнішнього постійного магнітного поля. Зазначається, що коефіцієнт тертя зростає із збільшенням напруженості магнітного поля. Встановлено, що при впливі електромагнітного поля в залежності від рівня напруженості та стану проміжного середовища може відбуватися як зміцнення фрикційних зв'язків, так і їх розуміщення [62].

У роботі [65] наголошується, що можливості технології магнітно-імпульсної обробки полягають у тому, що за зміцнення деталей можна варіювати не тільки напруженістю поля, а й полярністю, тривалістю та амплітудою імпульсів, а також часом витримки після обробки.

Природа ефекту обробки магнітним полем зразків при їх зносі пояснюється з рівних точок тертя, часто протилежних і виключають один одного [77, 72, 73, 23, 20].

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вплив магнітного поля на мартенситне перетворення на сталі необхідно розглядати, виходячи з термодинамічного розрахунку, проведеного в роботах [48, 77]. Цей розрахунок будується на зміні температури крокового перетворення під впливом магнітного поля

Автори вважають, що причина збільшення довговічності "магнітообробленого інструменту пов'язана зі зміною власної дислокаційної структури швидкорізальної сталі під впливом магнітного поля" [70, 72, 72].

Зміна зносостійкості обробленого інструменту

«відбувається в результаті магнітострикційного зміцнення та магнітодисперсійного твердіння швидкорізальної сталі. Намагнічування матеріалу супроводжується магнітострикційною деформацією і, відповідно до закону Гука, пружними напруженнями, що призводить до появи локальних перенапруг. Саме в цих осередках йдуть процеси розмноження та переміщення дислокацій, формуються вогнища пластичної деформації. Зі збільшенням щільності дислокацій інструмент зміцнюється, відчуваючи своєрідну наклеп».

Так само «вплив магнітного поля на вироби відбувається не тільки збільшення числа дислокацій та їх перерозподіл, але також змінюється розташування та взаємодія точкових дефектів. У місцях локалізації точкових дефектів утворюється спотворення електронного енергетичного спектру кристалічних ґрат, що призводить до появи диполів. При накладенні магнітного поля воно взаємодіє з цими диполями і викликає аномальний розпад дефектних комплексів. Це призводить до різкого підвищення рухливості дефектів структури та релаксації внутрішніх напруг. Дослідники вважають, що поглинання енергії поля йде інтенсивніше, якщо використовується імпульсне магнітне поле» [74, 75, 109].

Розглядаючи ще один варіант впливу магнітного поля на властивості феромагнетика. «Під час накладення магнітного поля на реальний кристал, у ньому виникають електронні вихори, які бомбардують дефекти переважно у

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напрямку до центру вихорів. В результаті цього відбувається як би злипання дефектів, їх групове впорядкування та винесення на поверхню. Рух електронів призводить також до звільнення енергії деформації, запасеної реальною структурою до магнітної обробки, рекомбінації дефектів протилежного знака, стабілізації дефектів системи при загальному зниженні рівня Фермі металу. Все це призводить до дисперсійного твердіння та зміцнення матеріалу. Передбачається, що підвищена дифузійна рухливість дефектів зберігається після зняття магнітного поля» [38].

На думку авторів, «намагніченість різця викликає зміну температури в зоні контакту інструментального та оброблюваного матеріалів за рахунок непарних термомагнітних ефектів. Причиною зміни температури різання є ефект Риги-Ледюка, який полягає у повороті теплового потоку під дією магнітного поля в будь-який бік щодо напрямку градієнта температур порівняно з умовами за відсутності магнітного поля. Це твердження обґрунтовується дослідженнями щодо визначення стійкості різця при роботі на прямій та зворотній подачі. При цьому коли робоча частина різця має північну полярність, тепловий потік відхиляється в площині, перпендикулярній напрямку силових ліній магнітного поля різця, в бік від вершини. Так як область вершини різця в тепловому відношенні найбільш напружена,

У [79] «передбачається, що причиною зміни стійкості намагніченого інструменту можуть бути процеси, що протікають у зоні різання завдяки явищу електромагнітної індукції. Автори [23] вважають, що підвищення довговічності намагнічених деталей обумовлено взаємодією збуджених молекул водню, що у воні контакту третьових поверхонь. Передбачається, що ефект підвищення зносостійкості деталей магнітною обробкою залежить від напрямку та напруженості магнітного поля. Автори робіт [20, 21] висловлюють думку про те, що при роботі намагнічених деталей в умовах рідинного або граничного мастила, зниження інтенсивності зношування

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може бути пов'язане з поліпшенням властивостей мастильних матеріалів.

Всі теорії мають свої недоліки і позитивні сторони, але жодна з них не дає пояснення всім вище перерахованим фактам, що зустрічаються в багатьох роботах авторів. Наприклад, стверджується, «що твердість магнітообработанных виробів змінюється з часом, трапляється у роботах» [03, 96].

У роботах [80, 56] наведена спроба пояснити вплив магнітного поля, переходом через стан нестабільності типу біфуркації Хопфа і Тьюринга. Для утворення ефектів, пов'язаних з іншими гіпотезами, зміна твердості матеріалу в часі не має значення.

Відомо велика кількість експериментальних фактів, що вказують на позитивний вплив магнітних полів малої напруженості на різні характеристики матеріалів: опір втомному руйнуванню [0]; опір зношування та малоциклової втоми [1]; межа плинності та мікротвердість [68]. Широко відомий ефект підвищення зносостійкості від дії магнітного поля для деталей трисполучень різного призначення» [65, 46].

«Застосовувані практично методи модифікації робочих поверхонь трибоспрязаний впливом магнітного поля різні як у фізичним і технологічним принципам, і по конструктивним виконанням установок. Методи поділяють так:

- вплив постійним магнітним полем;
- дія імпульсним магнітним полем.

Для впливів постійним магнітним полем характерні:

- обробка з розмагнічуванням за кілька годин;
- обробка одним імпульсом, спрямованим магнітним полем;

динамічна обробка при обертанні виробу магнітному полі протягом декількох хвилин.

Найбільшого поширення набув метод впливу імпульсним магнітним полем, якому властиві:

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- обробка без подальшого розмагнічування;
- обробка кількома циклами (2...10 циклів) з витримкою між циклами 1...20 хвилин.

Досвід дослідження та застосування обробки магнітним полем деталей, що обертаються, машин з різних сталей показав, що коефіцієнт тертя в робочих вузлах механізмів знижується в 1,2...2,5 рази. У цьому підвищується теплопровідність матеріалу, збільшується швидкість відведення тепла. На думку ряду дослідників [65, 46] завдяки обробці магнітним полем в мікротріщинах поверхонь тертя фіксуються тонкодисперсні продукти зносу металів.

Завдяки цьому відбувається деяке зміцнення мікротріщин та вирівнювання мікрорельєфу поверхні намагніченими продуктами зносу. Внаслідок цього частково знижується ефект, що розклинає в мікротріщинах поверхні матеріалу компонентами мастильного середовища. Особливо це характерно для важко навантажених деталей, що працюють при знакозмінних динамічних навантаженнях. У цьому досліді показали, що з великої низки трибоспряжений розмагнічування проводити необов'язково» [71].

Вплив магнітного поля на тертя та зношування мало вивчений. У літературі відображено приватні результати, які, тим не менш, дають певні відомості про вплив магнітного поля на трибологічні показники пар тертя. Так, на рисунку 1.2 представлена залежність напруженості магнітного поля від нормального навантаження за зміни значень мінімального зносу. Одним із пояснень впливу магнітного поля є магнітопластичний ефект, що призводить до зниження межі плинності та мікротвердості. Зовнішній вплив на трибологічну систему можна зробити при намагнічуванні імпульсним магнітним полем соленоїда граничним струмом або при намагнічуванні полем постійного струму електромагніту.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

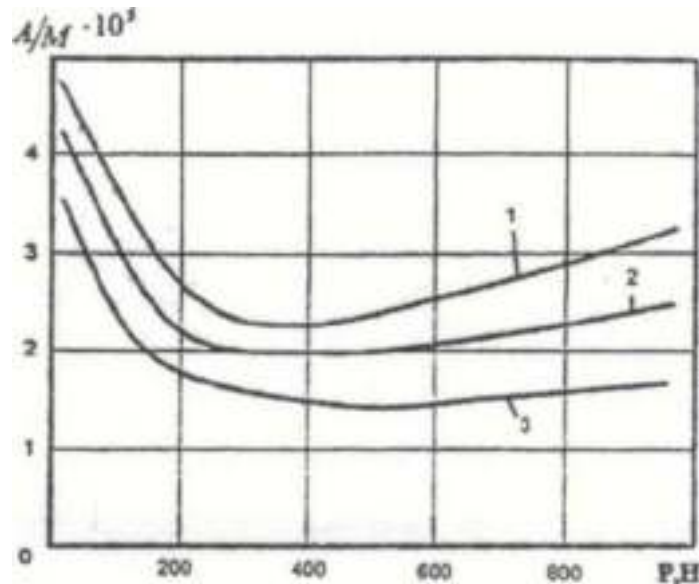
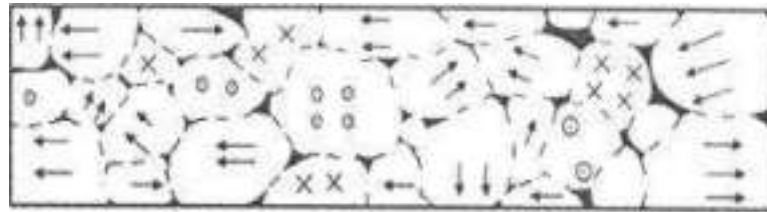


Рисунок – 1.2. Вплив напруженості магнітного поля та нормального навантаження на закономірності зміни значень мінімального зносу:  
 1 – зразок із сталі 45 після відпалу; 2 – зразок із сталі 45 після відпалу; 3 – зразок із сталі 45 після загартування

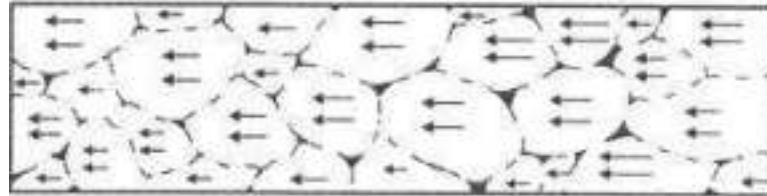
Як видно з малюнка 1.2, напруженість магнітного поля, при якій знос мінімальний для даних умов випробувань становить приблизно  $1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}$  для зразка 3.

У роботі [40] наведено результати дослідження впливу намагнічування (при пропусканні постійного електричного струму через контакт) при терті ковзання феромагнітних матеріалів. На рисунку 1.3 показано структуру доменів після тертя.

Привертає увагу (рисунок 1.4) відповідність намагніченості і коефіцієнта тертя. Там, де спостерігається пік намагніченості, має місце підвищене значення коефіцієнта тертя. Цей результат відповідає даним, отриманим у роботі [59].



а



б

Рисунок – 1.3. Структура доменів феромагнітного матеріалу (сталь): а – до намагнічування; б – після намагнічування

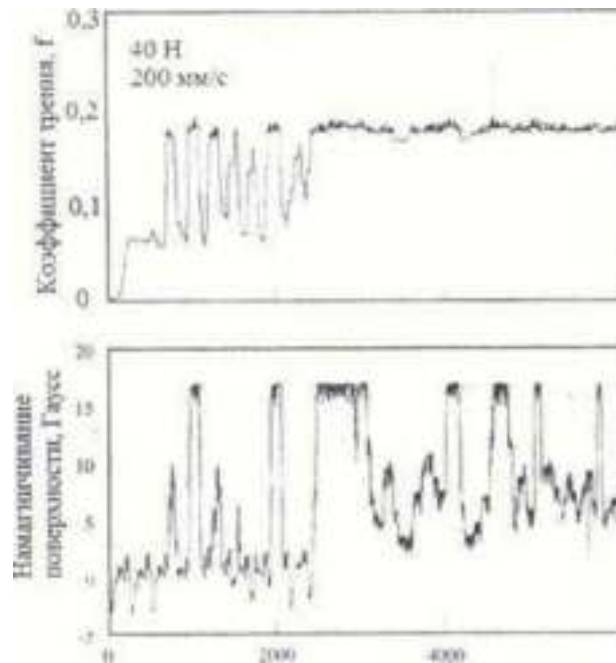


Рисунок – 1.4. Залежність коефіцієнта тертя та намагніченості від шляху тертя

В умовах тертя без зовнішнього магнітного поля створена електронна наноструктура продовжує здійснювати протиадгезійні функції за рахунок підживлення енергією залишкового магнітного поля та енергією фрикційних

явищ. При цьому система тертя «залізо – залізо» реалізує слабші хімічні зв'язки.

Діяльність [18] встановлено вплив магнітного поля на фазові перетворення. Сталі з вуглецем масою 1 мас.% піддавалися перлітному перетворенню гелієвому надпровідному магніті в пошуках впливу градієнта магнітного поля на фазове перетворення. Збільшення твердості становило 8% при градієнті поля 50 Т/м, причому його величина залежить від складу сталі. Було підтверджено, що зміцнення не має відношення до знаку градієнта та відсутнє для однорідних магнітних полів. Такий вид зміцнення не спостерігався для бінарного сплаву Fe – C. Спостереження та вимірювання внутрішнього тертя показали, що пересичені атоми вуглецю були введені у феритні шари перлітної фази під градієнтом поля. Такі додаткові вуглецеві атоми повинні бути поєднані з атомами Mn та (або) Cr вчасно їх перетворення на домішкові комплекси,

Експериментально було підтверджено, що на втрату маси при зношуванні впливає магнітне поле [15]. Ці результати також означають [13], що можливим є контроль трибологічної поведінки з магнітними полями.

Іншими словами, можна буде зменшити втрати на зношування та продовжити термін служби машин. Тому дослідження впливу магнітного поля має застосування для покращення зносостійкості рейок та залізничних коліс та підвищення ефективності роботи підшипників кочення. Проте, вплив горизонтального магнітного поля на трибологічне поведінка нині остаточно не вивчено. Тут слід відзначити різницю між вертикальним магнітним полем (МП), коли магнітний потік спрямований перпендикулярно поверхні тертя і горизонтальним МП, при якому потік спрямований уздовж поверхні тертя.

Крім того, деякі дослідники підтверджують, що магнітне поле змінює мікротвердість та механічні властивості матеріалу. Мікротвердість зношеної поверхні є важливим фактором для трибологічної поведінки. У роботі [13]

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконані вимірювання мікротвердості за Віккерсом на поверхні ковзання феромагнітних матеріалів в умовах магнітного поля  $H = 4,5 \cdot 10^4 \text{ А м}^{-1}$  і без магнітного поля. Наявність вертикального магнітного поля на поверхні ковзання збільшує мікротвердість. Не тільки в роботі [98], але і в [24] та ін стверджується, що вертикальне магнітне поле на поверхні ковзання збільшує її мікротвердість.

Втрата маси при зношуванні збільшувалася при застосуванні горизонтального магнітного поля. Це контрастує із зношуванням без магнітного поля та для вертикального магнітного поля. Крім того, причиною зменшення втрат маси при застосуванні вертикального магнітного поля є те, що початковий період зношування при терті ковзання величина зносу змінюється від сильного зносу до помірному. Коли застосовувалося горизонтальне магнітне поле, то тривало сильне зношування. На поверхнях пальця і диска, що зношуються, на які діяло горизонтальне магнітне поле, можна бачити, що мав місце сильний знос.

Дослідники [6] виявили вплив горизонтального магнітного поля на контакт кочення сталевих дисків, що працюють у кількох контактних умовах, з використанням дводискової машини. Вони уточнили механізм ініціювання тріщини та запропонували модель ініціації тріщини в контакті Герца з магнітним полем. Вони також досліджували намагніченість феромагнітного матеріалу та його зв'язок із енергетичним статусом. Досліджувався зв'язок між товщиною уламків та місцем початку тріщини через прокатку, і між ними існують певні відносини.

Зношування в умовах сухого тертя поліамідного зразка сталеві поверхні зменшується за наявності магнітного поля. Цей ефект пояснюється зменшенням адгезійної взаємодії (прилипання) та перенесення полімеру на сталеву поверхню. При ковзанні зі змащувальним матеріалом за наявності магнітного поля полярні молекули орієнтуються перпендикулярно поверхні тертя. При цьому спостерігається зниження величини зношування внаслідок

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створення захисної плівки, що має шарувату щільноупаковану полімолекулярну структуру, що перешкоджає утворенню контактів, позбавлених граничних шарів мастильного матеріалу.

У роботі [23] представлені результати експериментальних трибологічних досліджень зразків із феромагнітних сталей. Досліди проводилися для попередньо намагнічених зразків і зразків, схильних до впливу магнітного поля під час проведення випробувань на зношування. Показано, що зразки з попереднім (залишковим) намагнічуванням мають найгірші показники (знос і коефіцієнт тертя), ніж у разі впливу магнітного поля під час випробувань. Такий результат пов'язаний із утворенням зношених частинок у вигляді оксидів заліза, які утримуються магнітним полем у зоні тертя.

Схеми намагніченості представлені рисунку 1.5.

