

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Андрій ЗАГОРУЛЬКО
(підпис)

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 131 Прикладна механіка, освітньо-професійної програми «Комп'ютерна механіка», на тему: Розрахункові дослідження механізму зношування сальникового ущільнення за моделлю Арчарда.

Здобувача групи КМ.м-31 РОСЛЯКОВА Михайла Юрійовича.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Михайло РОСЛЯКОВ
(підпис)

Керівник: доцент, к.т.н., доцент Андрій ЗАГОРУЛЬКО _____
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра: 59 с., 23 рис., 30 джер.

Предмет дослідження – сальникове ущільнення на валу відцентрового насоса.

Об'єкт дослідження – гідродинамічний та зносо-контактний процеси в сальниковому ущільненні.

Мета роботи – визначення рівня зносу вала для різних типів сальникової набивки.

Сальникові ущільнення займають важливе місце в машинобудуванні, забезпечуючи надійну герметизацію між рухомими частинами механізмів. Оптимальний вибір сальникової набивки має вирішальне значення для ефективності та тривалості роботи таких ущільнень. У цій магістрській роботі досліджується проблема вибору найбільш ефективного типу сальникової набивки для сальникового ущільнення на валу.

У цій роботі була змодельована конструкція сальникового ущільнення на валу. Задача, пов'язана з контактом між сальниковою набивкою та валом. У нашій роботі був розглянутий випадок, коли відбувається знос вала. Задача була розв'язана з використанням програмного забезпечення ANSYS. Основними цілями було визначення деформації, напруження та контактного тиску на валу.

На основі отриманих результатів було встановлено, що вибір найбільш ефективного типу сальникової набивки для сальникового ущільнення на валу має вирішальне значення для його функціонування та тривалості. Результати аналізу, проведеного з використанням програмного забезпечення ANSYS, демонструють, що певні типи сальникової набивки можуть забезпечити кращу герметичність та знизити знос вала. Ці результати можуть бути використані в машинобудуванні для покращення якості та надійності ущільнень зі сальниковими ущільненнями.

З урахуванням отриманих результатів дослідження рекомендується звернути увагу на тип сальникової набивки, що показав найкращі результати у

вимірюванню контексті. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення впливу інших параметрів, таких як тиск, температура та швидкість обертання, на ефективність сальникового ущільнення. Додатково, можна розглянути можливість використання нових матеріалів для сальникової набивки з метою поліпшення його характеристик.

Надійні результати дослідження, отримані в цій магістрській роботі, сприятимуть подальшій розробці та вдосконаленню сальникових ущільнень, що є важливим напрямком у сучасному машинобудуванні.

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ, САЛЬНИКОВЕ УЩІЛЬНЕННЯ, ANSYS.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
1.1. Знос поверхні валу	9
1.1.1. Причини та наслідки.....	9
1.1.2. Методи вимірювання та аналізу	10
1.2. Сальникова набивка	10
1.2.1. Конструкція та принцип роботи	11
1.2.2. Защільнювальні матеріали	12
1.2.3. Азбестовмісні набивки	13
1.2.4. Безазбестовмісні набивки.....	14
1.2.5. Умовні позначення сальникових набивок	15
1.3. Експериментальне дослідження процесу зносу.....	16
1.3.1. Методи вимірювання зношування поверхонь тертя	16
1.3.2. Визначення зношування за вмістом продуктів зношування в змащувальному матеріалі.....	18
1.3.3. Метод мікрометричних вимірювань	19
1.3.4. Метод штучних баз	19
1.3.5. Метод поверхневої активації	22
1.4. Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування	22
1.5. Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя.....	23
1.5.1. Вимірювання сили тертя	23
1.5.2. Вимірювання температури.....	25
1.6. Висновок	29
2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОСУ	30
2.1. Комп'ютерне моделювання	30
2.2. Зношення поверхні втулки із врахуванням задачі гідропружності сальникової набивки	35
2.3. Результати валідації моделі зношення.....	37

2.4. Результати розв'язання зносоконтактної задачі з урахуванням гідропружної поведінки сальникової набивки	39
2.4.1. Інтенсивність зношення	39
2.4.2 Розподіл контактного тиску	40
2.5. Висновок	43
ВИСНОВКИ.....	45
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	47

ВСТУП

Зношення поверхні валу є поширеною проблемою в різних галузях промисловості, таких як нафтогазова, виробництво електроенергії та виробництво. Знос валу може призвести до збільшення витрат на технічне обслуговування, зниження ефективності обладнання та навіть до збоїв системи. Однією з основних причин зносу вала є тертя вала об сальникову набивку, який є механічним ущільненням, що використовується для запобігання витoku рідини в насосах та іншому обладнанні. Таким чином, важливо розвинути краще розуміння зносу поверхні вала з сальниковою набивкою, щоб запобігти дорогим поломкам обладнання.

Сучасні методи прогнозування зносу поверхні валу часто є неточними та трудомісткими, що вимагає дорогих фізичних випробувань обладнання. Комп'ютерна модель зносу поверхні вала з сальниковою набивкою може забезпечити економічно ефективне вирішення цієї проблеми. Однак створення точної комп'ютерної моделі вимагає глибокого розуміння складних взаємодій між валом і сальниковою набивкою.

Метою цього дослідження є розробка комп'ютерної моделі зносу поверхні вала з сальниковою набивкою, яка може точно передбачити ступінь і місце зносу. Для досягнення поставленої мети в рамках цього дослідження буде поставлено наступні завдання:

- Проведено огляд літератури, щоб визначити існуючі моделі та дослідити знос поверхні валу та сальникової набивки.
- Зібрано дані про фізичні властивості та умови експлуатації обладнання.
- Розроблено числову модель валу і сальникової набивки з використанням відповідного програмного забезпечення.
- Перевірено модель за допомогою експериментальних даних.
- Проаналізовано результати та зроблено висновки щодо точності та практичності моделі.

Загалом, це дослідження сприятиме розумінню зносу поверхні валу з сальниковою коробкою та стане цінним інструментом для прогнозування та запобігання несправностей обладнання.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Знос поверхні валу

1.1.1 Причини та наслідки.

Знос поверхні валу спричинений тертям і ковзанням валу по сальниковій набивці, що призводить до втрати матеріалу поверхні. Основними факторами, які сприяють зношенню поверхні вала, є зміщення, вібрація, високий тиск і висока температура. Наслідки зносу поверхні валу включають зниження ефективності обладнання, збільшення витрат на технічне обслуговування та навіть збої системи.

Сальники не відрізняються високою ціною, проте їх знос може стати причиною поломки дорогих вузлів і підшипників. Тому ці деталі, постійно піддаються впливу агресивного середовища, підвищеної температури і тертя, необхідно регулярно міняти. Сальники виходять з ладу з наступних причин:

- Розплавлення. Під впливом високої робочої температури і природного старіння матеріалу матеріал повністю або частково втрачає еластичність, його притиснення погіршується.
- Механічний знос. Тертя об рухомі деталі руйнує структуру робочих поверхонь, в результаті чого вони змінюють форму. Процес прискорюється при недостатній мірі мастила сполучення.
- Поява подряпин і рубців. Забруднене масло, пошкодження робочої поверхні валу або помилки при монтажі призводять до передчасного зносу сальникового ущільнення.
- Розрив набивки. При надлишковому тиску набивка розривається або на ній з'являються V-подібні тріщини.
- Пошкодження пружинного кільця. У результаті механічного впливу корозії металева пружина розривається або злітає з сальника. В результаті погіршується притиск набивки і деталь перестає виконувати свої функції.