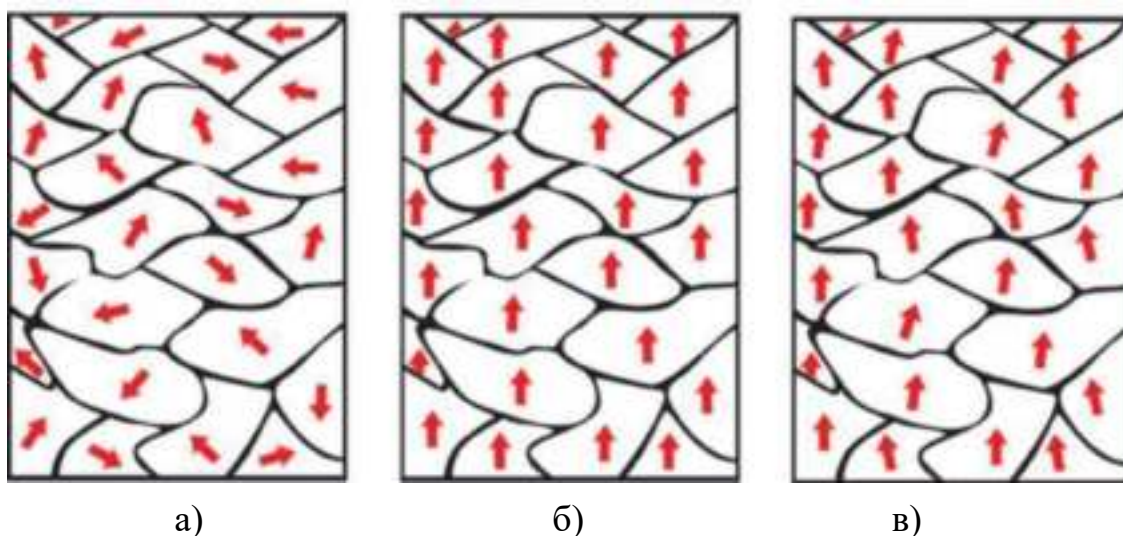


Рисунок – 1.5. Схеми намагніченості: а – вихідний стан доменної структури феромагнітного матеріалу; б – вплив магнітного поля; в – доменна структура після вимкнення магнітного поля (залишкова намагніченість)

Огляд опублікованих робіт показує, що розвиток теоретичних моделей впливу магнітного поля на властивості матеріалу стримується, насамперед, відсутністю доступних приладів, дозволяють одночасно проводити

вимірювання різних фізичних величин (деформацій, температури, напруг, струмів, магнітних і електричних полів) на мікроскопічних ділянках поверхонь деталей та в товщі матеріалу зони їх контактної взаємодії в динаміці.

Проведений аналіз можливих гіпотез дозволяє побудувати зразковий план проведення робіт з інженерного аналізу, необхідні створення магнітних пристроїв для зміни коефіцієнта тертя. Основною причиною, що стримує створення магнітних підсилювачів зчеплення (МКС) [6] є відсутність досвіду їх проектування та великий діловий ризик, пов'язаний із виникненням непередбачуваних проблем під час проектування та дослідної експлуатації. Імовірність помилок у процесі проектування можна значно знизити з допомогою своєчасного виявлення уніформації – сукупності даних, необхідні усунення інформаційного дефіциту у процесі проектування.

На підставі загальнотеоретичного підходу, викладеного в [74], запропоновано алгоритм інженерного аналізу, спрямованого на виявлення уніформації і включає методику аналізу теоретичних робіт, яка дозволяє спростити їх сприйняття інженером-проектувальником, виходячи з того, що МКС є застосування нового фізичного ефекту ( вплив магнітного поля) за відомої приватної функції, яку можна визначити, як забезпечення фрикційної взаємодії колеса та рейки.

Виявлено необхідність паралельно з економічним проводити більш докладний аналіз фундаментальних досліджень, результатом якого має бути вибір технічних рішень ряду фізичних моделей та лабораторних установок для отримання емпіричних закономірностей впливу магнітного поля на властивості речовини в діапазоні параметрів, характерних для створюваних МКС (зміна коефіцієнта тертя, пластичності, зносу, тріщиноутворення та фарбування). Отримані емпіричні закономірності можуть бути використані для створення математичних моделей, призначених для проектування

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

варіантів конструкції, а також для формування науково-теоретичного доробку для аналізу та зіставлення з даними фундаментальних досліджень.

## **1.2. Конструкторсько – технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей фрикційних гасників коливань**

Багато галузях машинобудування широко використовуються всілякі фрикційні гасителі коливань (демпфери тертя), і навіть фрикційні муфти. За наявності джерел електроживлення на борту машини ці об'єкти з незначною доопрацюванням можуть бути перетворені на демпфуючі елементи з керованим тертям, що є істотним кроком на шляху створення електромеханічних (мехатронних) систем.

«Термін демпфування походить від німецького слова Dämpfer – глушник [83] й у розумінні означає примусове гасіння коливань чи зменшення їх амплітуди до допустимих меж [53]. Примусове гасіння коливань (демпфування) входить до комплексу дій, спрямованих на зменшення інтенсивності коливального процесу об'єкта віброзахисту. Демпфування зазвичай застосовується в тих випадках, коли врівноважування механізмів і роторів не приносить бажаних результатів або коли коливання виникають внаслідок інших причин. Для примусового гасіння коливань у сучасних машинах використовуються такі технічні засоби: гасителі коливань (демпфери); віброізолятори. Зупинимося кожному з них окремо».

«Демпфер (гасник коливань) – пристрій заспокоєння чи запобігання шкідливих механічних коливань ланок машин і механізмів шляхом поглинання енергії» [53].

На рисунку 1.7 представлені схеми гасників коливань.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

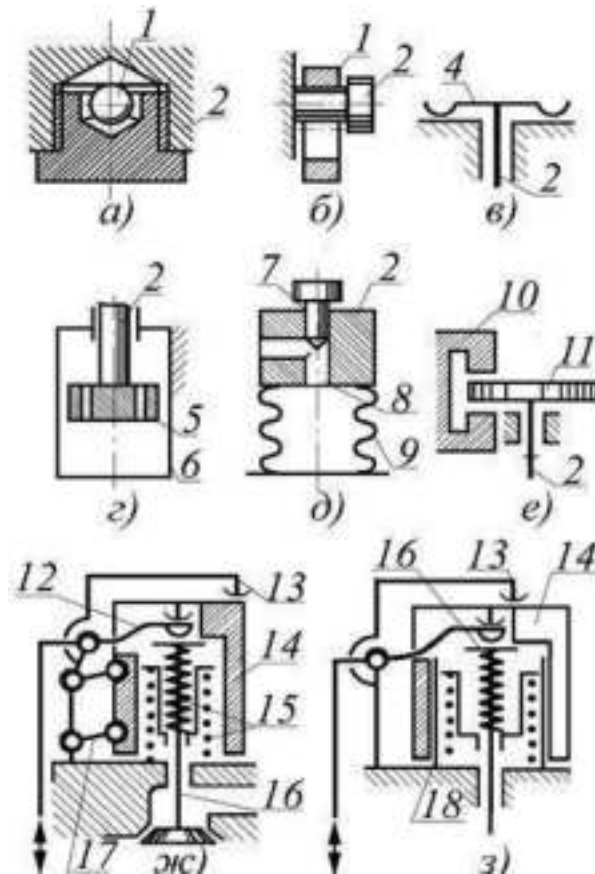


Рисунок – 1.7. Схеми гасників коливань

На рисунку 1.7 ж, представлені виконання інерційно-ударного демпферів в клапанному механізмі двигуна внутрішнього згорання. Рух клапана 16 передається від розподільного механізму за допомогою коромисла 12. При русі клапана 16 вниз стискаються пружини 15, а ланка 14 опускається вниз. При русі коромисла, що звільняє пружини, клапан з прискоренням рухається вгору. Маса ланки 14 внаслідок інерції призводить до більш повільного наростання прискорення та пом'якшення удару клапана по поверхні сідла. Енергія, передана ланці 14, обумовлює його подальший рух (після закриття клапана) і удар корпусу 13. Ланка 14» на рисунку 1.7 ж підвішено до корпусу 13 за допомогою паралелограма 17, рисунку 1.7 ланка 14 встановлено так, що може поступально переміщатися на втулці 18.

«Вибір типу гасника визначається характеристиками коливальної

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи та її конструкцією. Найбільше пом'якшення ударів та гасіння коливань забезпечують гідравлічні та фрикційні гасителі коливань. Цим пояснюється їхнє широке застосування в залізничному та автомобільному рухомому складі» [57].

Відомо, що ресурс виробу розраховується на етапі конструювання, забезпечується на етапі виробництва та підтримується на етапі експлуатації, що призводить до зменшення вартості всього життєвого циклу технічної системи або конкретного виробу. При цьому на кожному із зазначених етапів проводиться обґрунтована раціоналізація конструкції шляхом багатоваріантного техніко-економічного зіставлення:

1) на етапі конструювання проводиться підбір матеріалів тертя, обґрунтування технологічності конструкції з погляду відтворення геометричного обсягу;

2) на етапі виробництва вже значна увага приділяється властивостям поверхонь, що сполучаються, і забезпеченню їх стабільності і необхідних критеріїв якості;

3) на етапі експлуатації вважається раціональним досягнення обслуговування і ремонту деталей, що зношуються і замінюються в один, як правило призначається час ремонту, при якому технічно забезпечується доступ до вузла, що обслуговується.

Таким чином, при розробці конструкції на етапі 1) фрикційного гасника коливань для машини відомого призначення є доречним, перш за все, визначитися з передбачуваним, заданим ресурсом пари тертя, який можна порівняти з першим поточним ремонтом виробу. Виходячи з цього і деяких економічних міркувань, приймається доступний варіант матеріалів поверхонь, що труться, виходячи конструкція і компоновочного габариту цього вузла машини. При розробці геометрії детальних креслень значну увагу приділяється майбутній можливості її відтворення на технологічному обладнанні і завдання необхідної шорсткості поверхонь, що

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

труться.

На етапі виготовлення 2) вже все спрямовано досягнення параметрів деталі, закладених конструктором. При цьому, як вказувалося, значна увага приділяється методам підвищення ресурсу по зносу поверхонь, що сполучаються вузлів, що піддаються динамічному навантаженню шляхом їх зміцнення доступними і можливими технологічними методами:

- механічними способами, такими як дробоструминна обробка або зміцнююче накочування;

- термічними способами, такими як газополум'яне або індукційне загартування,

- хіміко-термічними способами, таким як азотування, цементация з наступним загартуванням або карбонітрування.

При дробоструминній обробці або зміцнюючому накочуванні міцність підвищується переважно завдяки частковій пластичній деформації поверхневого шару. Створювана власна напруга стиснення близької поверхні області накладається на експлуатаційні навантаження, і таким чином зменшуються напруги в конструктивному вузлі. Протягом терміну служби через навантаження, що виникають, може також відбуватися релаксація напруг у зміцнених зонах. Враховуючи велику кількість циклів навантаження (часу експлуатації) осей колісних пар, ці механізми можуть компенсувати принаймні частину початкової міцності.

Завдяки індукційному або газополум'яному гарту міцність підвищується за рахунок структурних перетворень в поверхневому шарі в результаті часткового нагрівання з наступним прискореним охолодженням. При цьому технологічними параметрами є глибина зони, що нагрівається і наступна швидкість охолодження. Характерною рисою поверхневого загартування є перебіг процесу загартування в глибину. Якщо вузол знаходиться вже у покращеному стані,

то можливе подальше підвищення міцності у близьких до поверхні зонах,

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

але лише в обмеженому обсязі.

Хіміко-термічні способи, такі як азотування, цементація з наступним загартуванням або карбонітрування, призводять до зміни хімічного складу в поверхневому шарі. Вони максимально змінюють матеріал та вимагають застосування спеціальних термообробних установок. Зміна структури та хімічного складу в поверхневому шарі матеріалу відбувається шляхом введення вуглецю та/або азоту методом дифузії. Механізми дії при цементації з наступним загартуванням є збагачення поверхневого шару вуглецем, і подальше мартенситне перетворення поверхневого шару. Максимальна частка зміцнення посідає напруги, викликані спотворенням в кристалічній решітці внаслідок перенасичення вуглецем. За відповідного складу сталі також додається ефект дисперсійного зміцнення в результаті виділення карбідів. Азотування та карбонітрування підвищують міцність за рахунок включення атомів вуглецю та азоту в тетраедричні пори ґрат та утворення нітридів заліза, вуглецю та ін. при відповідному вмісті легуючих елементів в оброблюваних марках сталей. У цьому підвищується зносостійкість. Крім того, в результаті нітриду заліза, що пасивується, підвищується корозійна стійкість. Технологічними параметрами хіміко-термічних способів обробки є час обробки, температура, тиск технологічного газу та умови охолодження. в результаті нітриду заліза, що пасивується, підвищується корозійна стійкість. Технологічними параметрами хіміко-термічних способів обробки є час обробки, температура, тиск технологічного газу та умови охолодження. в результаті нітриду заліза, що пасивується, підвищується корозійна стійкість. Технологічними параметрами хіміко-термічних способів обробки є час обробки, температура, тиск технологічного газу та умови охолодження.

Описані методи доступних способів технологічного підвищення експлуатаційних властивостей поверхневого шару ілюструють різноманітність можливості досягнення необхідного ресурсу. Його величина

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначається зазвичай проведенням техніко-економічних досліджень зменшення витрат життєвого циклу виробу.

Тому результатом цього етапу 3) є обґрунтування періодичності та часу проведення ремонтів виробу, виходячи з призначеного терміну служби за технічними умовами чи контрактом на постачання.

### **1.3. Сучасні технологічні методи підвищення експлуатаційних властивостей фрикційних гасників коливань**

«Більшість деталей машин працює в умовах зношування, корозії, а також циклічних навантажень, що руйнують поверхневий шар матеріалу. На сьогоднішній день існує безліч способів зміцнення поверхні металів і сплавів з метою підвищення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, таких як твердість, зносостійкість, корозійна стійкість, міцність втоми та інших. Всі ці методи поділяються на такі основні класи:

*Термічні методи-* Загартування.

*Рекристалізація-* Обкатування роликками або кульками, - Алмазне вигладжування.

*Деформаційне старіння-* Це процес, що протікає після пластичної деформації, якщо вона відбувається нижче температури рекристалізації.

*Хіміко-термічні методизасновані* на процесі поверхневого насичення сталі різними елементами, шляхом їхньої дифузії із зовнішнього середовища при високій температурі.

Цементация – хіміко-термічна обробка, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару атомами вуглецю при нагріванні до температури 900 – 950 °С. Цементации піддаються сталі із низьким вмістом вуглецю (до 0,25%). За способом проведення розрізняють цементацию у твердому карбюризаторі, цементацию в газовому карбюризаторі, цементацию в пастах, цементацию в киплячому шарі та електролітичну цементацию. Лазерну цементацию здійснюють на основі розчинів графіту або сажі в

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ацетоні, спирті та інших розчинниках.

Азотування – хіміко-термічна обробка, що полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару азотом в атмосфері частково дисоційованого аміаку. Азотування частіше проводять при температурах

500 - 600 °С. Низькотемпературне газове азотування застосовується для середньовуглецевих легованих сталей. Азот утворює з легуючими елементами стійкі нітриди, які надають поверхневому азотованому шару дуже високу твердість. Азотування застосовується для зміцнення, підвищення межі втоми та зносостійкості, а також для підвищення корозійної стійкості різних виробів. Відомий метод азотування за допомогою лазерного випромінювання. Виконується він з використанням паст на основі аміачної солі, карбаміду та ін. Для азотування сталей необхідно створити над поверхнею тиск азоту порядку 9 МПа, що утруднює практичне застосування даного процесу, у той час як титан, цирконій, гафній та сплави на їх основі достатньо піддати лазерному оплавленню в струмені азоту.

Ціанування та нітроцементация – процеси хіміко-термічної обробки, що полягають у високотемпературному насиченні поверхні виробу азотом та вуглецем. Причому процес спільного насичення поверхні азотом та вуглецем у рідких ваннах прийнято називати ціануванням, а насичення в газоподібних середовищах – нітроцементациєю.

Процес нітроцементациї зазвичай ведуть при температурах 820 - 860 °С в середовищах ендогазів та ендоекзогазів з добавками природного газу (метану) та аміаку. Чим більша товщина необхідного шару насичення, тим меншим має бути вміст аміаку і метану і вище температура хіміко-термічної обробки. Основне призначення процесу нітроцементациї – підвищення твердості, контактної витривалості, зносостійкості та межі витривалості виробів. Ефективна товщина шару, що насичується, не повинна перевищувати 1 мм, так як при більшій товщині в структурі шару

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з'являються фази, що різко знижують межу витривалості і контактну витривалість матеріалу.

Ціанування проводять при температурах від 800 до 950 °С у розплавах, що містять ціаністі солі, причому з підвищенням температури хіміко-термічної обробки частка вуглецю в шарі зростає, а азоту – знижується.

Борірування – процес хіміко-термічної обробки, що полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару сталі бором при високотемпературній витримці у відповідних насичувальних середовищах. Це один із найбільш ефективних та універсальних процесів хіміко-термічної обробки. Боруванню можуть піддаватися сталі перлітного, феритного та аустенітного класів. Борування може здійснюватися у твердих, рідких (електролізне та безелектролізне борування) та газоподібних середовищах. Лазерне борування проводять, в основному, з використанням легуючих складових у твердій фазі у вигляді суміші порошків бору, бору карбіду, борного ангідриду, бури, ферробора зі сполучною речовиною.

*Метод газотермічного напилення* полягає в розплавленні матеріалу покриття (дрот або порошок) з наступним нанесенням (напилюванням) його на основу газового потоку. У мікрзоні удару частинок розплаву об поверхню, що покривається, вони деформуються і розтікаються, послідовно злипаючись один з одним і затвердіючи, формуючи плоский шар. Зв'язок напилюваних частинок з основою відбувається за рахунок теплової та кінетичної енергії, яка визначається температурою та швидкістю цих частинок.

*Високошвидкісне газополум'яне напилення* - Характеризується високими швидкостями нанесення порошкового покриття на матеріал підкладки. Швидкість нанесення зазвичай перевищує швидкість звуку щонайменше, ніж 5 раз. У країнах Європи та Північної Америки високошвидкісне напилення практично витіснило гальваніку та методи вакуумного напилення у багатьох галузях. Твердосплавні покриття, нанесені

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методами високошвидкісного напилення, за всіма статтями перевершують гальванічні покриття, процес створення яких визнаний надзвичайно канцерогенним.

*Плазмове напилення*- Процес нанесення покриття. полягає в тому, що у високотемпературний плазмовий струмінь подається матеріал, що розпилюється, який нагрівається, плавиться і у вигляді двофазного потоку направляється на підкладку. При ударі і деформації відбувається взаємодія частинок з поверхнею основи або матеріалом, що напилюється, і формування покриття. Часто використовуються для створення покриттів, що підвищують зносостійкість. Плазмове напилення, яке проводиться в атмосферних умовах з успіхом замінило вакуумні технології.

*Електродугова металізація* полягає в безперервному плавленні металу, розпорошенні його на дрібні частинки та нанесенні на підготовлену методом абразивно-струминної обробки поверхню. Потрапляючи на металізовану поверхню, частинки деформуються, нагромаджуються одна на одну і утворюють металізаційне покриття шаруватої будови. При цьому температура виробу під час напилення не перевищує 120 °С. Основними недоліками даного методу є велика пористість одержуваного покриття та висока витрата матеріалу.

*Детонаційне напилення* є одним із видів газотермічного нанесення покриттів, що використовують енергію горючих газів (в основному пропанбутану) у суміші з киснем, а також зі стисненим повітрям (азотом, аргоном). Детонаційно-газовий метод, використовуючи енергію вибуху газових сумішей, є циклічним процесом, має високу питому потужність. Перевагами цього методу є висока адгезія покриття, низька пористість, відсутність деформації. До недоліків можна віднести досить низьку продуктивність та недостатню надійність існуючого обладнання.

*Газополум'яне напилення*. Металевий або полімерний порошковий, дротяний або шнуровий матеріал подається в полум'я ацетилен-кисневого

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або пропан-кисневого пальника, розплавляється і переноситься стисненим повітрям на поверхню виробу, де, остигаючи, формує покриття.

## **2. ТЕХНОЛОГІЯ І УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ**

### **2.1. Опис технології, устаткування та матеріалів**

#### **2.1.1. Об'єкт технології**

Об'єктом дослідження є пари тертя «сталь – сталь» стосовно фрикційних гасників коливань ресорного підвішування транспортних засобів.

У техніці взагалі і в рухомому складі, зокрема, велике поширення набули гасителі коливань на основі сухого тертя - фрикційні. «Такі гасителі коливань використовуються в ресорному підвішуванні локомотивів та вагонів через наявність позитивних якостей, таких як порівняльна простота конструкції, компактність, невибагливість до сезонного обслуговування тощо, що забезпечує малі витрати на їх виготовлення та експлуатацію. Однак, одним із найістотніших недоліків традиційних конструкцій фрикційних гасників коливань у динамічному відношенні є наявність зон нечутливості такого ресора підвішування, де вони застосовуються.

Дослідження показали, що для роботи фрикційних гасників зазвичай характерні підвищене зношування деталей, ударні навантаження, можливі заклинювання і значна нестабільність коефіцієнта тертя, що є причинами зниження загальної надійності вузла. Основні фактори нестабільності коефіцієнта тертя – порушення технології виготовлення фрикційних елементів, відхилення розмірів окремих деталей та недосконалість конструктивного виконання з великою чутливістю до зміни коефіцієнта тертя».

Така можливість виникає при введенні у конструктивне рішення

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фрикційних гасників коливань магнітного поля з впливом на зону тертя та зворотним зв'язком за його величиною. За наявності джерел електроживлення на борту машини, вони з незначною доопрацюванням можуть бути перетворені на демпфуючі елементи з керованим тертям, що є суттєвим кроком на шляху створення електромеханічних (мехатронних) систем.

У залізничних візків широке поширення набуло рішення, засноване на буксовому фрикційному гаснику. Напрямна частина цього пристрою 1 називається шпинтоном (рисунок 2.1).

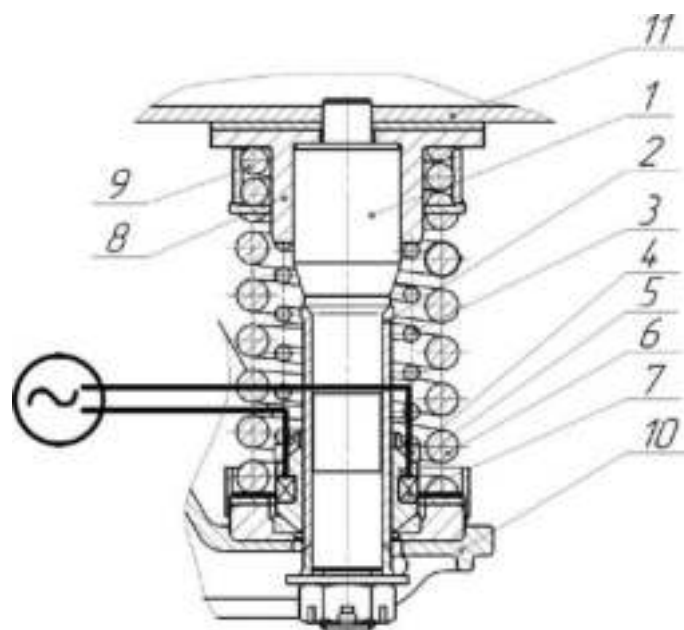


Рисунок – 2.1. Схема шпинтонного вузла буксового ступеня підвішування візка

Фрикційний гаситель коливань шпинтонного типу складається: зовнішня пружина 6, внутрішня пружина 3, пружина підтиску 9, пружина 6 спирається на корпус букси 10 і кріплення шпинтона приварений до рами візка 11; гасник коливань є втулкою 2, напресовану на шпинтон 1; сухарі 5; натискних кілець 4, одягнених на шпинтон 1 (рис. 2.15).

Основною парою тертя гасителя коливань є втулка шпинтону 2 разом із сухарями 5 (рис. 2.1). Переміщаються в процесі коливань ходової частини вагона сухарі 5 притискаються до втулки 2 кінчними кільцями 4. Нижче

кільце на крило букси, а на верхнє кільце впливає внутрішня пружина, необхідна для притискання сухарів до втулки.

Шпінтони 1 виробляють із сталі 40 з подальшою обробкою під посадки та запресовують у раму візки. Раму візка виготовляють із сталі 09Г2С. Сухарі 5 виготовляють із сталі 45 з твердістю 42...45 HRC. Втулку 2 виготовляють із сталі 45, повинна становити 45...55 HRC, основна мікроструктура – тростит відпустки.

Шпінтон одночасно є гасителем коливань, призначеним для зниження коливань у ресорному підвішуванні візків вантажних та пасажирських вагонів. Працюючи одночасно і паралельно із пружинами, він створює дисипативні (розсіювальні) сили, необхідні для гасіння або обмеження амплітуд коливань вагона або його частин. Шпінтон є круглим сталевим стрижнем. Шпінтони (залежно від конструкції) запресовують у раму з натягом.

Принцип дії шпінтонного вузла ґрунтується на виникненні сил тертя між фрикційними сухарями та втулкою при їх взаємних переміщеннях під час коливання рами щодо букси. По висоті сухарі розташовані між двома конусними кільцями. Комплект сухарів та конусних кілець постійно підтискається пружиною, яка впирається у бурт потовщеної частини шпінтону.

У процесі коливань вагона та рами візка на надбуксових пружинах відбувається переміщення фрикційних сухарів та виникнення великих сил тертя між втулкою та сухарями. Це призводить до зношування шпінтону по циліндричній поверхні в результаті вертикальних переміщень фрикційної втулки. Розглянемо передачу як вертикальних, і горизонтальних сил у буксових з'єднаннях колісних пар з рамою візка з прикладу буксових гасників коливань типу ТВЗ-5. Їхні технічні характеристики: розрахунковий стиск пружини 37...38 мм при жорсткості 88 кН/м; сила тертя при стисканні 1,4...4,3 (середнє 2,85) кН, при віддачі 1,0...2,0 (середнє 1,5) кН.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.1.2. Матеріали, зразки, деталі

Експериментальні дослідження процесів у контакті пар тертя проводять на лабораторних установках [29, 36] та в реальних умовах експлуатації [63]. Кожен напрям цих досліджень має свої переваги та недоліки. У цій роботі застосовані лабораторні методи досліджень, які дозволяють виділити із загальної кількості основні фактори, що впливають на процес тертя та зношування. При проведенні лабораторних досліджень легше дотриматися принципу, сформульованого В.Д. Кузнецовим: «Завдання наукового дослідження і полягає в тому, щоб досліджувати явище не у всій складності, а у спрощеному вигляді, коли з усіх факторів, що впливають на це явище, змінюється лише один, а решта залишаються незмінними».

Враховуючи, що у роботі передбачається вивчення впливу на триботехнічні процеси магнітного поля та підтвердження раніше проведених теоретичних розрахунків, перед початком досліджень проводилося налаштування магнітних систем лабораторних установок та їх тарування.

Магнітне поле вимірювалося датчиком Холла. Перед виконанням експерименту проводилося тарування датчика. Для цього датчик поміщався в центр соленоїда, діаметр якого менший за його довжину. На порожнистий керамічний циліндр радіусом 33 мм та довжиною 290 мм рівномірно намотані дві обмотки дроту діаметром 1 мм по 362 витка кожна. Силкові лінії в соленоїді паралельні осі керамічного циліндра (рисунок 2.2).

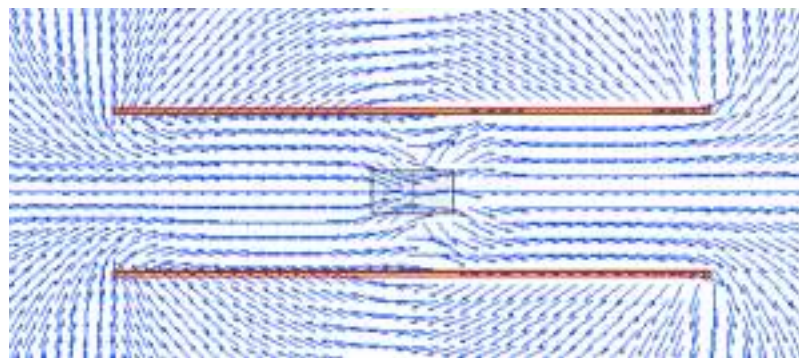


Рисунок – 2.2. Схема розподілу силових ліній у соленоїді

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обмотка котушок живилася від джерела постійної напруги через реостат.

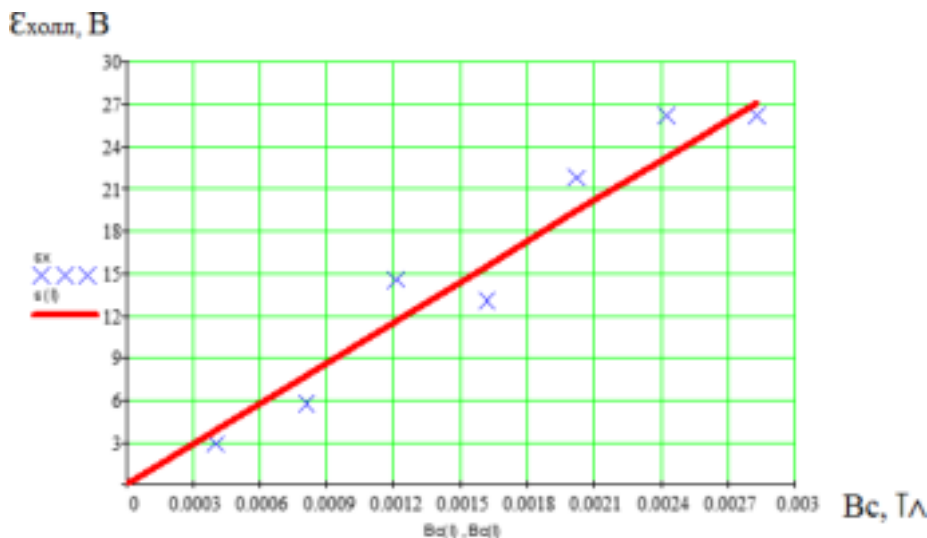


Рисунок – 2.3. Тарировочная залежність датчика Холла (електрорушійної сили від магнітної індукції)

Для дослідження впливу магнітного поля на молекулярну складову коефіцієнта тертя було розроблено схему для випробувань пари тертя «сталь – сталь». Схемне рішення цієї трибологічної системи є парою тертя «куля – плоский зразок» (однокульковий трибометр). Куля виготовлена із загартованої сталі ШХ 15. Плоскі зразки прямокутного перерізу обидва виготовлені зі сталі 45. Твердість становить 45 HRC, параметр шорсткості  $R_a = 0,8$  мкм.

З метою встановлення закономірностей впливу магнітного поля на поведінку контакту при ковзанні було розроблено схему для випробувань пари тертя «сталь – сталь». Схемне рішення цієї трибологічної системи, наведене на рисунку 2.4, є парою тертя «палець – диск» [8, 87].

Як викладалося вище, для об'єкта дослідження (шпинтона) були розроблені та виготовлені зразки з того самого матеріалу з максимальним відтворенням технології його виготовлення.

Перед початком експериментів на установці вимірювалася швидкість обертання диска, виготовленого зі сталі 45. Твердість становить 55 HRC,

параметр шорсткості  $Ra = 0,8$  мкм.

Вимірювання швидкості проводилося на нових і минулих випробуваннях зразках при необхідному навантаженні. Дослідження показало, що швидкість обертання диска при зміні навантаження практично не змінювалася, і надалі враховувалася постійною. До і після проведення випробувань проводилося тарування тензобалки, показання вводилися у вимірювальну систему [87].

Циліндричні зразки (палець) виготовлені зі сталі 45. Твердість становить 45 HRC, параметр шорсткості  $Ra = 0,8$  мкм. Розміри зразків: довжина 80 мм діаметр 20 мм.

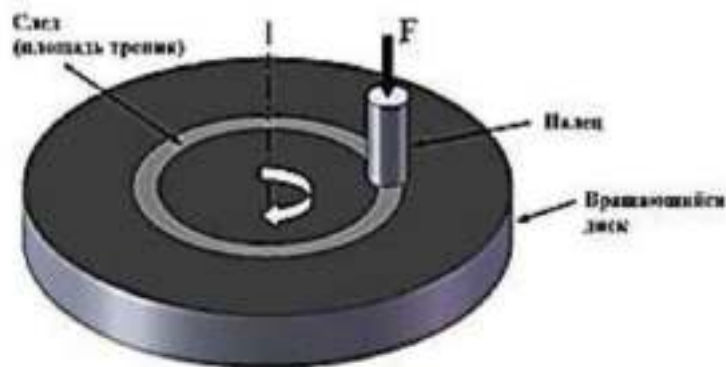


Рисунок – 2.4. Пара тертя «палець – диск» матеріалів «сталь – сталь»

Чинники, прийняті до уваги під час проведення досліджень:

- сила притискання зразків  $F$ , Н;
- швидкість відносного ковзання, м/с;
- площати контакту  $Aa$ , м<sup>2</sup>;
- твердість м'якшого матеріалу HRC;
- шорсткість  $Ra$ , мкм;
- шлях тертя  $S$ , м;
- час  $t$ , с;
- сила струму  $I$ , А;
- напруженість магнітного поля  $\Phi$ , Вб;

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– сила тертя  $F_{тр}$ , н.

Як об'єкт дослідження нерухомого з'єднання використовувалося з'єднання з натягом стрижня, виготовленого зі сталі 40, і втулки, виготовленої зі сталі 09Г2С.