Сальникові ущільнення не підлягають ремонту. При виході деталей з ладу їх необхідно замінити новими. На наближення моменту заміни вказують наступні ознаки:

- Сторонні звуки при роботі механізмів. Це говорить про твердінні або забрудненні набивання сальника.

- Поява протікання в місцях сполучення функціональних деталей. Це можуть бути патьоки масла на стінках двигуна, витік антифризу з помпи охолодження. Зволікання з заміною сальників призводить до витоку мастила або охолоджуючої рідини. Через пошкоджений сальник в підшипники агрегатів може потрапити бруд і пісок, що призведе до серйозних поломок, які потребують недешевого ремонту.

1.1.2 Методи вимірювання та аналізу.

Було розроблено різні методи для вимірювання та аналізу зносу поверхні валу, включаючи фізичні методи вимірювання, такі як профілометрія та мікроскопія, а також непрямі методи, такі як аналіз вібрації та тепловізор. Однак ці методи можуть бути трудомісткими, дорогими та не дати точних результатів. Тому існує потреба в розробці більш ефективних і точних методів вимірювання та аналізу зносу поверхні валу.

1.2 Сальникова набивка

Сальникова набивка — це механічне ущільнення, яке використовується для запобігання витоку рідини в насосах, компресорах та іншому обладнанні. Вона складається з камери, в якій розміщено набивний матеріал або ущільнювальне кільце, яке стискається до вала для створення ущільнення. Сальникова набивка також служить для відведення тепла і змащення вала.

Сальникове ущільнення є найпоширенішим типом сальникової набивки, що складається з плетеного або тканого набивного матеріалу, такого як графіт, PTFE або арамідні волокна. [7]

У механічних ущільненнях для ущільнення використовується комбінація обертових і нерухомих частин, тоді як у манжетних ущільненнях для ущільнення використовується гумовий або пластиковий виступ. Вибір типу сальникової набивки залежить від конкретного застосування та умов експлуатації.

Сальникове ущільнення — зацілювач рухомих з'єднань деталей з метою герметизації щілин між рухомими і нерухомими деталями; забезпечується податливими елементами, що одягають на вал (шток), або набивками, що закладаються у виточки чи заглибини кришок, корпусів та інших деталей.

Найчастіше сальникові ущільнення використовуються у трубопровідній арматурі, а також в окремих механізмах промислової, транспортної та побутової техніки. [8]

Крім рухомих вузлів, сальникові набивки можуть використовуватись для зацілювання нерухомого обладнання, наприклад в трубних і кабельних проводках.

1.2.1 Конструкція та принцип роботи.

Принцип побудови сальникового ущільнення полягає у тому, що на зовнішній стороні кришки чи корпуса в місці, де через них проходить шток або вал, створюється сальникова камера (сальникова коробка англ. Stuffing box), в яку вкладається ущільнювач — сальникова набивка. Сальниковий ущільнювач складається з корпуса, упорного кільця (грундбукса), натискної втулки, сальникового кільця (набивки) і стяжних шпильок або накидної гайки. [9]

Ущільнювання досягається притисканням сальникової набивки до рухомого вала (штоку). Між валом та грундбуксою забезпечується зазор 0,5–0,75 мм, а між валом і натискною втулкою – зазор 1–1,5 мм. Ці зазори запобігають

можливості зношування вала у відповідних місцях. Грундбукса і натискна втулка зазвичай виготовляються з чавуну.

В деяких конструкціях сальниковий пристрій одночасно є опорою для вала (підшипником ковзання). Тоді зазор між валом і натискною втулкою робиться мінімальним. Натискна втулка оснащується пристроєм для подавання та розподілу мастила і виготовляється з бронзи або оснащується бронзовою вставкою. При відсутності зазору між валом і грундбуксою остання також виготовляється з бронзи.

Кожна марка сальникових набивок розрахована на вплив визначених тисків, температур і швидкостей ковзання, граничні значення яких регламентовані ДСТУ EN ISO 9222-1:2018 для конкретних умов експлуатації. [16]

Залежно від марки сальникової набивки в якості робочих середовищ можуть виступати повітря, азот, інертні гази, водяна пара, важкі і легкі нафтові продукти, вода питна та технічна, органічні продукти, рідкий і газоподібний аміак, лужні середовища, морська вода, вуглеаммонієві солі, різні види кислот.

ДСТУ EN ISO 9222-1:2018 поширюється на волокнисті та комбіновані сальникові набивки. Сальникові набивки виготовляються круглого, квадратного і прямокутного перетинів. А в залежності від особливостей технологічного процесу і способу виготовлення діляться на кручені, плетені і скатані сальникові набивки. Граничні відхилення розмірів перетину кручених, плетених і згорнутих набивок сальникових повинні знаходитися в межах вимог ДСТУ EN ISO 9222-1:2018.

1.2.2 Защільнювальні матеріали.

Набивки традиційно використовують повстяні матеріали, конопляне ключчя, азбестові матеріали. У сучасній техніці використовують набивки на основі фторопласту а також, тефлонового (PTFE), арамідного і вуглецевого

волокна, виконані методом діагонального (діаплекс, мультифлекс) плетіння, з насиченням емульсіями РТФЕ та дрібнодисперсного графіту. [7]

Допустимі температури експлуатації:

- при використанні традиційних матеріалів до 80 °С;
- при використанні полімерних матеріалів не вище 250 °С;
- при використанні азбестових та вуглецевих матеріалів до 400 °С.

Перелічені вище набивки можуть експлуатуватися при тисках 0,6...4 МПа в залежності від температури та матеріалу для просочування. Просочування служить для покращення герметизації і зменшення коефіцієнта тертя у парі набивка—вал. Для просочування набивок використовують сало, парафін, бітум, графіт, рідке скло, солідол, віскозин та ін. За своєю структурою набивки можуть бути одно- і багат шарового, наскрізного плетіння сердечника.

1.2.3 Азбестовмісні набивки.

Ці набивки в позначенні марки мають символ «А». Розрізняють такі марки азбестових сальникових набивок:

- АС – набивка сальникова плетена суха.
- АСС – набивка сальникова плетена, з сердечником з склоровінгу, суха.
- АПК-31 – набивка сальникова кручена, просочена жиром антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.

- АП-31 – набивка сальникова плетена, просочена жиром антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.

- АСП – набивка сальникова плетена з сердечником з склоровінгу, просочена жиром антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.

- АСП-31 – набивка сальникова плетена з сердечником з склоровінгу, просочена жиром антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.