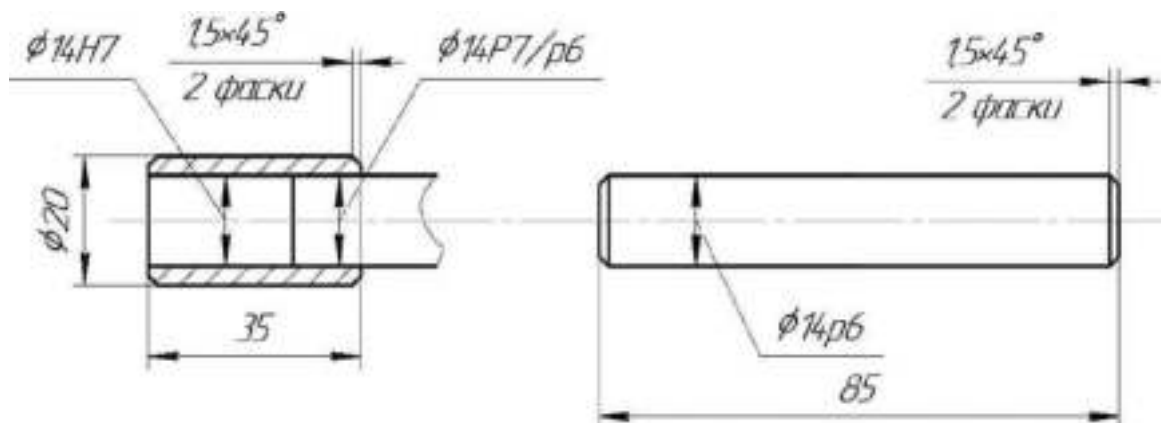


Рисунок – 2.5. Складальний ескіз з'єднання з натягом

### 2.1.3. Установка для дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя під впливом магнітного поля

В даний час розроблено нові засоби аналізу поверхонь тертя, що дозволяють досліджувати структури систем, змінених властивостей матеріалів. впливу зовнішніх факторів та процесів зношування. Виявлені при лабораторних дослідженнях тенденції та залежності зміни сил, величин коефіцієнта тертя можуть стати базисом для розробки та використання описаних ефектів у машинобудуванні.

«Аналіз літературних джерел показує, що молекулярну складову коефіцієнта тертя та її зміну, за впливу струму та магнітного поля, можна оцінити за допомогою трибометрів (кулькових або роликів)» [45, 51].

З цією метою було розроблено інденторну установку дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя з можливістю впливу магнітним полем [7], представлена на рисунку 2.6.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

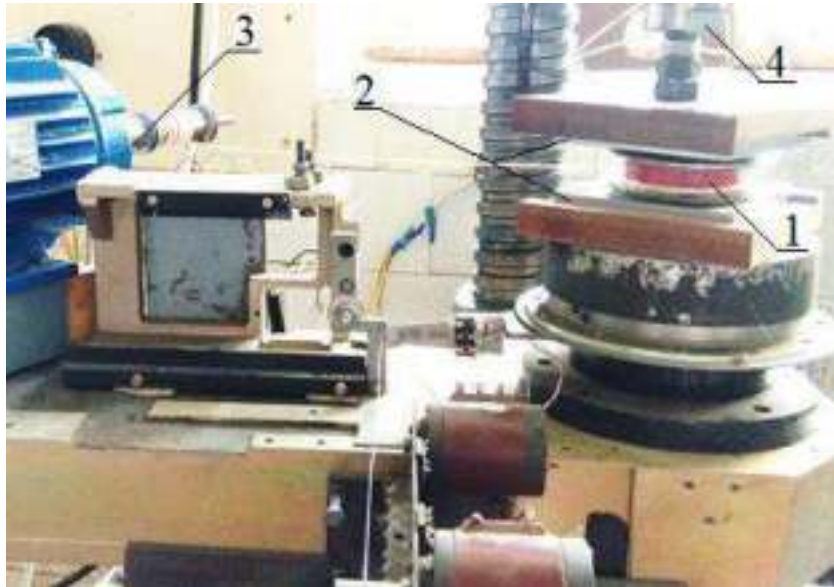


Рисунок – 2.6. Установка для вимірювання молекулярної складової коефіцієнта тертя

Установка змонтована на базі свердлувального верстата. Живлення електродвигуна 3 здійснюється за допомогою частотного перетворювача для плавного пуску та роботи двигуна. У патрон обертання свердлильного верстата через немагнітну втулку затискається верхня обойма зразка 2. Між зразками встановлюється однокульковий індентор 1. Вертикальне навантаження задається через вал свердлувального верстата 4. Струм обмотки інденторного пристрою контролюється амперметром. Пристрій реєстрації (тензометрична станція) показань підключається до комп'ютера, де дані перетворюються на графічний вигляд, і таруються спільно з тензобалкою (рисунок 2.7).



Рисунок – 2.7. Загальний вигляд тензобалки  
Однокульковий трибометр (рисунок 2.8), містить обмотку 4 створює

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

МДС, яка виконана з 112 витків (довжиною 1 м) мідного дроту діаметром 1,2 мм. Куля 1 встановлюється немагнітний корпус 2. Діскові накладки 3 накривають корпус, утворюючи паз для обмотки. Індентор затискається зразками 5, в процесі роботи проміжок між накладкою і зразками становить 1,5...2 мм.

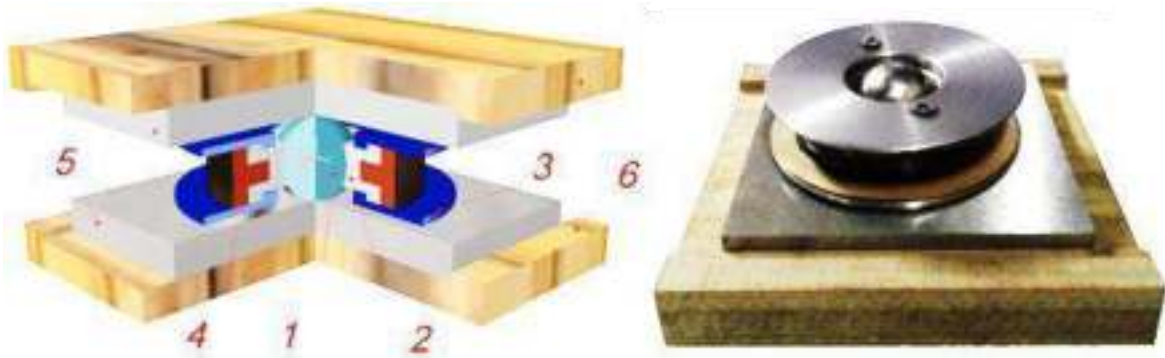


Рисунок – 2.8. Інденторний пристрій однокулькового трибометра:  
1 – куля; 2 – корпус; 3 – накладка; 4 – обмотка електромагніту; 5 – зразок; 6 – текстолітовий утримувач

Верхній і нижній зразки встановлюються текстолітові тримачі 6, які забезпечують магнітну ізоляцію. Експерименти проводилися при різних навантаженнях (рисунок 2.9), на кулю (було обрано три навантаження  $N = (13, 23 \text{ і } 33) \text{ Н}$ , створювані вантажем постійної маси). Сила притискання зразка при намагнічуванні (магнітним полем) визначалася динамометром, приєднаним до верхнього зразка. Оскільки площа контакту мала, а сила (примагнічування) за повного насичення контакту вбирається у 0,1 М, то нею можна знехтувати.

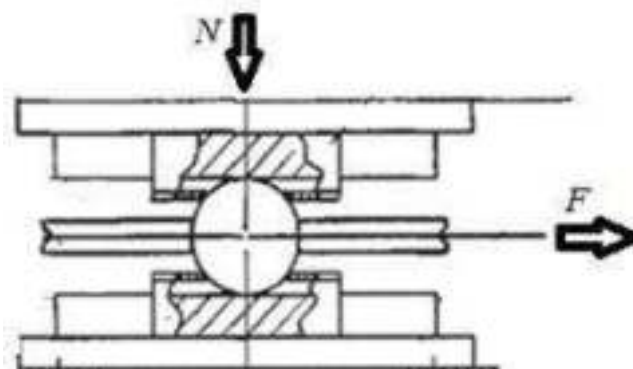


Рисунок – 2.9. Схема визначення моменту тертя (обертання зі

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

зрушенням)

Індентор встановлюється між зразками та навантажувався силою  $N$ . Через точки тертя з верхнім та нижнім зразками проходить вісь обертання. До індентора прикладена (через нерозтяжну нитку) сила  $F$ , вектор сили винесений від вертикалі кулі, що створює умови для її обертання зі зміщенням.

Використання індентора дозволяє досягти швидкого насичення сталі, оскільки магнітне поле стягується в зону контакту. Ефективність підвищується за рахунок розташування обмотки поблизу від зони тертя і матеріалів різної магнітної проникності. Насичення настає за індукції 1,5 Тл. Магніторушійна сила становить 90 А – витків.

#### 2.1.4. Установка для дослідження триботехнічних показників пар тертя ковзання в умовах впливу магнітного поля

Для дослідження впливу магнітного поля на триботехнічні показники пар тертя ковзання, було розроблено та виготовлено установку, представлену на рисунку 2.11.



Рисунок – 2.11. Установка для проведення випробувань пар тертя ковзання під впливом магнітного поля

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За основу взята конструкція свердлильного верстата 1. Електроживлення двигуна 2 верстата здійснюється за допомогою частотного перетворювача 6 для плавного регулювання частоти обертання диска тертя 3. У патрон обертання свердлильного верстата через немагнітну втулку затиснуто пристрій

3. Вертикальне навантаження задається навантажувальним пристроєм 12. На станині свердлильного верстата встановлена конструкція, що містить нижній опорний диск 4, встановлений на два підшипникові вузли і має можливість обертання навколо осі.

Для вимірювання сили тертя (коефіцієнта тертя) на нижній диск через ізоляційну прокладку укріплена тензобалка 9 з тензодатчиком. Пристрій зняття показань 7 підключено до комп'ютера, тарування тензобалки проводиться з використанням диска 11. Конструкція нижнього опорного диска дозволяє розміщення зразків різного діаметра та форми перерізу (рисунок 2.12).

Перші варіанти зразків у зв'язку з різним діаметром мали різну площу контакту і різні котушки 5 (малюнки 2.11, 2.12), тобто. різне число витків при однаковому перерізі дроту, які при їх монтажі на обидва зразки підключалися такими способами:

- послідовно, з варіативністю по полярності з'єднання початку і кінця обмоток котушок;
- паралельно, з варіативністю по полярності з'єднання початку і кінця обмоток котушок.

У цьому змінювалася сила струму на котушках (збудження магнітного поля). Передбачалася можливість не підключати відразу обидві котушки, а другий (центральний) зразок залишити як магнітопровід. Блок живлення котушок 10 та амперметр 8 представлені на рисунку 2.11.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок – 2.12. Електромагнітні котушки установки та досліджувані зразки

Вплив магнітних силових ліній на зону контакту в режимі тертя здійснюється наступним чином: магнітне поле проходить через зразок тертя (тримач котушки) на верхній диск тертя через повітряний зазор на нижню опору. Або через зразок тертя, верхній диск тертя, через маленький повітряний зазор ( $\approx 1$  мм) на центральний тримач котушки, де при підключеній котушці поле посилюється або послаблюється на нижню опору, і поле замикається. На рисунку

2.13 представлені схеми впливу магнітного поля у разі різного підключення магнітних котушок (А – D)

Для оцінки впливу магнітного поля було реалізовано схему трибометра для випробувань пари тертя «палець – диск» із встановленою котушкою (рисунок 2.14). Схема, що ілюструє картину магнітного поля представлена на рисунку 2.13, варіант З.

Особливістю трибометра, представленого на рисунку 2.14 є те, що палець закріплений на нижньому опорному диску, а верхній диск, що обертається, притискається до пальця під дією вантажу постійної маси.

На рисунку 2.15 показаний зразок із встановленою на ньому електромагнітною котушкою та додатковою котушкою, які можуть створювати магнітні потоки відповідно до рисунка 2.13, варіант D.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

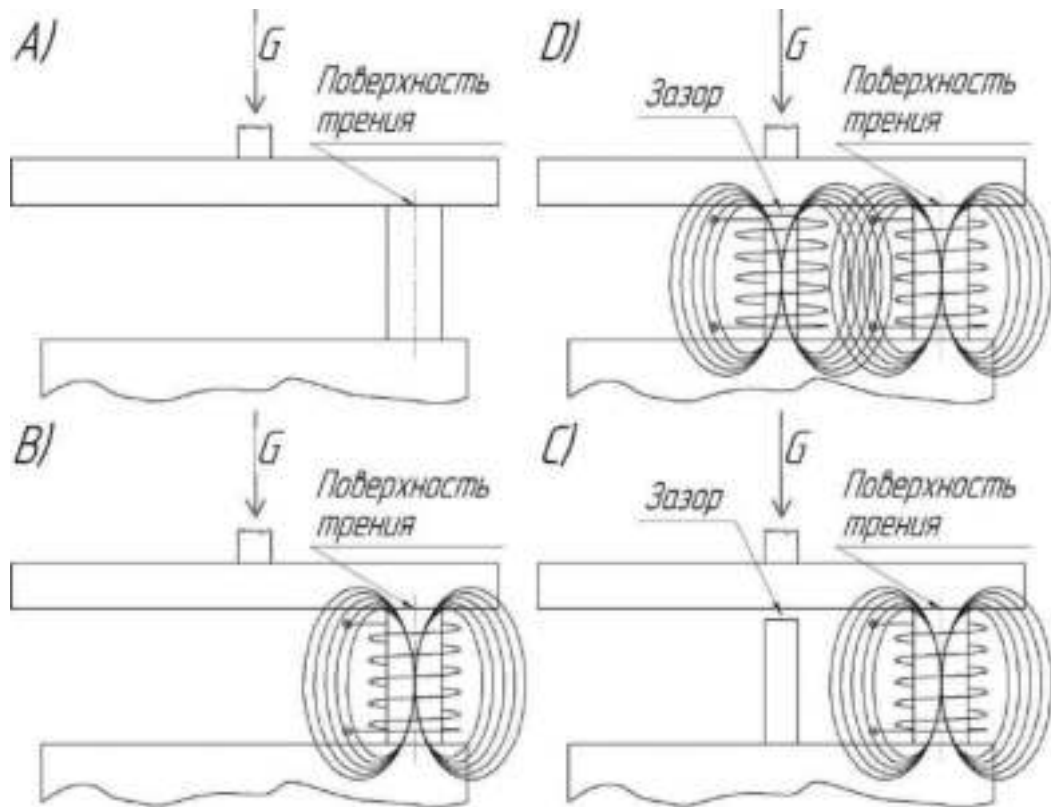


Рисунок – 2.13. Схеми підключення магнітних котушок та їх полів за варіантами підключення: А. – зразок без котушки; В – зразок із котушкою (магнітним полем); С – зразок з котушкою та центральним стрижнем. (замкнене поле, зазор у стрижня з площиною тертя.); D – котушки на зразку та стрижні, послідовне або паралельне підключення.



Рисунок – 2.14. Трибومتر для випробувань пари тертя «палець –

диск»: 1, 2 – відповідно палець та диск, 3 – тензобалка



Рисунок – 2.15. Котушки на зразку та стрижні

Магнітне поле створює в зоні тертя силу додаткового електромагнітного тяжіння, яка залежить від напруженості магнітного поля та площі контакту. Притягнення диска до пальця під впливом магнітного поля (примагнічування) визначалося з допомогою динамометра, приєднаного до диска. Величина магнітної складової сили притискання диска до пальця стала і тому не враховувалася.

Після встановлення зразків та котушок проводилися випробування на тертя без магнітного поля та за його наявності. При цьому варіювалися контактні тиски шляхом зміни навантаження та величини струму, що проходить через електромагнітну котушку для різних схем підключення котушок. Оцифровані дані результатів експерименту записувалися на комп'ютер.

Послідовність виконання експериментів.

1. Тарування тензобалки.
2. Очищення робітників поверхонь зразків, на початку промиванням чотирихлористим вуглецем, потім спиртом.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Встановлення зразків в установку.
4. Встановлює необхідне значення сили струму або величини магнітного поля (за умовами експерименту) без підключення до зразків.
5. Навантаження вертикальною силою.
6. Витримка зразка під навантаженням.
7. Увімкнення електроживлення котушки (котушок).
8. Увімкнення електродвигуна.
9. Після повороту диска (за умовам експерименту) вимкнення електродвигуна.
10. Виїмка зразка.
11. Повторне тарування тензобалки.

Вимірювальна частина системи є продукцією «ZETLab» та описана в попередній частині.

#### **2.1.5. Установка для зміцнення нерухомого з'єднання за умов впливу магнітного поля**

Завдання експериментальних досліджень цього етапу полягає в наступному: необхідно якісно та кількісно встановити факт зміни сили зриву посадки базового варіанту (без впливу магнітного поля) на зрив з варіантом, при якому на з'єднання з натягом впливає магнітне поле. Передбачається, що вплив магнітного поля на пресову посадку, залежно від напруженості магнітного поля та напрямки вектора магнітної індукції, буде збільшувати величину сили опору зриву посадки за інших рівних умов, або її послаблювати. Для проведення експериментальних досліджень було розроблено та виготовлено установку, загальний вигляд якої представлений на рисунку 2.16.

Зразок пресової посадки (з'єднання з натягом стрижня і втулки) 2 встановлюється в поглиблення в нижній частині оправки 1 де втулка

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

впирається в саму оправку, а стрижень може безперешкодно проходити в отвір при зриві посадки. Навантажувальний пристрій є прес з ручним приводом з контрольованим збільшенням тиску (рисунок 2.17).