- АПР – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, просочена жировим антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- АПР-31 – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, просочена жировим антифрикційним складом (на основі нафтових екстрактів) та дрібнодисперсним графітом.
- АПРПС – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, прогумована, суха, з дрібнодисперсним графітом.
- АПРПП – набивка сальникова плетена, з латунним дротом, прогумована, просочена антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- АФТ – набивка сальникова плетена, просочена суспензією фторопластуз тальком.
- АГ, АГС та АГІ – набивка сальникова плетена, графітована, суха (С), додатково інгібування (І).
- АФВ – набивка сальникова плетена, просочена жирової змазкою з суспензією фторопласта і графіту.
- АФ-1 – набивка сальникова плетена, просочена суспензією фторопласту.
- ПАФС – набивка сальникова плетена, поліпропіленова з азбестовим сердечником, просочена суспензією фторопластузі слюдою.
- АР – набивка сальникова скатана, прогумована.
- АРС – набивка сальникова скатана, прогумована, з гумовим сердечником.

1.2.4 Безазбестові набивки.

Безазбестові марки сальникових набивок:

- ВАТІ – набивка сальникова плетена з фторопластових графітонаповнених волокон (PTFE) з кутовим обплетенням з арамідного волокна, просоченого фторопластовою суспензією.

- ФФ – набивка сальникова плетена, фторлонова, просочена суспензією фторопласту.
- УС – набивка сальникова плетена з вуглецевих ниток, суха.
- ХХН – набивка сальникова плетена, бавовняна, просочена жировим антифрикційним складом дрібнодисперсним графітом.
- ЛП – набивка сальникова плетена з луб'яних волокон, просочена жировим антифрикційним складом та дрібнодисперсним графітом.
- ППФ – набивка сальникова плетена, фторопластова з сердечником з луб'яних волокон, просочена жировим антифрикційним складом.
- ХБП – набивка сальникова бавовняна плетена.
- ХБР – набивка сальникова скатана бавовняна прогумована.
- ХБС – набивка сальникова бавовняна суха.
- ХБРС – набивка сальникова скачана бавовняна прогумована з гумовим сердечником.

1.2.5 Умовні позначення сальникових набивок.

Умовне позначення сальникової набивки містить марку набивки, розміри її поперечного перерізу і вказівку ДСТУ EN ISO 9222-1:2018. Приклад умовного позначення набивки сальникової крученої марки АПК-31 діаметром 3 мм: Набивка кручена марки АПК-31 з ДСТУ EN ISO 9222-1:2018. Те ж, для набивки сальникової багатошарової плетеної марки АП-31 квадратного перетину розміром 18 мм: Набивка багатошарового плетіння марки АП-31 18x18 ДСТУ EN ISO 9222-1:2018.

Поставка сальникових набивок здійснюється в бухтах. Набивки однієї марки і одного типорозміру намотуються в бухти або бобіни по 5–30 кг в залежності від розміру перетину набивки і щільно перев'язуються, зазвичай запаковується в поліетиленовий мішок. Кожна бухта або бобіна має ярлик, що містить наступну інформацію:

- товарний знак або товарний знак і найменування підприємства-виробника;
 - найменування і марку продукції;
 - спосіб виготовлення (структуру);
 - розміри набивок сальникових;
 - масу бухти чи бобіни;
 - номер партії;
 - дату виготовлення;
 - штамп служби технічного контролю;
 - для набивок сальникових тропічного виконання маркування містить додатковий символ «Т» (наприклад, АП-31-Т 18x18 ДСТУ EN ISO 9222-1:2018);
- позначення Державного Стандарту– ДСТУ EN ISO 9222-1:2018.

1.3 Експериментальне дослідження процесу зносу

1.3.1 Методи вимірювання зношування поверхонь тертя.

У сучасному машинобудуванні існує ряд різноманітних методів вимірювання зношування, які можна класифікувати за їх складністю та точністю вимірювань. Найпростіші методи передбачають вимірювання розмірів зношеної деталі традиційними засобами, тоді як більш складні методи базуються на використанні ядерно-фізичних процесів.

Область застосування конкретного методу вимірювання зношування залежить від поставленої мети досліджень, необхідної точності вимірювань, можливості вимірювання навіть незначного зношення, часу, необхідного для проведення вимірювань зношування, можливості вимірювання зношування в умовах експлуатації без розбирання деталі, та, в ряді випадків, без зупинки машини. Крім того, враховуються затрати часу та матеріальних ресурсів, необхідних для проведення повного циклу підготовки до вимірювань зношування.

Для вимірювання зношування в машинобудуванні можна застосовувати як інтегральні, так і диференційні методи оцінювання.

У ряді випадків використовують також методи оцінювання зношування за вихідними параметрами виробу чи спряження.

Інтегральні методи вимірювання зношення можна поділити на дві категорії: А - методи вимірювання, що базуються на оцінюванні сумарного зносу; та Б - методи вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зношування у змащувальному середовищі. До різновидностей методу А відносять вимірювання зношення за зміною маси або об'єму зразка, а також за заміром зазору в спряженні. До різновидів методів вимірювання, що базуються на аналізі продуктів зношування в змащувальному середовищі, відносять спектральний аналіз та дослідження за допомогою радіоактивних ізотопів.

Диференційні методи дозволяють визначати розподіл зношування по всій поверхні тертя та оцінювати вплив нерівномірності зношування на вихідні параметри виробу. Диференційні методи можна поділити на методи вимірювання, що базуються на мікрометрії, метод штучних баз та метод поверхневої активації. До методу вимірювання, що базується на мікрометрії, відносять вимірювання розмірів та профілографування У машинобудуванні існує кілька різновидів методів штучних баз, серед яких можна виділити наступні: метод відбитка, метод лунок та метод зліпка. До різновидів методу поверхневої активації можна віднести метод активації частини ділянки та застосування вставок.

Методи вимірювання вихідних параметрів спряження можна поділити за вимірюванням коефіцієнта тертя, витрат мастила та температури. Вимірювання величини зношування за зменшенням ваги чи об'єму деталі, як правило, використовують для дослідження зразків, оскільки цей метод малоприматний для більшості деталей машин. Оцінювання зношування за зміною вихідних параметрів спряження може дати лише побічну уяву про величину зношування.

Для вимірювання зношування поверхонь тертя при роботі різних спряжень в умовах їх експлуатації або випробувань застосовуються основні методи, які розглянемо надалі.

1.3.2 Визначення зношування за вмістом продуктів зношування в змащувальному матеріалі.

Цей метод визначення вмісту заліза, його окислів та інших домішок у змащувальному матеріалі, відомий також як метод визначення металевих домішок, базується на взятті проби з відпрацьованого мастила, де накопичились продукти зношування, що складаються з металевих частинок, оксидів металів та продуктів хімічної взаємодії металів з активними компонентами мастила.

Цей метод має перевагу у тому, що дозволяє уникнути розбирання агрегатів та вузлів. Його застосовують як у лабораторних умовах, так і при експлуатації для вимірювання інтегрального зношування. Точність методу характеризується чутливістю приладів до вмісту металевих домішок у мастилі, який складає 10^{-6} - 10^{-8} г/см³ мастила. Проте, лінійне зношування цим методом є важко оцінити.

При відборі проби необхідно забезпечити її репрезентативність та відповідність середньому вмісту продуктів зношування в мастилі. Наприклад, при взятті проби з картера двигуна, масло зливають та ретельно перемішують, щоб забезпечити однорідність проби.