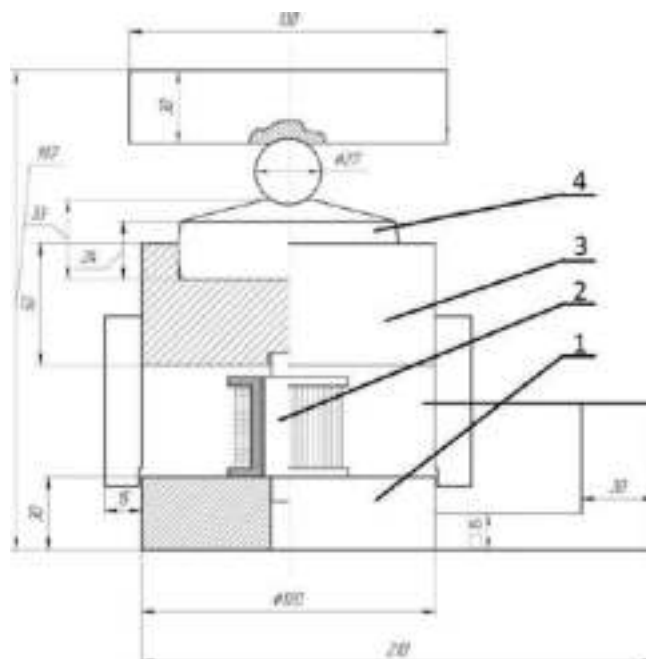


Рисунок – 2.16. Загальний вид установки для дослідження сили зриву посадки з натягом із зазором у магнітопроводах (пластини з боків)



Рисунок – 2.17. Прес, що використовується як установка для створення сили тиску на зразок

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Навантаження пресом прикладається до зразка 2 (стрижень) через реєструючий пристрій - месдозу 4, а також через центруючий пристрій 3 (рисунок 2.16). У цьому перекося компенсуються сферою. Навантаження прикладається вертикально до осі зразка до зриву.

Для тарування використовувався динамометр, який було встановлено послідовно силової схеми замість месدوزи. При цьому встановлювався нерозбірний зразок (цілий без пресової посадки), і кілька разів проводилося навантаження з реєстрацією величини навантаження по динамометру, а також напруги в діагоналі електричної мостової схеми месدوزи.

У ході експерименту досліджувалися такі фактори:

- вплив магнітного поля на пресову посадку металевих деталей;
- дія магнітного поля на пресову посадку металевих деталей з метою виявлення можливості використання ефекту.

Щоб здійснити зрив пресової посадки, були виготовлені спеціальні оправки для закріплення зразків та встановлення котушок з магнітним полем, а також реєструючих пристроїв. Були виготовлені зразки із зазначеною пресовою посадкою з однаковою геометрією та силою запресування.

Для дослідження впливу магнітного поля на пресову посадку було реалізовано таку послідовність проведення експерименту:

1. Проводить початкову тарування системи, як по навантаженню, так і по електричній частині.
2. Установка зразка в поглиблення в нижній частині оправки, де втулка впирається в саму оправлення, а стрижень може проходити безперешкодно в отвір при зриві посадки.
3. Навантаження стрижня силою в осьовому напрямку до моменту зриву пресової посадки (зсув стрижня щодо втулки) з реєстрацією сили впливу. У цьому вплив магнітного поля відсутня.
4. Проведення такого ж експерименту з зриву посадки, як і в

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

попередньому пункті, але за впливом магнітного поля. При цьому в залежно від напруженості магнітного поля та напрямки вектора магнітної індукції буде або збільшення зусилля зриву пресової посадки, або його ослаблення.

5. Проведення статистичної обробки даних експерименту та виявлення ступеня впливу магнітного поля на пресову посадку та методи управління величиною цього впливу.

*Варіант випробувань із паралельним осі зразка (вертикальним) напрямом силових ліній магнітного поля.*

Зразок виготовлений таким чином, що може поміщатися всередині однієї котушки з магнітним полем (соленоїда) і має більшу осьову довжину для запобігання пошкодженню котушки (рисунок 2.18). Це дозволило організувати магнітне поле паралельно до пресової посадки (лінії контакту стрижня з втулкою).

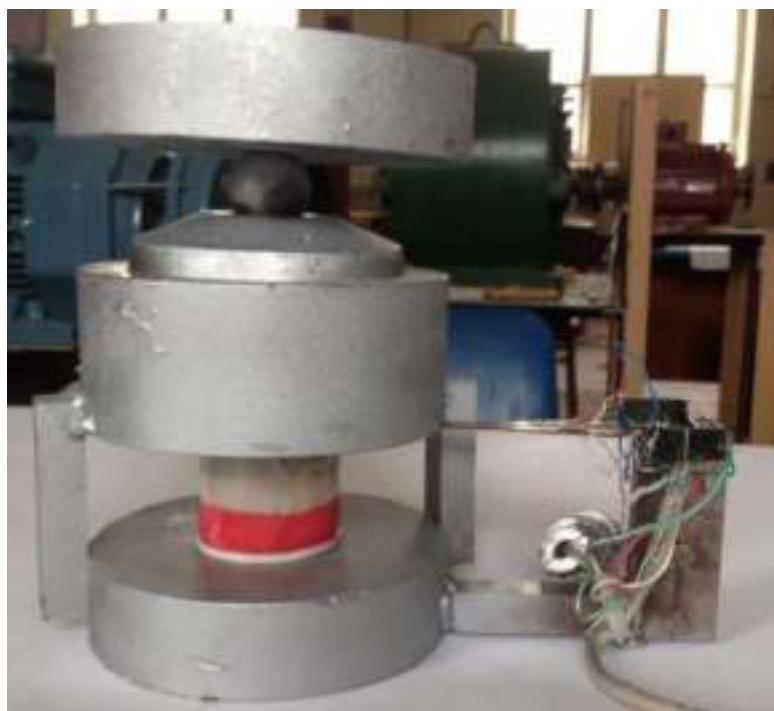


Рисунок – 2.18. Установка представлена на рисунку 2.16 з однією котушкою

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### **3. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСИ ТЕРТЯ**

#### **3.1. Дослідження процесів тертя металевих тіл під час вирішення контактних завдань**

В даний час до важливих завдань теорії тертя відносяться визначення та розрахунок сили тертя, встановлення закономірностей сили тертя від факторів, що впливають на сам процес. Під тертям будемо розуміти реакцію трибологічної системи під дією зовнішньої сили, що зрушує. Сила тертя діє паралельно до площини торкання твердих тіл і спрямована протилежно руху.

Для вивчення впливу струму та магнітного поля на тертя металевих тіл можна застосовувати методи теорії подоби, зокрема метод аналізу розмірностей [4]. У джерелах згадується більше 20 факторів, що впливають на процеси, що відбуваються в зоні тертя, там електричний струм і магнітне поле [84].

Несуттєва залежність сили тертя від швидкості ковзання проявляється за низьких швидкостей відносного ковзання. Це пов'язано з тим, поки температура, що генерується тертям, не викликає протікання хімічних реакцій на поверхні за рахунок наявності проміжного та навколишнього середовищ, що призводять до утворення модифікованих шарів. При низьких температурах також відбувається зміна фізико-механічних властивостей матеріалу поверхні, наприклад твердості. При підвищених швидкостях відбувається зміна властивостей поверхневих шарів. За рахунок модифікації поверхневих шарів і різного роду плівок, що утворюються в результаті хімічних реакцій, має місце тертя інших (змінених) елементів, і залежність сили тертя від швидкості буде вже іншою.

Таким чином, залежність сили тертя від швидкості визначається

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінами поверхневого шару. Зазначимо, що існування зовнішнього тертя за підвищеної температури визначається правилом позитивного градієнта механічних властивостей по глибині [50].

Тертя може бути пояснено «тільки взаємодією нерівностей [69, 90]. При проектуванні будь-якого технічного об'єкта інженер практично завжди стикається з контактними завданнями, пов'язаними із взаємодією поверхонь, що контактують [43]. При безпосередньому тиску одного тіла інше фактична площа їх контакту складається з окремих плям, що несуть все навантаження. Цікавить оцінити форму та розміри площ дискретних плям торкання, а також розподіл цих майданчиків. Зазвичай у задачах механіки контактної взаємодії шорстких поверхонь використовують розподіл висот виступів так, щоб опорні криві профілю та моделі збігалися. Так, у моделі Грінвуда-Вільямсона прийнято закон розподілу, а в роботі показано, що розподіл висот вершин не завжди є Гаусовим. З фізичної точки зору виявити та провести відповідний аналіз майданчиків контакту в мікрометровому діапазоні вимірювання є досить складним завданням, і застосування комп'ютерних технологій уможлиблює проведення такого аналізу на основі теорії фракталів [93].

Фрактальна розмірність визначається двома способами: методом "периметр - площа" для всієї карти контакту і методом "покриття" кожного острова окремо квадратною сіткою та вимірюванням числа осередків, що покривають площу, при зменшенні розмірів осередків [86]. У другому випадку фрактальна розмірність визначається для кожного  $i$ -го острова (плями), і остаточний результат обчислювався як середнє арифметичне.

Проведені додаткові дослідження показали, що найбільш прийнятним методом для оцінки фрактальної розмірності є метод «периметр – площа», т.к. Спосіб «покриття» кожного острова окремо є більш витратним і дає величезний розкид значень.

Порівняння співвідношення «периметр-площа» для нефрактальних та

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фрактальних геометричних об'єктів (пляма дотику представлена у вигляді острова) наведено у табл. 3.1».

Таблиця 3.1. Теоретичні співвідношення «периметр-площа» для нефрактальних об'єктів.

Фигура	Периметр $P$	Площадь $A$	$R=P/A^{1/2}$
Круг	$\pi D$	$\pi D^2/4$	3,545
Шестигранник	$6L$	$3^{3/2}L^2/2$	3,722
Квадрат	$4L$	$L^2$	4

У разі збільшення «гладкості» взаємодіючих поверхонь (зменшення шорсткості) сила тертя зростає. Відповідно до двоїстої природи тертя сила тертя складається з двох складових, одна з яких

На рис. 3.1 представлено схему контактної взаємодії.

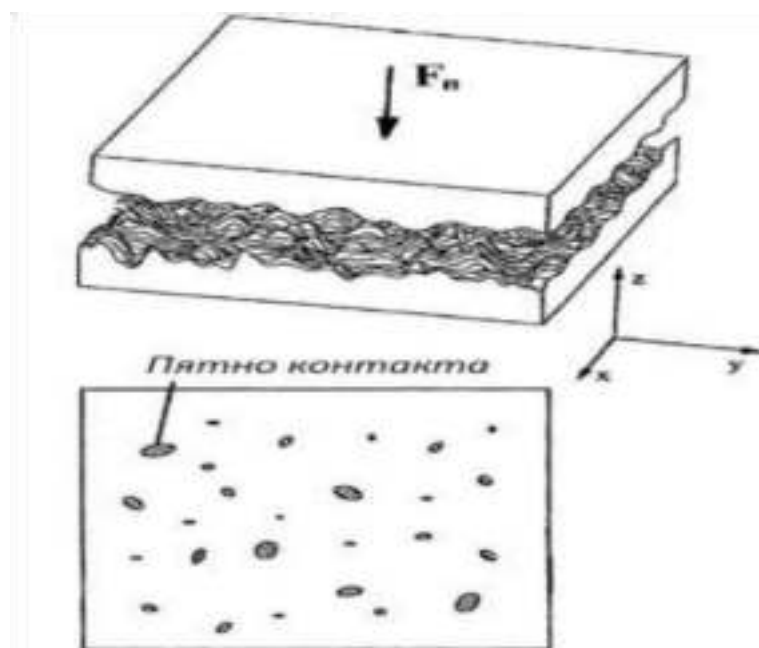


Рис. 3.1. Схема контактної взаємодії шорстких поверхонь

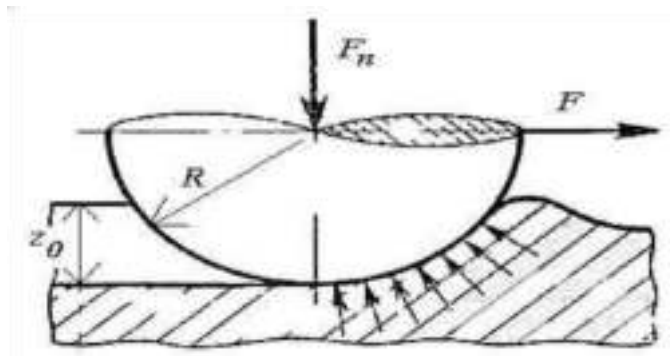


Рисунок 3.2. Проорювання напівпростору тіл, що взаємодіють, індентором у вигляді кулі

Розрахунок механічної складової тертя слід проводити за малих навантажень, моделюючи індентор як сфери, а за великих – конусом. Вважають, що в момент приробітку модель нерівності представляється у вигляді конуса, а при режимі зношування, що встановився, - індентором, верхня частина. Для оцінки сили тертя використовують найчастіше моделі нерівності як конусу або сфери. Молекулярна та механічна складові сили тертя при ковзанні теплонавантаженого контакту повинні бути скориговані у зв'язку із змінами фізико-механічних властивостей поверхневого шару та наявності

плівки внаслідок хімічних реакцій на поверхні тертя. Крім того, наведені залежності не містять у явному вигляді такі фізичні фактори, як швидкість та температура. Так, при зростанні швидкості відносного ковзання збільшується температура поверхні тертя, і знижується твердість, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості (при постійних значеннях  $\theta_0$  і  $\theta$ ). Наведені в трибологічних дослідженнях

кінетичні залежності коефіцієнта тертя справедливі для окремих випадків і ґрунтуються на емпіричних знаннях. Наскільки складна картина тертя ковзання можна переконатися, аналізуючи ефекти лежить на поверхні тертя [85], (рис. 3.5).

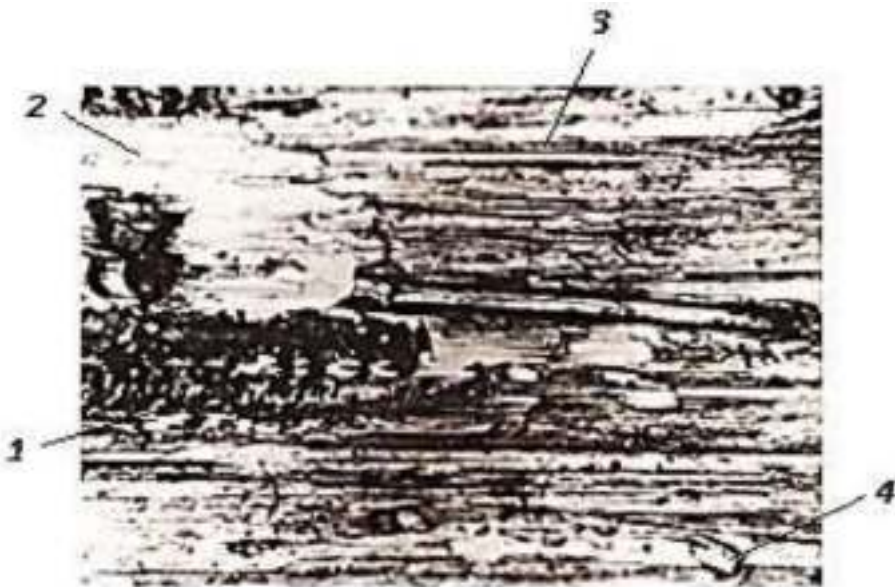


Рисунок 3.5. Поверхня тертя: 1 – молекулярна взаємодія та розрив матеріалу; 2 - намазування, що передує пелюстковий знос; 3 – проорання нерівністю сполученої поверхні; 4 - проорання частинками зносу

### 3.2. Процес намагнічування в умовах контактної взаємодії

#### 3.2.1. Розрахункові характеристики магнітного поля в умовах ковзного контакту

Важливо розуміти параметри та розподіл магнітного поля у пристрої. Для плоских структур математичні рішення виводять, виходячи з деяких припущеннях – аналітичних спрощеннях. Застосування спрощених математичних моделей достатньо на етапі попереднього розрахунку. Даний підхід призводить до наближеного рішення [6] і не може бути застосований до магнітних полів, що характеризуються складною геометрією,

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різноманіттям меж розділу середовищ, нелінійними магнітними властивостями. У той же час актуальним завданням є розрахунок тривимірних об'єктів, схильних до намагнічування. У такому разі одновимірні аналітичні рішення не можуть бути застосовані. Поставлені завдання призводять до вирішення диференціальних рівнянь Максвелла для квазістатичних електромагнітних полів.

Для підвищення ступеня достовірності математичних моделей потрібен аналіз магнітного поля у феромагнітних середовищах на основі застосування чисельних методів вирішення нелінійних крайових завдань. Такі дослідження дозволяють за новим побудувати математичні моделі та врахувати особливості процесів, що виникають з високими навантаженнями та нетиповими конфігураціями та співвідношеннями геометричних розмірів.

Чисельний аналіз охоплює широкий спектр завдань. Слід зазначити, що чисельні методи вимагають значних обчислювальних ресурсів, і з появою високопродуктивних комп'ютерів найбільш затребуваними. На сьогоднішній день відомі програмні продукти для розрахунку електромагнітних полів: Elcut, FEMM, Ansys та ін.

Викладений теоретичний посил був використаний для проектування дослідних зразків та передбачуваних до створення для їх випробувань установок з метою розробки креслень та проектування вимірювальних схем (підбору вимірювальної апаратури). При вивченні різних полів в електромеханічних системах [2, 25, 19] широкого застосування набули методи кінцевих елементів. Основний принцип методу кінцевих елементів полягає в тому, що обсяг ділиться на малі геометричні елементи, які на площині мають форму трикутників, прямокутників, а при тривимірному завданні – тетраєдрів, паралелепіпедів і утворюють сітку з цих елементів.