Для аналізу складу проб мастила, в тому числі його вмісту заліза та інших складових, застосовуються різні методи. Хімічний аналіз базується на визначенні кількості заліза та інших продуктів зношування в попелі, отриманому в результаті спалення мастильної проби. Спектральний метод використовується для визначення вмісту механічних домішок в мастилі, використовуючи спектральний склад полум'я, яке утворюється при спалюванні мастильної проби. Однак, цей метод є досить складним, довготривалим та дорогим.

Радіометричний метод заснований на вимірюванні радіоактивності продуктів зношення, що містяться в мастилі. Продукти зношення накопичуються на фільтрі в результаті зношування радіоактивних деталей, які можуть містити радіоактивні ізотопи введені в розплавлений матеріал або нанесені на поверхню деталей у вигляді радіоактивного покриття. Активаційний аналіз має спільні риси зі спектральним та радіометричним методами. Вміст продуктів зношення в мастилі визначається за їх радіоактивністю, яку вимірюють після опромінення мастильної проби нейтронами та аналізу спектрів гамма-випромінювання. Використання методу активаційного аналізу не пов'язане з радіаційною небезпекою.

1.3.3 Метод мікрометричних вимірювань.

Метод мікрометричних вимірювань заснований на вимірюванні деталі до та після зношування з використанням мікрометра, індикатора та інших приладів, точність яких не перевищує 1-10 мкм. У більшості випадків для вимірювання зношування можна використовувати ті ж універсальні та спеціальні засоби, які застосовуються для контролю точності даної поверхні під час її виготовлення. Недоліком цього методу є те, що ним неможливо вимірювати зношування в процесі експлуатації машини.

1.3.4 Метод штучних баз.

У машинобудуванні метод штучних баз є поширеним методом вимірювання зношування на поверхнях деталей. Застосування цього методу передбачає нанесення на поверхню деталі спеціальних заглиблень, які можуть мати форму конуса, піраміди тощо. Відбитки цих заглиблень зменшуються з кожним циклом роботи, що свідчить про зношування поверхні деталі. Із зменшенням розмірів цих заглиблень можна зробити висновок про величину зношення. Цей метод є ефективним для вимірювання зношування на поверхнях

деталей, але вимагає певної підготовки деталі до нанесення заглиблень.

Застосовують різні варіанти цього методу. Метод відбитків (рисунок 1.1), який застосовується для визначення мікротвердості матеріалів.

Для утворення заглиблення використовується алмазна чотиригранна піраміда з квадратною основою та кутом 136° при вершині між протилежними гранями, що використовується у приладах ПМТ-3 та Віккерс.

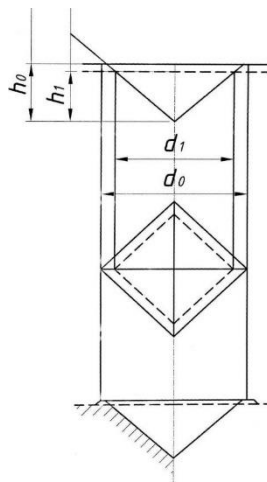


Рисунок 1.1 – Метод відбитків

Під час здійснення вимірювань піраміду тиску під навантаженням наводять на поверхню досліджуваного матеріалу, після чого замірюють діагональ відбитка. Зношування матеріалу визначається за різницею відстаней між діагоналями відбитка до та після зношування матеріалу.

Необхідно зазначити, що метод відбитків має ряд недоліків, серед яких можна виділити спучування матеріалу під час втискування піраміди, що може спотворювати форму відбитка, а також деяке відновлення заглиблення після зняття навантаження. Для усунення спотворень відбитка необхідно провести полірування, однак пружного відновлення відбитка уникнути не можливо.

Широкого застосування набув метод, який запропонували проф. М.М. Хрущов і Е.С. Беркович, його називають методом вирізаних лунок (рисунок 1.2).

Цей метод полягає в тому, що на досліджуваній поверхні різцем, який обертається, виготовляють лунку (рисунок 1.2). За зменшенням її розмірів при

зношуванні роблять висновок про величину місцевого зношування. Метод лунок має ряд переваг порівняно з методом відбитків. За цим методом тискування індентора замінене на виготовлення лунки різанням, унаслідок чого явища спучування металу і пружного відновлення зведені до мінімуму. При ускладненні вимірювання зношування безпосередньо на деталі застосовують метод негативних відбитків (рисунок. 1.3).

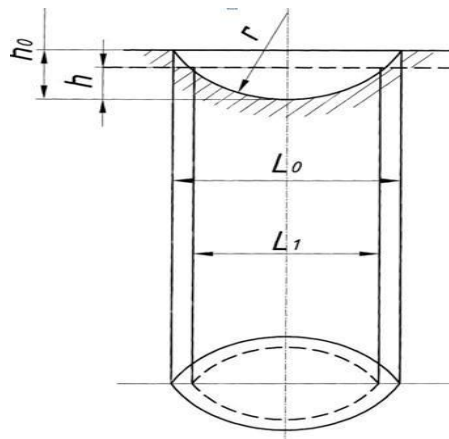


Рисунок 1.2 – Метод вирізаних лунок

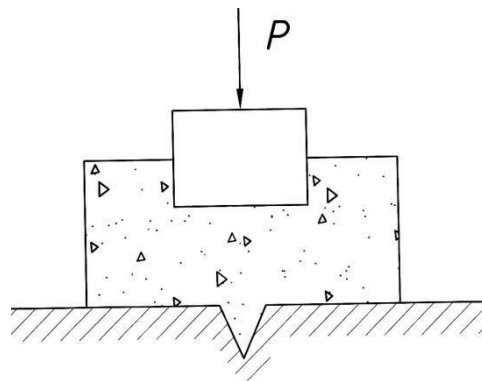


Рисунок 1.3 – Метод негативних відбитків

На поверхню наносять заглиблення (відбиток чи спеціальну риску). Потім з неї знімають зліпок за допомогою самотвердіючої маси або пластмаси. Висоту відбитка заміряють звичайними методами і порівнюють з розмірами, отриманими після зношення.

1.3.5 Метод поверхневої активації.

Метод базується на вимірюваннях зношування на зниженні радіоактивності деталі. Для цього на заданій ділянці деталі створюється радіоактивний об'єм глибиною 0,05-0,4 мм шляхом опромінення зарядженими частинками, такими як дейтрони, протони та інші частинки.

Визначення величини зношення здійснюється за допомогою градуювального графіка, шляхом порівняння зниження радіоактивності деталі зі зниженням радіоактивності зразка.

Метод поверхневої активації призначений для контролю зношування деталей у стендових та експлуатаційних випробуваннях без розбирання та зупинки машини.

1.4 Класифікація лабораторних машин для випробування матеріалів на зношування

У першій половині ХХ століття А.К.Зайцев розробив та запропонував загальну та раціональну класифікацію лабораторних машин для вимірювання матеріалів на зношування. Згідно з цією класифікацією, всі лабораторні машини для вимірювання матеріалів на зношування поділяються на шість категорій.

Машини першої категорії відрізняються найбільшою точністю вимірювання та можливістю реєструвати параметри, що дозволяють слідкувати за процесом зношування та величинами параметрів процесу. Обов'язковими параметрами в цих машинах є сила тертя, температура поверхонь тертя, частота обертання та робота тертя. Величину зносу визначають за допомогою точного вимірювання або зважування до і після кожного дослідження.

Машини другої категорії є простішими, але більш досконаліми лабораторними машинами для випробування матеріалів на зношування при певному виді зношування. Умови досліджень вибирають враховуючи умови роботи матеріалів у конкретних вузлах тертя.

Машини третьої категорії призначені для швидкого та простого контролю заводської продукції.

Машини четвертої категорії є спеціалізованими машинами, які імітують умови роботи матеріалів у машинах.

Машини п'ятої категорії призначені для випробування готових деталей на зношування.

Машини шостої категорії є стендами для випробувань якості роботи та зношування готових машин.

1.5 Методи вимірювання зовнішніх параметрів тертя

В установках, призначених для вивчення фрикційних властивостей матеріалів, використовують різноманітні методи визначення сили тертя, швидкості ковзання і температури.

1.5.1 Вимірювання сили тертя.

У вимірюванні сили тертя використовують динамічний (пружинний) та маятниковий методи. Сучасні лабораторні установки використовують динамометри високої жорсткості, що оснащені електричними тензорезисторними силовимірювачами, що представляють собою дротяні датчики, наклеєні на пружний елемент вимірювача, який зазвичай є сталлюю консольною балкою, так званою тензобалкою або кільцем. Дротяні перетворювачі та тензометри на їх основі мають декілька переваг, зокрема, малу інерційність, можливість автоматичної реєстрації показників, високу чутливість та дистанційність вимірювань. Однак, серед недоліків тензодатчиків можна виділити залежність показників від температури, оскільки нагрівання змінює опір перетворювачів.

Найпоширенішою стала схема, в якій дротяний (робочий) перетворювач вмикається в одне плече моста, а неробочий перетворювач (аналогічний

робочому) – у сусіднє плече, що дозволяє значно зменшити температурну похибку вимірювання. Обидва перетворювачі наклеюють на такий же метал, як і вимірювальне (тензометричне) стальне кільце, або на балку. Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя зображена на рис. 1.4.

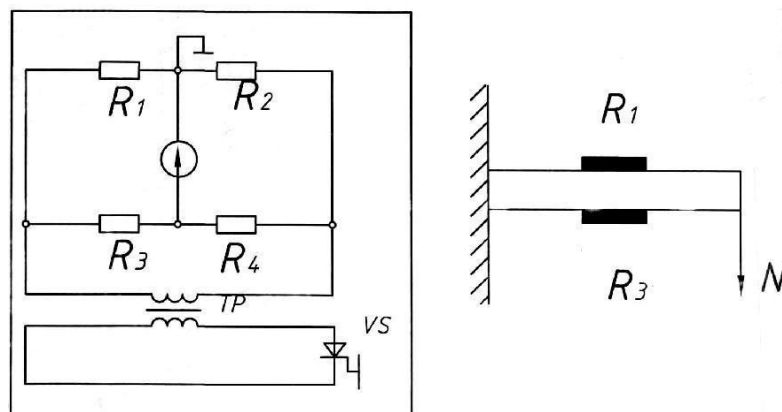


Рисунок 1.4 – Схема тензометричного моста для вимірювання сил тертя

При вимірюванні моменту тертя поряд із тензометричними системами застосовують гідродинамічні (манометричні) методи. Манометрична схема вимірювання моменту тертя зображена на рисунку 1.5

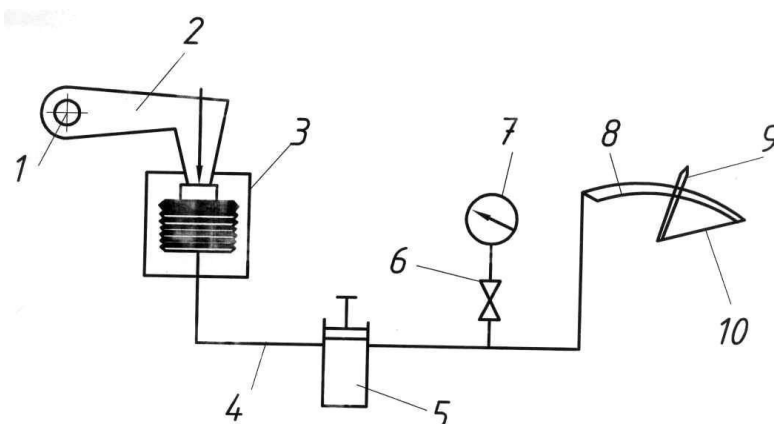


Рисунок 1.5 – Манометрична схема вимірювання моменту тертя: 1 – вал; 2 – важіль; 3 – мездоза; 4 – трубопровід; 5 – порошковий компенсатор; 6 – вентиль; 7 – манометр; 8 – трубка Бурдона; 9 – перо самописця; 10 – пружина

1.5.2 Вимірювання температури.

У вимірюванні температури безпосередньо як фізичної величини є певні технічні обмеження. Оскільки безпосереднє вимірювання температури є неможливим, вимірювання здійснюється за допомогою перетворення температури на іншу фізичну величину, яка може бути об'єктом кількісного оцінювання.

У практичному застосуванні, для вимірювання температур поверхонь, які тертями взаємодіють, найбільш часто використовують контактні термоприймачі, такі як термопари. Найбільше застосовують штучні термопари. В них термометричним параметром є термоелектрорушійна сила (ЕРС).

Вимірювання температури відноситься до важливих завдань, які виникають у машинобудуванні та інших галузях техніки. За фізичними законами безпосереднє вимірювання температури як фізичної величини є неможливим. Тому, для визначення температури використовуються інші фізичні величини, які піддаються кількісному оцінюванню.

Одним із найбільш поширених засобів для вимірювання температури є контактні термоприймачі, або термопари, які дозволяють вимірювати температуру в діапазоні від -100 до 2500 °С з точністю від $\pm(0,1 \dots 25^\circ\text{C})$. Термопари мають інерційність, яка залежить від матеріалу термоприймача, його форми та розмірів. Зменшення розмірів гарячого спаю термопари позитивно впливає на точність вимірювань.

Проте, штучні термопари мають деякі недоліки. Одним із них є неможливість замірювати температуру безпосередньо на поверхнях тертя. Більш того, хромель-алюмелева термопара здатна реєструвати зміну температури в тисячні долі секунди, але це не є показником їх загальної точності. Таким чином, для визначення температури вимірювальні засоби потребують ретельної настройки та врахування деяких особливостей вимірювання, що можуть вплинути на точність отриманих результатів.

Природна термопара є практично безінерційною завдяки тому, що спай нагрівається від джерела, розташованого у самому спаї. Електродами природної термопари є самі елементи пари тертя. Однак, її недоліком є складність градування, що вимагає використання штучної термопари. Використання природної термопари можливо лише у випадку, коли контурна площа контакту близька до номінальної.