Теоретичні дослідження з моделювання намагніченості сполучень «сталь – сталь» стосовно фрикційних гасників коливань проводилися з

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використанням сучасної системи моделювання магнітного поля в кінцевому елементному пакеті ANSYS.

Дослідження методом кінцевих елементів з використанням програмного продукту для розрахунку електромагнітних полів ANSYS дозволило отримати розподіл магнітного поля в інденторному пристрої однокулькового трибометра установки для вимірювання молекулярної складової коефіцієнта тертя (рис. 3.7).

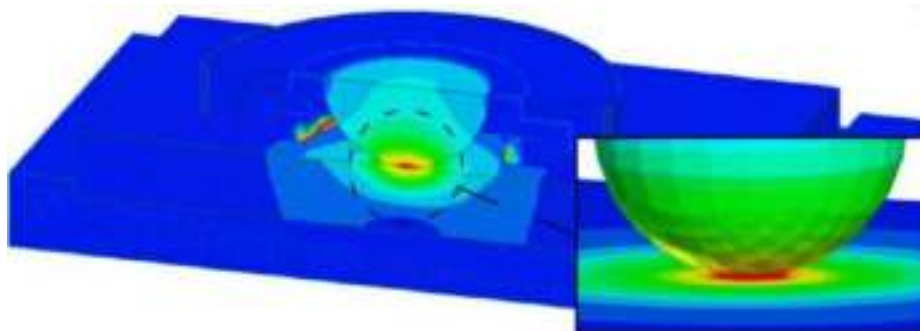


Рисунок 3.7. Концентрація магнітного поля в однокульковому трибометрі

На рис. 3.8 наведено залежність параметрів магнітного поля в зоні контакту інденторного пристрою та зразка від величини струму, що проходить в обмотці.

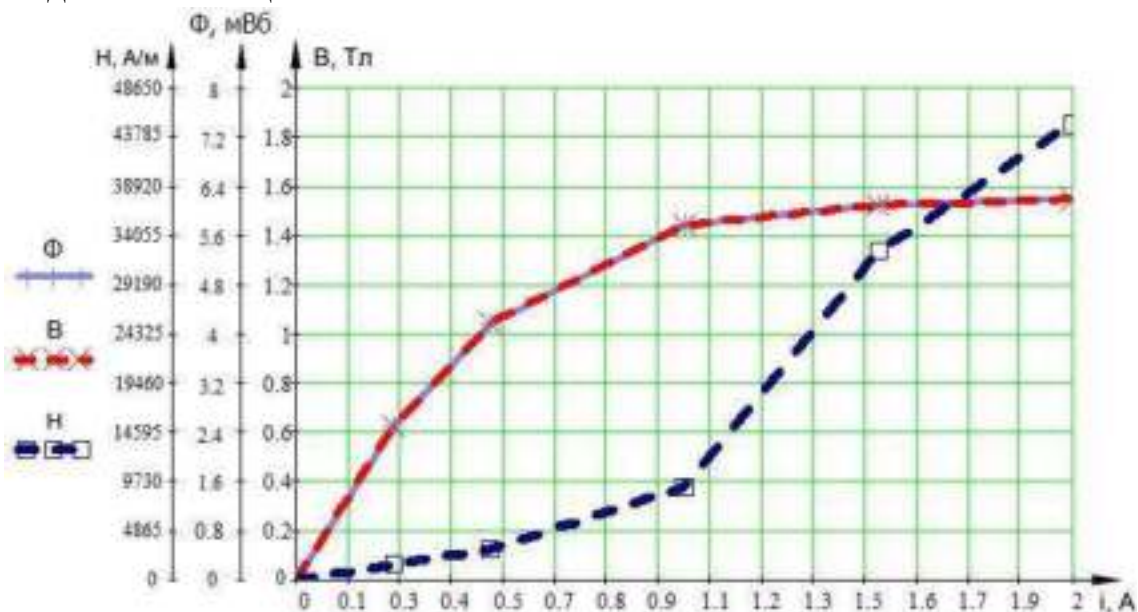


Рисунок 3.8. Залежність параметрів магнітного поля від сили струму.

1. Будується геометрія розрахункового магнітного ланцюга.

Визначаються джерела магнітного поля. У аналізованих моделях МП створювалося протіканням по котушці постійного струму. Установка складається з двох пластин та одного або двох стрижнів. На стрижні надіті котушки (рис. 3.9).

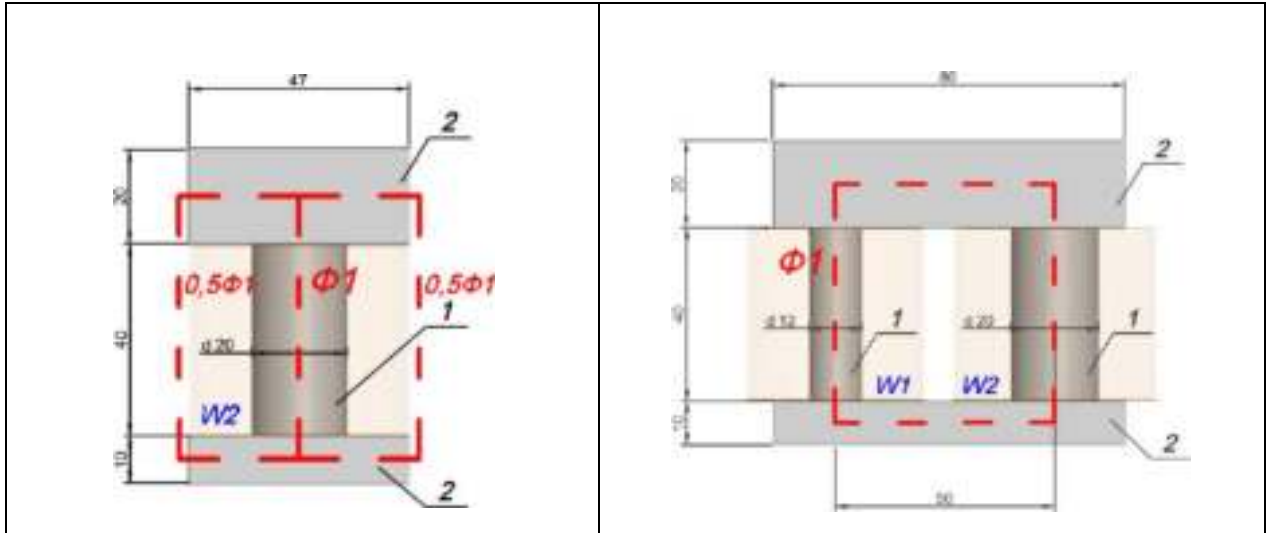


Рисунок 3.9. Розрахункові магнітні ланцюги: 1 – стрижень; 2 - пластина, W1 – котушка 1300 витків; ; W2 – котушка 1500 витків

2. Задаються основні криві намагнічування стали і магнітні проникності. Магнітна проникність повітря  $\mu=1$ , для парамагнітних матеріалів  $\mu \approx 1$ . Магнітопровід виконаний із матеріалу Ст. 45 основна крива намагнічування наведена на рис. 3.6.
3. Здійснюється побудова сітки кінцевих елементів (рис. 3.10).

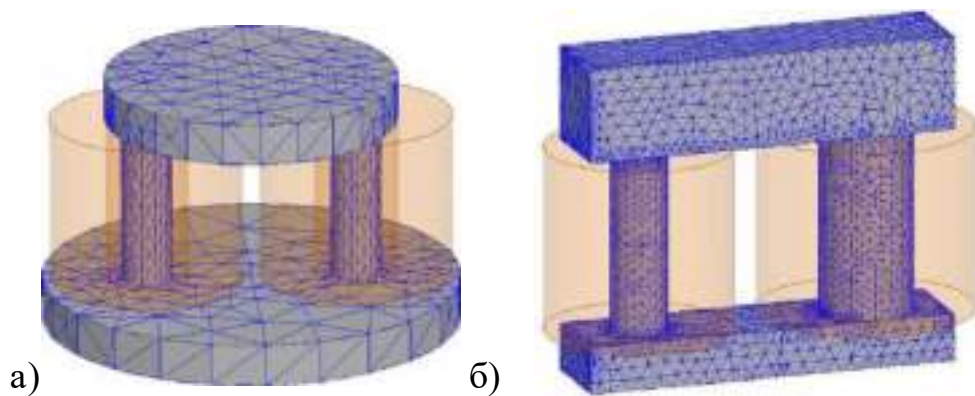


Рисунок 3.10. Розбиття сіткою кінцевих елементів:  
а – великий крок 1...10 мм; б - дрібний крок 0,1 ... 2 мм

Встановлено, що розмір сітки під час вирішення завдань МКЕ дуже важливий. Для отримання рішення високої точності потрібна досить густа сітка та значні обчислювальні ресурси. При докладній сітці розрахунок займає час.

4. Розрахунок характеристик поля, отримання градієнта розподілу магнітного поля в ланцюзі, побудова графіків.

Проводиться намагнічування з поступовим зростанням струму котушки від

0 до 0,8 А. Наявність повітряного зазору сприяє спрямуванню вебберамперної характеристики ланцюга (рис. 3.11). Насичення магнітного поля в центрі котушки не досягається (рис. 3.12) стосовно характеристики магнітопроводу (Сталь 45), наведеної на рис. 3.6.

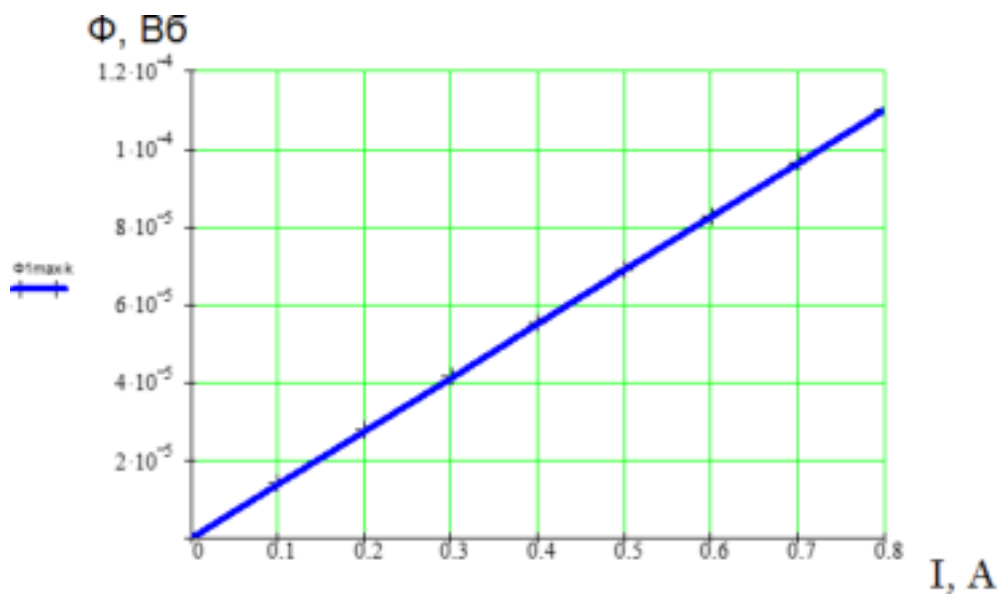


Рисунок 3.11. Залежність магнітного потоку стрижня, Вб від струму, А

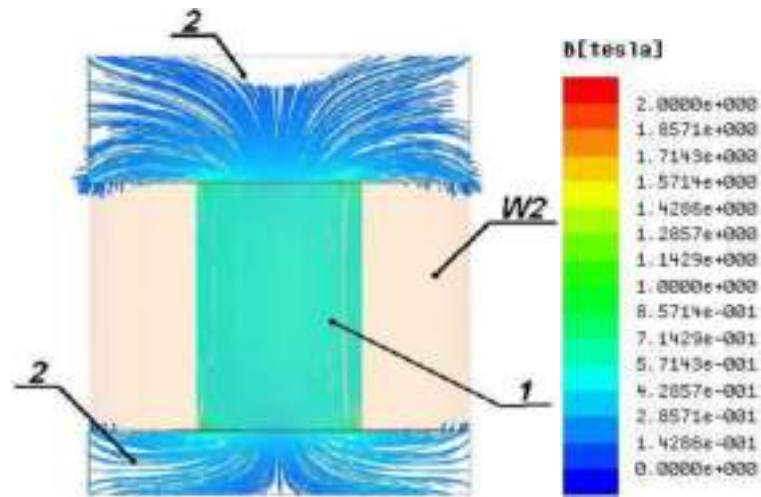


Рисунок 3.12. Концентрація магнітного поля сталі зразка: 1 – стрижень; 2 – пластина; W2 – котушка 1500 витків

### 3.2.2. Розподіл магнітного поля за умов нерухомого з'єднання

Дослідження методом кінцевих елементів з використанням програмного продукту розрахунку електромагнітних полів ANSYS дозволило отримати розподіл магнітного поля установки для дослідження сили зриву посадки з натягом.

Результати розподілу магнітного поля (з урахуванням теоретичних досліджень) проектованої установки із зразками із натягом наведено графічно на рис. 3.19 – 3.21.

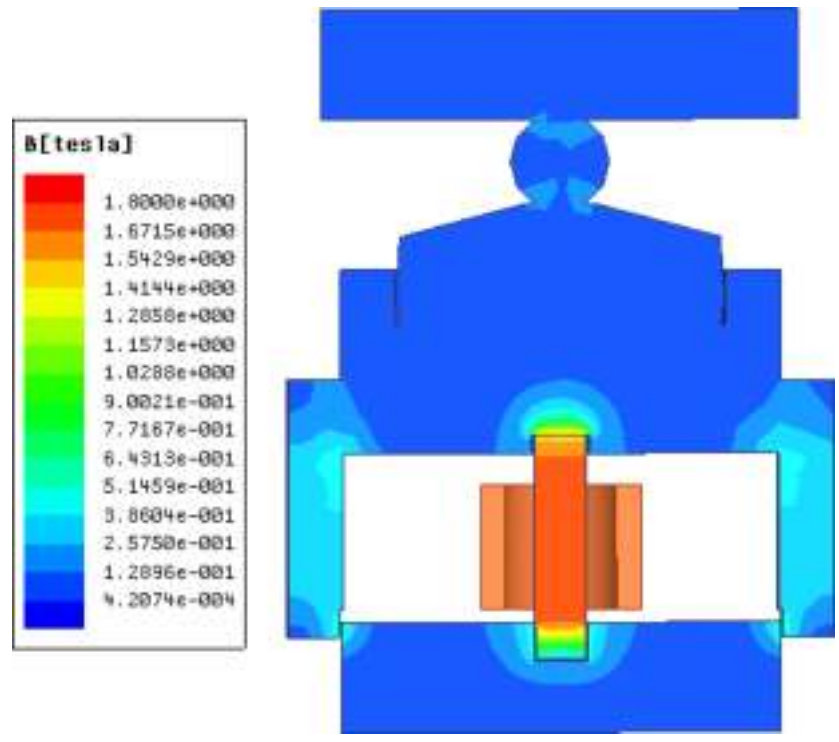


Рисунок 3.19. Концентрація магнітного поля у зразку при одній котушці Струм у котушці 1,4 А, МДС 2100 А, витків 1500

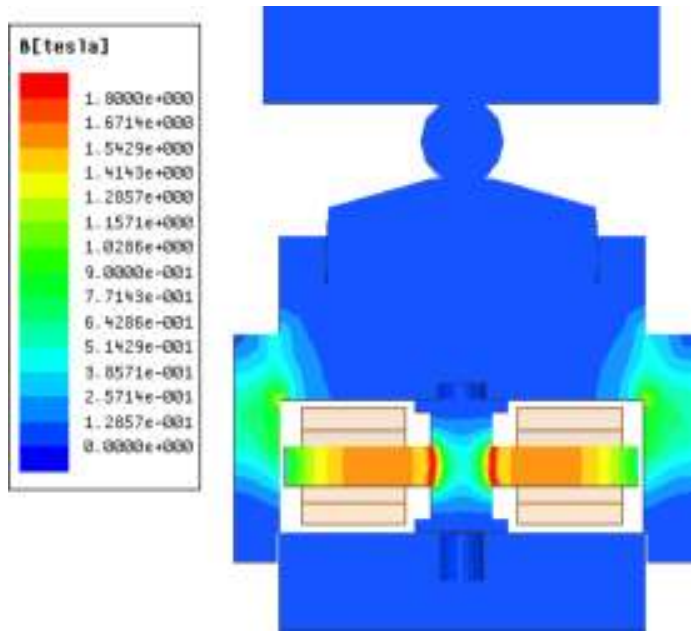


Рисунок 3.20. Концентрація магнітного поля у зразку при двох котушках, магнітний потік узгоджений. Струм котушок 1 А, МДС 1300 А, витків 1300

### 3.3. Дослідження впливу магнітного поля на молекулярну складову тертя

Експериментальні та теоритичні дослідження тертя та зношування «об'єднують адгезійні та деформаційні процеси в молекулярно-механічну теорію тертя. Силу тертя Крагельський представляв як суми механічної  $F_{міх}$  і молекулярної  $F_{мол}$  складових» [50, 51].

У результаті коефіцієнт тертя є функцією площі контакту тіл і тиску, і навіть залежить від молекулярної структури поверхонь.