Похибки вимірювань можуть виникнути через стрибки струмів, що викликані спалахами температур та порушенням контакту при ковзанні. Для вимірювання температур біля поверхні тертя, а також температурних градієнтів у тонших об'ємах матеріалу, що тонші, ніж у випадку штучної термопари, застосовують метод напів штучної термопари. Цей метод передбачає відсутність постійного гарячого спаю. Термоелектрорушійна сила замірюється між одним з елементів пари тертя та привареним до нього електродом, виготовленим з іншого матеріалу. Недоліком цього методу, як і методу природної термопари, є складність градування та можливість вимірювання температури лише металевих матеріалів.

Для вимірювання температур при терті застосовуються різноманітні методи, включаючи термометри опору та спостереження за легкоплавкими індикаторами температури, кольорами мінливості та термофарбами. Професор Б.І. Костецький розробив структурний метод дослідження температур при терті, який полягає у визначенні величини температури на основі структурних змін та мікротвердості матеріалів.

Найбільш перспективним напрямком розвитку методів вимірювання температури при терті є використання апаратури, що базується на реєстрації теплового випромінювання нагрітих поверхонь. Основною перевагою цього методу є низька інерційність. Для перетворення теплового випромінювання в електричний сигнал використовуються фотоопори, які мають дуже малий час відгуку - в діапазоні від 10^{-6} до 10^{-7} с.

Першим дослідником, який зареєстрував температуру тертя за допомогою інфрачервоного випромінювання, був Ф.П. Боуден. Він використовував сірчано-

свинцевий фотоелемент для вимірювання інтенсивності випромінювання. Для проведення дослідів з вимірювання температури тертя використовувався зразок з прозорого матеріалу, який обертався.

Метод термовізуального вимірювання температур при терті є ефективним інструментом для дослідження процесів тертя. Суть методу полягає у реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єкта дослідження та його подальшому перетворенні в електричні сигнали або видимі зображення. У процесі променевого теплообміну беруть участь лише тонкі поверхневі шари, товщина яких для провідників складає близько 1 мкм. Тому теплове випромінювання для твердих тіл можна розглядати як поверхневе явище.

Тепловізійна установка складається з оптичної головки та відеоконтрольного пристрою з амплітудним індикатором і індикатором яскравості. Інфрачервоне випромінювання поверхні тертя системи дзеркал оптичної установки фокусується на чутливому шарі фотоприймача (фотоопору), який перетворює інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали. Блок-схема тепловізора зображена на рисунку 1.6.

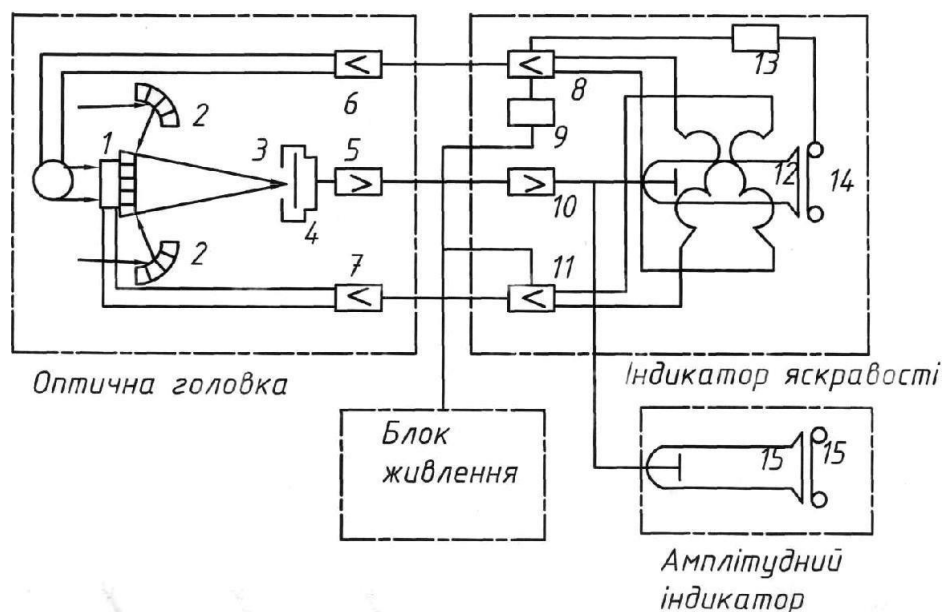


Рисунок 1.6 – Блок-схема тепловізійної установки: 1 – плоске дзеркало; 2 – параболічне дзеркало; 3 – фотоопір; 4 – охолоджувальний пристрій (рідкий азот); 5 – попередній підсилювач; 6 – скануючий пристрій по кадрах; 7 – скануючий пристрій по рядках; 8 – генератор кадрової розгортки; 9 – вузол формування і змішування рядкових і кадрових гасячих імпульсів; 10 – відеопідсилювач; 11 – генератор рядкової розгортки; 12 – електронно-променева трубка; 13 – вузол синхронізації роботи затвору фотоапарата; 14, 15 – фотоприставки; 16 – електронно-променева трубка амплітудного індикаторів

Тепловізійна установка складається з оптичної головки і відеоконтрольного пристрою амплітудного індикатора й індикатора яскравості. Інфрачервоне випромінювання поверхні тертя системи дзеркал оптичної установки фокусується на чутливий шар фотоприймача (фотоопору), який перетворює інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали.

У процесі дослідження тертя використовується метод термовізуального вимірювання температур. Зазначений метод полягає в реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єкта дослідження та його наступному перетворенні в електричні сигнали чи у видиме зображення. При цьому, променевий теплообмін відбувається лише у тонких поверхневих шарах, для провідників яких товщина

шарів становить близько 1 мкм. Тому, теплове випромінювання для твердих тіл можна розглядати як поверхнєве явище.

1.6 Висновок

Існує низка причин, які призводять до зношування поверхні валу. Зазначений процес зносу виникає внаслідок тертя та ковзання валу по сальниковій набивці, що призводить до втрати матеріалу з поверхні. Основними факторами, що сприяють зношуванню поверхні вала, є зміщення, вібрація, високий тиск та підвищена температура. В результаті зносу поверхні вала виникають негативні наслідки, такі як погіршення продуктивності обладнання, збільшення витрат на технічне обслуговування та потенційні відмови системи.

Наукова спільнота розробила різноманітні методи для вимірювання та аналізу зносу поверхні вала, включаючи фізичні методи вимірювання, такі як профілометрія та мікроскопія, а також непрямі методи, наприклад, аналіз вібрацій та тепловізуальний аналіз. Проте, ці методи можуть бути трудомісткими, вимагати значних витрат та не завжди забезпечувати точні результати. Тому виникає необхідність розробки більш ефективних та точних методів вимірювання та аналізу зносу поверхні вала.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОСУ

2.1 Комп'ютерне моделювання

Традиційно під моделюванням на ЕОМ розумілося лише імітаційне моделювання. Але останніми роками завдяки розвитку графічного інтерфейсу та графічних пакетів значного поширення набуло комп'ютерне структурно-функціональне моделювання, а також розпочалося використання комп'ютера з метою концептуального моделювання, наприклад для побудови систем штучного інтелекту. Отже, поняття «комп'ютерне моделювання» значно ширше за традиційне поняття «моделювання на ЕОМ».

Під комп'ютерною моделлю найчастіше розуміють: умовний образ об'єкта чи деякої системи об'єктів (або процесів), описаних за допомогою взаємозалежних комп'ютерних таблиць, схем, діаграм, графіків, малюнків, анімаційних фрагментів, гіпертекстів і т. ін., що відбивають структуру та взаємозв'язки між елементами об'єкта чи системи. Комп'ютерні моделі такого типу називають структурно-функціональними; окрему програму, сукупність програм чи програмний комплекс, що дає змогу виконанням послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням їх результатів відтворювати (імітувати) процеси функціонування об'єкта (системи об'єктів), що функціонує під впливом різних, як правило випадкових, факторів. Такі моделі називають імітаційними моделями.

Комп'ютерне моделювання — метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуканні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Предметом комп'ютерного моделювання може бути економічна діяльність фірми, банку, промислового підприємства; інформаційно-обчислювальна мережа; технологічний процес; будь-який реальний об'єкт чи процес, наприклад процес інфляції, і взагалі — будь-яка складна система. І хоча цілі комп'ютерного моделювання можуть бути різними, найчастіше воно, як уже зазначалося, становить центральну процедуру системного аналізу — сукупності методологічних засобів, що використовуються для підготовки та прийняття рішень економічного, організаційного, соціального чи технічного характеру.

Комп'ютерна модель складної системи має якомога повніше відбивати всі основні фактори й взаємозв'язки, що характеризують реальні ситуації, критерії та обмеження. До того ж модель має бути настільки універсальною (щоб охоплювати якнайширше коло близьких за призначенням об'єктів) настільки й простою (щоб сприяти виконанню необхідних досліджень із мінімальними витратами).

В програмному комплексі ANSYS, використовують модифіковане рівняння Арчарда (2), де \dot{W} – швидкість зношення, K – безрозмірний коефіцієнт зношення, H – твердість матеріалу, що зношується, v – швидкість ковзання, P – прикладений тиск.

$$\dot{W} = \frac{K}{H} \times v \times P \quad (2)$$

Найбільшу цікавість представляє коефіцієнт зношення K , визначення якого можливе лише в результаті проведення експерименту. Так в роботі [27] наведені величини інтенсивності зношення (мг/год), прикладеного тиску (МПа), швидкості ковзання – 3 м/с. Матеріал захисної втулки – нержавіюча сталь, твердість якої можна вважати 1/3 від границі текучості (σ_y) [29]. Для нержавіючої сталі значення границі текучості прийнято 207 МПа. Тому величина твердості дорівнює (3)

$$H = \frac{\sigma_y}{3} = \frac{207}{3} = 69 \text{ (МПа)} \quad (3)$$

Таким чином, з рівняння (2) можемо виразити коефіцієнт K (4), значення якого наведені в таблиці 1:

$$K = \frac{\dot{W}H}{vP} \quad (4)$$

Також важливим моментом при розв'язанні зносоконтактної задачі є знаходження відповідності між експериментальною інтенсивністю зношення (J) та швидкістю зношення за Арчардом (\dot{W}). Відповідність наведено у формулі (5):

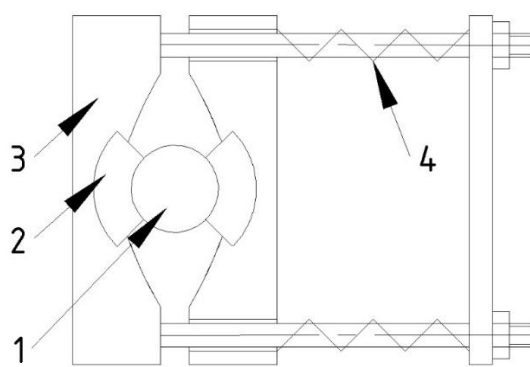
$$\dot{W} = J \frac{10^{-6}}{\rho \cdot 3600} \quad (5)$$

де ρ – густина матеріалу втулки.

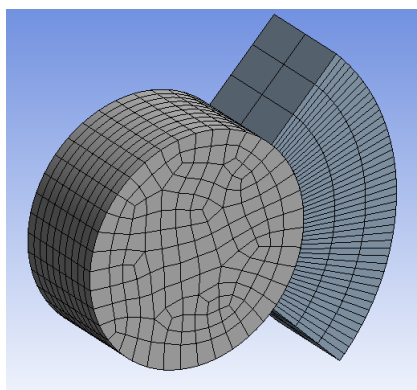
Таблиця 1 – Показники експериментальної інтенсивності зношення [27], швидкості зношення та коефіцієнту зношення в залежності від прикладеного тиску

Інтенсивність зношення експериментальна (мг/год)	Прикладений тиск (МПа)	Швидкість зношення експериментальна (м ³ /с*10 ⁻¹⁴)	Коефіцієнт зношення (10 ⁻⁸)
0.21	0.08	0.752	0.706
0.67	0.12	2.401	1.503
0.93	0.17	3.333	1.472
2.44	0.25	8.746	2.627
3.68	0.34	13.190	2.910
7.00	0.46	25.090	4.096

Для проведення досліджень створена тривимірна модель експериментальної установки (рис. 2.1) [27]. Установка складається із двох колодок 3, в які вкладені попередньо опресовані зразки сальникової набивки 2. Зразки вкладені таким чином, щоб не змінювалось їх положення під час обертання вала з захисною втулкою 1. Вал приводиться в обертальний рух двигуном, який має можливість змінення частоти обертання від 640 до 3200 об/хв. Сила робочого стиснення регулюється стисненням пружин (4) в діапазоні 10-150 Н



а)



б)

Рисунок 2.1 – Схема (а) та тривимірна модель установки (б)

Модель має дві основні складові: вал діаметром 30 мм та товщиною 13 мм, і зразок сальникової набивки квадратного поперечного перетину 13x13 мм. Матеріал вала – нержавіюча сталь 30X13 (модуль пружності – 2.1 ГПа,

коефіцієнт Пуассона – 0.31), матеріал набивки – азбестофторопласт АФТ (модуль пружності – 50 МПа, коефіцієнт Пуассона – 0.45).

Для моделювання зношення використовувалась модель контакту із тертям. Контактною поверхнею є поверхня втулки, цільовою поверхнею виступає поверхня сальникової набивки. Коефіцієнт тертя між поверхнями дорівнює 0.04. Розв’язання контактної задачі проводилося на основі розширеного формулювання Лагранжа.

При створенні скінченно-елементної сітки важливо визначення кількості елементів в обох тілах. Необхідно досягти балансу між точністю і часом розрахунку. Вигляд скінченно-елементної сітки представлений на рис. 2.1, б. Кількість елементів дорівнювала – 4290, вузлів – 22158.

У якості граничних умов представлені: зовнішній тиск, прикладений на поверхню сальникової набивки та лінійна швидкість обертання вала - 3 м/с (рис. 2.2). При цьому обидва твердих тіла обмежені у переміщенні вздовж осі у, а поверхня вала має можливість обертатися навколо власної осі обертання.