Трибологічні дослідження дозволили виявити закономірності поведінки трибосистем у рамках молекулярно-механічної теорії тертя, запропонованої І.В. Крагельським і його учнями і послідовниками. Незважаючи на велику кількість публікацій у галузі тертя та зношування, що дозволяють раціонально підбирати матеріали пар тертя та прогнозувати поведінку вузла тертя у різних умовах експлуатації, деякі питання залишаються не дослідженими. Так, серед невирішених питань виокремлюється питання про вплив магнітного поля на величину коефіцієнта тертя. Велика напруженість магнітного поля за деякими дослідженнями, у ряді випадків, впливає на механічну складову сили тертя через магнітопластичність, зміцнення поверхневого шару тощо.

Пік сили відповідає зриву фрикційних зв'язків (зрізу). Ця максимальна сила, помножена на радіус оправлення, дає зовнішній момент, який відповідає максимальному моменту тертя обертання кулі в лунці, утвореної при впровадженні кулі в напівпростір. Метою цих випробувань є встановлення впливу магнітного поля та його напруженості на величину молекулярної складової коефіцієнта тертя сталевих поверхонь.

Як приклад розглянемо результати досліду при навантаженні  $N = 23$  Н. Куля має радіус  $R = 13,5$  мм; радіус оправлення  $R_{оп} = 31,25$  мм. Картина зміни сили тертя від навантаження, прикладеної до оправлення, насадженої на

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кулю, представлена на рис. 3.24.

а) навантаження 23 Н без магнітного поля

б) навантаження 33 Н без магнітного поля



Рисунок 3.24. Осцилограми зміни сили тертя від навантаження, доданої до оправлення кулі (навантаження  $N = 23 \text{ Н}$  та  $33 \text{ Н}$ )

Рисунок 3.25 показав, що молекулярна складова коефіцієнта тертя в діапазоні, що розглядається, не залежить від контактних тисків. Ці дані узгоджуються з результатами проведених раніше досліджень [94].

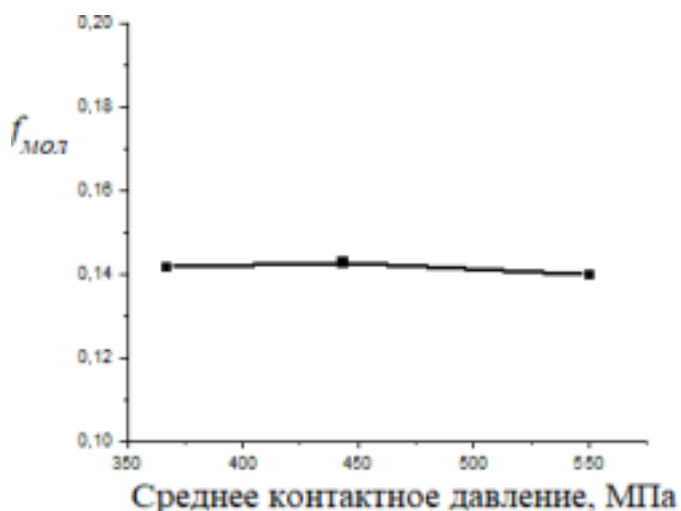


Рисунок 3.25. Залежність молекулярної складової коефіцієнта від тиску

Після проведення циклу дослідів за різних навантажень без магнітного поля були повторені досліди при тих же навантаженнях, але при впливі магнітного поля з різною напруженістю. Метою цих випробувань було встановити вплив магнітного поля та його напруженості на величину молекулярної складової коефіцієнта тертя сталевих поверхонь. Типова картина зміни сили тертя під впливом магнітного поля показано на рис. 3.26.



Рисунок 3.26. Осцилограми зміни сили тертя від навантаження, прикладеної до оправлення кулі, при впливі магнітного поля ( $N = 23 \text{ Н}$ , коефіцієнт тертя  $f_{\text{мол}} = 0,142$ )

Картина зміни сили після дії магнітного поля якісно не відрізняється від картини без магнітного поля. При обертанні кулі в лунках напівпростору, що деформується, чітко показана зона попереднього зміщення, яка закінчується зривом - зрізом фрикційних (молекулярних) зв'язків.

Додаток магнітного поля призводить до зростання моменту тертя проти моментом тертя без магнітного поля. Експерименти показали нелінійну залежність моменту тертя від сили струму, причому в межах зміни сили струму спостерігається максимум сили тертя, що відповідає діапазону 3...4 А. Подібна поведінка трибосистеми, що розглядається, спостерігається і при інших нормальних навантаженнях. При вплив магнітного поля

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

спостерігається зростання сили, що призводить до обертання кулі.

Наявність максимуму наведеної залежності можна пояснити одночасним перебігом двох протилежних процесів. З одного боку, «інтенсифікацією виходу дислокацій на сталеву поверхню торкання, що деформується, що призводить до зростання кількості активних центрів і формування фрикційних молекулярних зв'язків. З іншого боку, збільшення напруженості магнітного поля сприяє зростанню процесу окислення, коагуляції (об'єднання частинок зносу) у великі за розмірами агрегати, що знаходяться в зоні контакту і виконують роль тіл кочення (третього тіла), що знижують момент тертя».

Таким чином, розглянуто два процеси впливу магнітного поля на елементи кулькового трибметра – вихід дислокацій на поверхню тертя та формування активних центрів, що збільшують опір відносному руху, а з іншого боку – окислення та утворення тіл кочення (третього тіла), що знижують тертя. Превалюватиме той процес, ймовірність протікання якого буде в даний момент найбільшою. При силі струму до 3...4 А ймовірність утворення активних центрів фрикційних молекулярних зв'язків більша за ймовірність протікання процесу окиснення поверхні тертя (формування оксидів та їх руйнування), і спостерігається зростання молекулярної складової сили тертя. При подальшому збільшенні сили струму відбувається зниження молекулярної складової сили тертя, так як ймовірність утворення оксидів та коагуляції частинок більша, чим ймовірність перебігу процесу формування активних центрів. Описане є яскравим прикладом конкуренції у досліджуваних параметрах, є предметом вивчення.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **4. ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСИ ЗНОШУВАННЯ**

### **4.1. Вплив магнітного поля на процеси зношування в умовах рухомого та нерухомого контактів**

«При відносному переміщенні тіл, що деформуються, дотик між ними відбувається не в точках, а в зонах, званих майданчиками контакту [35]. На цих майданчиках контакту можуть відбуватися дуже різноманітні фізико-механічні явища, наприклад, пружні та пластичні деформації частинок, молекулярне зчеплення частинок, адсорбція тонких шарів газу, дисперсність колоїдальних частинок та ін. Деякі вчені при вивченні цього питання нарахували понад 20 таких явищ, причому багато хто з них опинився у взаємному зв'язку. Кількісні і якісні співвідношення між цими явищами, що відбуваються на пружних майданчиках двох тіл, що стикаються (труться), залежать від наявності між ними рідинного або газоподібного прошарку – мастильного матеріалу».

Тертя та зношування тісно пов'язані між собою. Фундаментальні дослідження щодо впливу магнітного поля на тертя та зношування трибосистем практично відсутні. Для феромагнітних матеріалів, що є елементами трибосполучень, основний вплив на процеси тертя та зношування має намагніченість, що посилюється доменами. Саме намагніченість формує магніострикційну пружну напругу, масштаби освіти і руху дислокацій, відповідальних за пластичні властивості поверхні тертя.

#### **4.1.1. Вплив магнітного поля на процеси зношування в умовах ковзного контакту**

Деякі дослідники вважають, що магнітне поле безпосередньо не впливає на тертя та зношування матеріалів. Воно впливає на процеси, пов'язані із взаємодією магнітного поля із зарядженими частинками, інтенсифікуючи в даному випадку процес підвищеного утворення активних

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк. 67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центрів на поверхні тертя, що, у свою чергу, призводить до зростання опору відносного руху елементів пари тертя. Процес утворення оксидної плівки не є провідним, оскільки виникнення оксидної плівки на поверхні тертя компенсується зносом цієї плівки. До того ж ймовірність утворення активного центру вища, ніж утворення оксиду (рис. 4.6).



Рисунок 4.6. Продукти зношування

Продуктами зношування є оксидні частинки чорного кольору, які під дією магнітного поля виносяться із зони тертя.

Опрацювання пари тертя без магнітного поля за схемою «палець – диск». На рис. 4.7 представлені мікрофотографії сталеві поверхні тертя при різному збільшенні після опрацювання.



Рисунок 4.7. Мікрофотографії сталеві поверхні тертя після підробітку без магнітного поля за схемою «палець – диск»

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

На рис. 4.7 видно сліди проорання та намазування внаслідок пластичного деформування нерівностей та перенесення на контртіло.

Випробування без магнітного поля після опрацювання. На рис. 4.8 представлена мікрофотографія поверхні після випробувань.

Після приробітку відсутні перенесення матеріалу з однієї поверхні на іншу, сліди проорання показують збільшену ширину, що пов'язано зі зростанням радіусу закруглення вершин виступів після закінчення процесу приробітку та пружним характером взаємодії.



x250

Рисунок 4.8. Мікрофотографія поверхні після випробувань без магнітного поля

Випробування за наявності магнітного поля. На рис. 4.9 представлені мікрофотографії поверхні після випробувань з впливом магнітного поля при різних збільшеннях.

Використовувалася одна котушка, через витки якої пропускався струм 3,5 А. Порівняння мікрофотографій показує поліпшення якості поверхні (не видно яскраво виражені сліди проорання). Це підтверджує гіпотезу про виведення із зони тертя під дією магнітного поля частинок зносу.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



x125

Рисунок 4.9. Мікрофотографії припрацьованої поверхні при дії на пару тертя ковзання магнітного поля (при різному збільшенні)

Вплив магнітного поля позначається на інтенсифікації процесу окислення поверхні та формування оксидної плівки. Спостережуване збільшення коефіцієнта тертя і зниження зносу можна пояснити руйнуванням тонкої оксидної плівки та взаємодією ювенільних поверхонь, при цьому частки зносу виносять із зони тертя під дією магнітного поля.

Таким чином, вплив магнітного поля на ковзний контакт без мастильного матеріалу призводить до посилення наступних ефектів:

- видалення частинок зносу оксидів заліза із зони контакту;
- зростання хімічної адсорбційної активності частинок зношування заліза або частинок оксидного заліза;
- збільшення шорсткості поверхні та зносу при малих швидкостях ковзання, коли орієнтація магнітного поля паралельна напрямку ковзання;
- посилення хемосорбційної активності кисню у поверхневому шарі феромагнітного матеріалу (при високих швидкостях ковзання) через вплив внутрішнього магнітного поля.

#### 4.1.2.3'єднання з натягом

Після проведення ряду експериментів, кілька зразків зазнали розрізу

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

по площині сполучення "стрижень - втулка". Зовнішній вигляд зразка, що розрізає, представлений на рис. 4.10. Далі готувалися шліфи візуального аналізу зони сполучення.



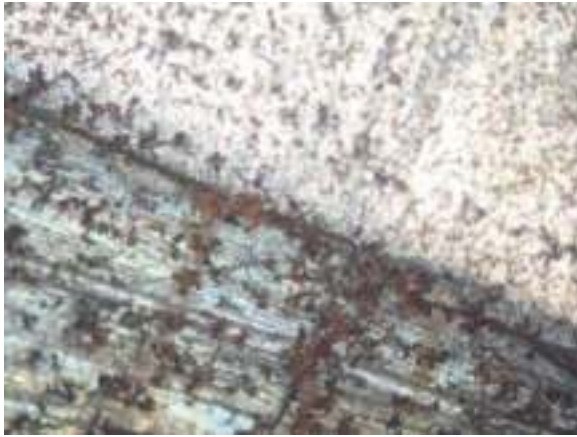
Рисунок 4.10. Розрізаний зразок

На плямах контакту при впливі магнітного поля збільшують активні центри, їх кількість та насичення з часом виходу дислокацій. Магнітне поле прискорить зростання цієї кількості активних центрів за рахунок виходу дислокацій на поверхню контакту, а збільшення площі фізичного контакту, призводить до зміцнення фрикційних зв'язків та зростання коефіцієнта тертя.

При вплив магнітного поля на зразок відбувається не тільки збільшення кількості дислокацій та їх перерозподіл, а також змінюється розташування та взаємодія точкових дефектів кристалічних ґрат. Інтенсифікація виходу дислокацій на сталеву поверхню торкання, що деформується, що призводить до зростання кількості активних центрів, сприяє формуванню фрикційних молекулярних зв'язків.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а)



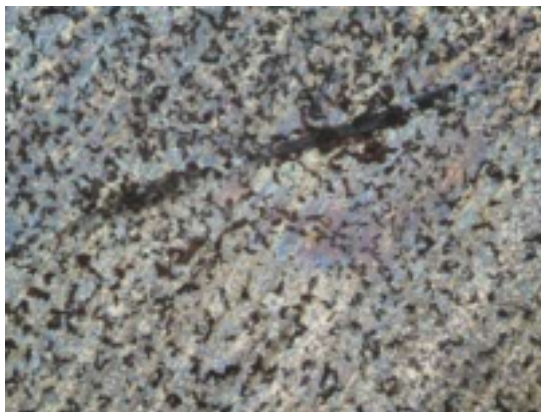
Контактна область з'єднання з натягом без магнітного поля (x100)

б)



Контактна область з'єднання з натягом без магнітного поля (x200)

в)



г)



Ділянка пресового з'єднання при дії магнітного поля (x200)

Рисунок 4.11. Шліфи контактної області з'єднання з натягом:

а, б - зона сполучення «стрижень - втулка» без впливу магнітного поля;

в, г – сполучення «стрижень – втулка» при дії магнітного поля

#### 4.2. Вплив магнітного поля на зношування рухомих сполучень

Слід розуміти, що зношування – це передусім результат взаємодії поверхонь, у якому протікає як мікрорізи взаємодіючих нерівностей, деформування і нагрівання, а й зміною механічних властивостей, структури, фазового складу та хімічної активності поверхневих шарів. У процесі тривалого на поверхнях тертя утворюються частинки зносу, які надають

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ушкоджує вплив на контактуючі поверхні. Знос стосовно шляху тертя та обсягу виконаної роботи, роботи тертя і т.д., є показником інтенсивності зношування.

Можливі процеси, що протікають у міжконтактній зоні тертя (формування оксидного шару та його руйнування, дроблення частинок зносу (диспергування), винесення частинок із зони та ін.) Суттєво впливають на інтенсивність зношування. Зношування та інтенсивність зношування визначають і за іншими непрямими ознаками (наявністю частинок в маслі, зміною розмірів елементів, що зношуються, зміною ваги і т.п.).

Зразки після обробки магнітним полем змінюють свої властивості в часі, і ця залежність не прямолінійна. Спочатку відбувається збільшення твердості, а після досягнення певної величини відбувається зменшення твердості. Підвищення зносостійкості намагнічених зразків при необхідних умовах експлуатації передбачає взаємодію збуджених молекул водню, що з'являються в зоні контакту поверхонь, що труться, при насиченні магнітним полем, що допомагає забезпечити швидке відведення молекул і атомарного водню із зони пар тертя. У умовах знижується ймовірність протікання водневого зношування. Результати випробувань на зношування пальця (схема "палець - диск") представлені в табл. 4.2. Інтенсивність зношування при впливі магнітного поля менша на 49,7%, ніж при випробуваннях без впливу магнітного поля. З метою візуального виявлення тенденції впливу магнітного поля на зону сполучення досліджуваних зразків було проведено їхнє фотографування на електронному мікроскопі з великим збільшенням. На рис. 4.12 представлені копії профілактограм вихідної шорсткості та після проходження електричного струму та впливу магнітного поля. На рис. 4.9 наведено фотографії поверхні тертя ковзного контакту, отримані після випробувань за схемою "палець - диск" після приробітку.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 . Зношування (ваговий) та інтенсивність зношування  $I_m$  як відношення вагового зносу до шляху тертя зразків.

	Вага	Знос ваговий	Час	Інтенсивність зношування
Без впливу магнітного поля	128,75 р. 127,95 р.	0,8 р.	60 хв.	$I_m = 2,65 \cdot 10^{-4}$ г/м
При дії магнітного поля	128,51 р. 128,06 р.	0,45 р.	60 хв	$I_m = 1,77 \cdot 10^{-4}$ г/м

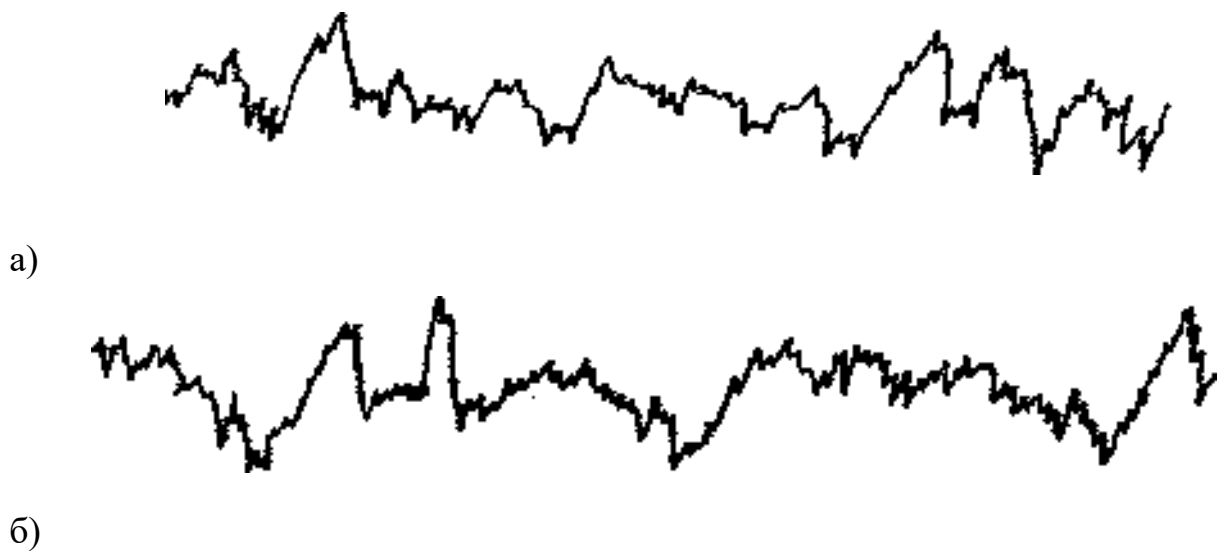


Рис. 4.12. Копії профілактограм: а – вихідна шорсткість сталевий поверхні  $R_a = 1,07$  мкм; б - після проходження електричного струму в магнітній котушці,  $I = 4$  А,  $R_a = 0,76$  мкм (ВУ 5000; ГУ 200)

При вплив магнітного поля радіуси закруглення вершин виступів збільшуються, що призводить до зменшення зносу. Параметр  $R_a$  не повною мірою відображає зміни, що виникли в зоні тертя при проходженні електричного струму в магнітній котушці та магнітного поля. Профілограми показують, вплив електричного струму та магнітного поля не завдало пошкодження (за умовами випробувань) у зоні тертя.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено методики оцінки впливу магнітного поля на величину коефіцієнта тертя.

2. Експериментально встановлено, що молекулярна складова коефіцієнта тертя при впливі магнітного поля не залежить від тиску.

3. Встановлено, що збільшення тиску на зразок і сили струму в магнітній котушці призводить до стабілізації і досягнення максимуму коефіцієнта тертя.

4. Встановлено вплив магнітного поля на величину сили зриву пресової посадки із гарантованим натягом.

5. Збільшення тиску та струму в магнітній котушці веде до стабілізації та досягнення максимуму коефіцієнта тертя. Можна обґрунтовано припустити, що зазначені параметри ведуть до підвищеної дисипації енергії під час тертя.

6. Вплив магнітного поля призводить до зростання коефіцієнта тертя і, як наслідок, підвищення температури на контакті.

7. Експериментально підтверджено, що продукти зносу у вигляді оксидних частинок чорного кольору під дією магнітного поля виносяться із зони тертя.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Акрістіній, К.В. Багатоканальні системи збирання даних. Крейтова система LTR. Керівництво програміста/К.В.Акрістіній; ЗАТ "Л-Кард". - 2002. - URL: [http://www.lcard.ru/download/ltr\\_sw.zip](http://www.lcard.ru/download/ltr_sw.zip) (Дата звернення: 15.01.2011).
2. Баранов, Ю.В. Механізми впливу електростатичного поля на пластичне деформування металевих матеріалів/Ю.В. Баранов, І.Л. Батаров, А.К. Рощупкін // Проблеми машинобудування та надійності машин. – 1993. – № 6. – С. 60-70.
3. Беклемішев, Н.К. Вплив імпульсного електромагнітного поля на характеристики конструкційної міцності металевих матеріалів / Н.К. Беклемішев, О.К. Васютін, Ю.Л. Доронін // Проблеми машинобудування та надійності машин. – 1990. – № 2. – С.73-77.
4. Володін, В.Л. Дослідження впливу імпульсних впливів на опір сталей зношування та малоциклової втоми / В.Л. Володін, В.В. Гайдук // Изв. вишів. Чорна металургія. – 2002. – № 8. – С. 23-27.
5. Воробйов, Д.В. Поліпшення фрикційних характеристик пари тертя колесо - рейка за рахунок впливу на контакт електричного струму та магнітного поля: автореф. дис. ... канд. техн. наук/Д.В. Воробйов. – Брянськ, 2005. – 19 с.
6. Воробйов, В.І. Вплив електричного струму та магнітного поля на коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою/ В.І. Воробйов, В.П. Тихомиров, К.А. Измеров, С.Г. Волохів // Фундаментальні та прикладні проблеми техніки та технології. – 2013. – № 6 (302). – С. 137-142.
7. Волохів, С.Г. Використання фізичних ефектів під час створення вузлів транспортних машин / С.Г. Волохів // Нові горизонти: матеріали V

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міжнар. наук.-практ. конф. – 2018. – С. 29-31.

8. Галей, К.Т. Підвищення стійкості різальних інструментів шляхом магнітної обробки/К.Т. Галей // Верстати та інструмент. - 1973. - №5. - С. 31.

9. Галей, К.Т. Експериментально-теоретичні роботи з вивчення деяких явищ при різанні та терті / К.Т. Галей // Електричні явища при терті та різанні металів. – К., 1985. – 424 с.

10. Гаркунов, Д.К. Триботехніка: монографія/Д.К. Гаркунов. - М: Машинобудування, 1985. - 424 с.

11. Гаркунов, Д.К. Про природу підвищення зносостійкості деталей та інструменту магнітною обробкою / Д.К. Гаркунов, Г.І. Суранов, Г.Б. Коптяєва // Тертя та знос. – 1982. – Т. 3. – № 2. – С. 327-330.

12. Головін, Ю.І. Вплив постійного магнітного поля на швидкість пластичного перебігу монокристалів NaCl: Са / Ю.І. Головін, Р.Б. Моргунов// Фізика твердого тіла. – 1995. – Т. 37. – Вип. 7. – С. 2118-2121.

13. Головін, Ю.І. Магнітопластичність твердих тіл/Ю.І. Головін// Фізика твердого тіла. – 2004. – Т. 46. – Вип. 5. – С. 769-803.

14. Голубенко, О.Л. Результати експериментальних досліджень дослідних зразків підгумованого колеса / О.Л. Голубенко, В.П. Ткаченка, В.П. Турчин. - Ворошиловград: Ворошиловгр. машинобудування. ін-т, 1988. – 201 с.

15. Горячова, І.Г. Механіка фрикційної взаємодії/І.Г. Горячів. - М: Наука, 2001.

16. Губачова, Л.А. Дослідження зношування деталей фрикційного гасника коливань візків пасажирських вагонів / Л.О. Губачова // Новини науки Придніпров'я: наук.-практ. журн. – РВА «Дніпро», 2005. – Вип. 5. - С. 31-35.

17. Дацько, О.І. Вплив імпульсів магнітного поля на непружні властивості азотовмісної сталі / О.І. Дацько, В.І. Алексеєнко, А.Л. Брусова//

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Журнал технічної фізики. – 1999. – Т. 69. – С. 122.

18. Дерягін, Б.В. Поверхневі сили/Б.В. Дерягін, Н.В. Чураєв, В.К. Муллер. - М: Наука, 1987. - 389 с.

19. Демкін, Н.Б. Розрахунок показників контакту при малих навантаженнях // Фрикційний контакт при мінімальних навантаженнях / Н.Б. Демкін. - Калінін: Калінін. політехн. ін-т, 1989. – С. 4-7.

20. Демкін, Н.Б. Якість поверхні та контакт деталей машин/Н.Б. Демкін, Е.В. Рижов. - М: Машинобудування, 1981. - С. 244.

21. Євдокимов, В.Д. Технологія зміцнення машинобудівних матеріалів: навч. посібник-справ. / В.Д. Євдокимов, Л.П. Клименко, О.К. Євдокимова; за ред. В.Д. Євдокимова. – Одеса – Миколаїв: Вид-во НДГУ іК. Петра Могили, 2005. – 352 с.

22. Зелінський, В.В. Вплив магнітного поля на зносостійкість сталі ХВГ/В.В. Зелінський, А.Г. Лагуткін // Тертя та знос. – 1988. – Т. 9. – С. 965-974.

23. Зелінський, В.В. Встановлення переважаючих видів та причин зношування різальних інструментів / В.В. Зелінський, Є.А. Борисова / / Машинобудування та безпека життєдіяльності. – 2012. – № 2 (12). – С. 55-60.

24. Ізмеров, К.А. Закон розподілу плям у завданнях механіки дискретного контакту / К.А. Ізмеров, В.П. Тихомиров, В.І. Воробйов, С.Г. Волохів // Фундаментальні та прикладні проблеми техніки та технології. – 2014. – № 6 (308). – С. 21-27.

25. Кондратов, В.К. Внутрішнє тертя Fe-Ni та Fe-Cr-Ni мартенситностаріючих сталей / В.К. Кондратов // Термічна обробка та фізика металів: тр. вузів РФ. - Свердловськ: Урал. політехн. ін-т, 1993. – Вип. 1. – С. 50-57.

26. Контрольно-вимірювальне обладнання ZETLAB: Тензометрія. - URL:<https://zetlab.com/>(Дата звернення: 20.03.2017).

27. Крагельський, І.В. Вузли тертя машин: довідник/І.В.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крагельський, Н.К. Міхін. - К.: Машинобудування, 1984. - 282 с.

28. Крагельський, І.В. Основи розрахунків на тертя та знос / І.В. Крагельський, К.К. Добринін, В.С. Комбалів. – К., 1977. – 526 с.

29. Кузнецов, П.С. Розробка та дослідження пристроїв з безконтактною магнітною взаємодією та мінімальним дестабілізуючим впливом на вакуумне середовище обладнання високих технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук/П.С. Ковалів. – К., 2012. – 26 с.

30. Лисиков, О.К. Теплові та електричні контактні явища в трибосистемі «колесо – рейка» / О.К. Лисиков, С.В. Воронін // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2012. – Вип. 129 – С. 155-162.

31. Лужнов, Ю.К. Вплив магнітного поля на механізм взаємодії коліс та рейок / Ю.К. Лужнов, А.П. Прунцев // Праці МПТ. – 1975. – Вип. 480.

32. Лужнов, Ю.К. Зчеплення коліс з рейками: природа та закономірності / Ю.К. Лужнів. – К.: Інтекст, 2003. – 144 с.

33. Основи трибології (тертя, знос, мастило): навч. для техн. вузів/А.В. Чичінадзе, Е.Д. Браун, Н.А. Буше [та ін]. - 2-ге вид., перераб. та дод. – К.: Машинобудування, 2001. – 664 с.

34. Пінчук, Л.С. Про деякі можливості поляризації пар тертя/Л.С. Пінчук, О.С. Неверов, В.А. Гольдаде // Тертя та знос. – 1980. – Т. 1. – № 6. – С. 1089-1092.

35. Протасов, А.В. Магнітна подача абразивного матеріалу в зону контакту колесо - рейка: автореф. ... канд. техн. наук/А.В. Протасов. – Ворошиловград, 1984. – 21 с.

36. Рижкін, А.А. Про вплив температурного поля на трибологічні характеристики пари тертя/А.А. Рижкін // Вісник ДДТУ. – 2005. – Т. 5. – № 3 (25). – С. 460-471.

37. Садовський, В.Д. Вплив магнітного поля на мартенситне перетворення сталі/В.Д. Садовський // Металознавство. - К.: Наука, 1971. -

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

С. 47-53.

38. Збірник матеріалів за підсумками НДР механічного факультету Ташкентського інституту/К.Г. Балабеков, К.І. Черноглазов, АМ Усманов, С.В. Белікевич. – Ташкент, 1982. – Вип. 83. – С. 4-6.

39. Свирид, К.К. Відновлення трибосистеми у рідинах з високим електроопіром під дією електромагнітного поля / К.К. Свирид // Проблеми техніки: наук.-вироб. журн. – Нац. мор. ун-т, 2010. – № 2. – С. 19-29.

40. Тихомиров В.П. Контактна взаємодія фрактальних поверхонь/ В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, К.А. Ізмеров, П.В. Тихомиров // Тертя та змащення в машинах та механізмах. – 2011. – №4. – С. 12-23.

41. Тихомиров, В.П. Контактна взаємодія фрактальних поверхонь/В.П. Тихомиров // Тертя та знос. – 1997. – Т. 18. – № 3. – С. 369 – 374.

42. Тяпуніна, Н.А. Вплив магнітного поля на непружні властивості кристалів LiF/Н.А. Тяпуніна, В.Л. Красніков, Е.П. Білозеров// Фізика твердого тіла. – 1999. – Т. 41. – Вип. 6. – С. 1035-1040.

43. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology Letters. – 1998. – V. 4. – P. 1-35.

44. Chang, YP Effects of friction on tribo-magnetization mechanisms for self- mated iron pairs under dry friction condition / YP Chang, LM Chu, HM Chou, YC Hwang //Proc. IMechE. – 2009. – Vol. 223. - P. 1-12.

45. Chang, W. An elastic-plastic model для зв'язку з великими surfaces / W. Chang, I. Etsion, D. Bogy // Journal of Tribology. – 1987. – V. 109. – P. 257-263.

46. Chin, KJ Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC 48 steel/XC 48 steel / KJ Chin, H. Zaidi, MT Nguyen, PO Renault // Wear. – 2001. – P. 470-476.

47. Chikazumi, S. Physics of magnetism / S. Chikazumi. – John Wiley &

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Sons Inc., 1964. – P. 433-434.

48. El Mansori, M. Surface modifications of non-ferromagnetic copper/ferromagnetic steel XC48 couple in magnetized sliding contact / M. El Mansori,

H. Zaidi, KE Kardiri, D. Paulmier // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 86-67. – P. 511-515.

49. Evans, LC Partial Differential Equations / LC Evans // American Mathematical Societi. – Providence, 1998. – ISBN 0-8218-0772-2.

50. Greenwood, JA Contact of nominally flat surfaces / JA Greenwood, JBP Williamson// Proc. Royal Soc. London. Ser. A. – 1966. – V. 293. – P. 300-319.

51. Hardy, WB Collected Scientific Papers / WB Hardy. – Cambridge, 1936.

52. Herbert, E. Iron та Steel Institute / E. Herbert. – 1929. – № 2. – 239 p.

53. Herbert, E. Metallurgio/E. Herbert. – 1931. – № 3. – 219 p.

54. Hiratsuka, K. Magnetic effect on wear of metals / K. Hiratsuka, T. Sasada, S. Norose // Wear. – 1986. – Vol. 110. – P. 251-261.

55. Iida, Y. Surface damage resulting from rolling contact operating in magnetic field / Y. Iida, TA Stolarski, K. Sato // PhD. Thesis. - University of Brunel, 2007. – P. 109-110, 120-122.

56. Jaeger, JC Mooving Sources heat and temperature of sliding contacts / JC Jaeger // Journal and Proceedings of Royal Society of New South Wales. – 1942. – № 76. – P. 203-224.

57. Kanji, M. Proceedings of the 3rd AIMTDR conference / M. Kanji, K. Pal. - Bombay, 1969.

58. Конторова, ТА Ж. Эксп. Теор. Fiz. – 8,1340/ТА Kontorova, Ya.I. Frenkel. – 1938.

59. Kumagai, K. Study on Reduction in Wear due to Magnetisation / K. Kumagai, L. Suzuki, O. Kamiya // Wear. – 1993. – Vol. 162-164. – P. 196-201.

60. Наяк, П. Прімененіє моделі sluchaynogo polya для issledovaniya

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

sherokhovatyhh poverkhnostey / P. Nayak // Проблеми treniya i smazki. – 1971. – № 3. – P. 85-95.

61. Muju, MK Wear of non-Magnetic materials in Presence of Magnetic Field / MK Muju, A. Radhakrishna // Wear. – 1980. – Vol. 58. – P. 49-58.

62. Muju, MK A model adhesive wear in presence of magnetic field / MK Muju, A. Ghosh // Wear. – 1977. – Vol. 41. – P. 103-116.

63. Polyanin, AD Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists / AD Polyanin. - Boca Raton: Chapman & Hall CRC Press, 2002. - ISBN 1-58488-299-9.

64. Rowe, KG У положенні thermal measurements of sliding contacts / Kyle G. Rowe, Олександр I. Bennett, Brandon A. Krick, W. Gregory Sawyer // Tribology International. – 2013. – № 62. – P. 208-214.

65. Shimotomai, M. Influence Magnetic Field Gradients на Pearlitic Transfomation в Steels / M. Shimotomai // Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44. - № 12. – P. 2524-2528.

66. Stratton, JA Electromagnetic Theory / JA Stratton. - New York: McGraw-Hill, 1941. - P.167.

67. Тихомиров, ВП Двумерна модель 'неординарної поверхності твердих тел / VP Tikhomirov, OA Gorlenko // Treniye i iznos. – 1986. – Т. 7. – № 3. – P. 527-531.

68. Woog, P. Contribution a l'etude de graissage. Onctuosite. Впливи молекулярних речовин / P. Woog. – Paris, 1926.

69. Yamamoto, Y. Effect of magnetic field on boundary lubrication / Y. Yamamoto, S. Gondo // Tribology International. – 1987. – Vol. 20. – P. 342-346.

70. Yetim, AF Результат magnetic field on wear properties of ferromagnetic steel / AF Yetim, H. Covaci, M. Aslan [et al.] // Wear. – 2013. – V. 301. – P. 636-640.

					ДРБМТВА 23.20106.000. ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		