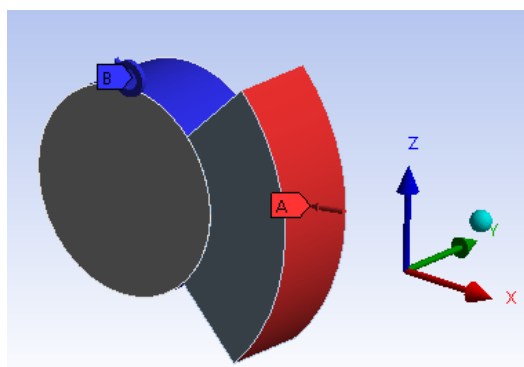


Рисунок 2.2 – Граничні умови

Для визначення зношення вала використовувалась вбудована команда (6), яка використовує видозмінену формулу Арчарда (7). Де коефіцієнти m та n є показниками ступеня при тиску та швидкості відповідно.

$$\begin{aligned} TB, WEAR, 1, , , ARCD \\ TB DATA, 1, K, H, m, n \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{W} = \frac{K}{H} \times P^m \times v^n \quad (7)$$

В цьому дослідженні допускається, що процес зношення відбувається при ізотермічному режимі. Таке допущення базується на уявленні, що робоче середовище протікаючи через ущільнення повністю відводить надмірне тепло.

2.2 Зношення поверхні втулки із врахуванням задачі гідропружності сальникової набивки

Визначення величини зносу поверхні вала є дуже важливим для радіального сальникового ущільнення. Як відомо, найбільший рівень зношення спостерігається у місці підвищеного контактного тиску в парі тертя. Найбільш повну картину визначення контактної тиску представлено в роботі [28], де розглядається розподіл контактної тиску у торцевому сальниковому ущільненні. Тут окрім безпосередньо контактної задачі додатково розв'язується зв'язана задача гідропружності. Аналогічна картина характерна для радіального сальникового ущільнення. На рис. 2.3 зображено дію гідравлічного тиску на сальникову набивку.

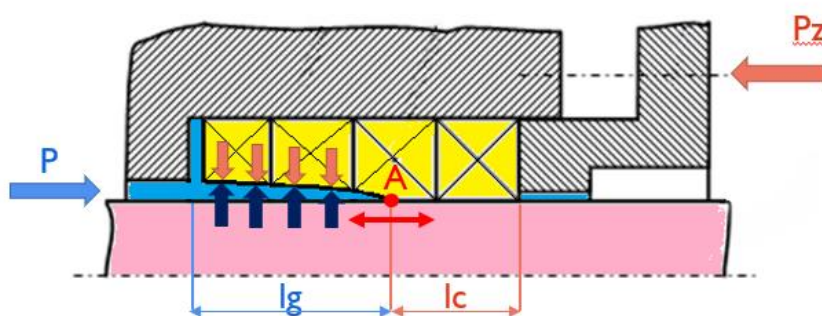


Рисунок 2.3 – Врахування гідропружної взаємодії у сальниковому ущільненні, де P – робочий тиск, Pz – тиск, що діє на натискну втулку, lg – ділянка із значним зазором, lc – ділянка контакту, A – точка переходу між ділянками, яка змінює своє положення вздовж пакету набивки в залежності від умов роботи.

При чому частина пакету сальникової набивки зі сторони робочого тиску відтискається від поверхні вала, а інша частина на виході з ущільнення перебуває в контакті з ним. Тому для розв'язання зносоконтактної задачі сальникового ущільнення окрім контактних критично важливо враховувати дію гідропружних сил. Алгоритм розв'язання такої задачі представлено на рис. 2.4.

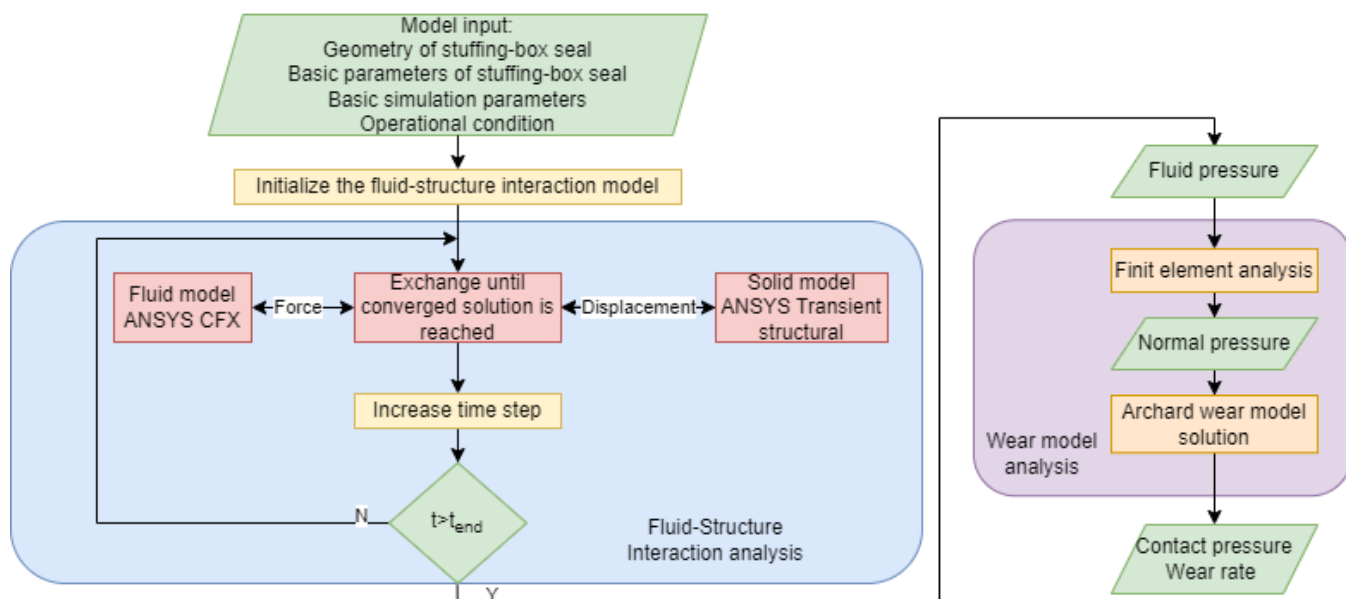


Рисунок 2.4 – Блок схема алгоритма розв'язання зносоконтактної задачі сальникового ущільнення

Моделювання проводилось при змінненні тиску робочого середовища та швидкості обертання вала. Значення робочих параметрів представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Робочі параметри

Назва параметра	Величина				
Робочий тиск (МПа)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Лінійна швидкість обертання вала (м/с)	1	2	3	4	5

2.3 Результати валідації моделі зношення

Для валідації моделі зношення сальникового ущільнення виконано числові дослідження із різними комбінаціями показників ступеня m та n . В кінцевому результаті визначено, що при значеннях показників ступеня $m=1.5$ і $n=1.3$ запропонована модель зношення співпадає із експериментом. Результати проведеного дослідження представлені на рис. 2.5, на якому зображений графік залежності об'єму зношення від прикладеного навантаження. Графік показує, що величини об'єму зношення при відповідних навантаженнях, отримані при моделюванні, в цілому співпадають з експериментальними даними. Величина відхилення не перевищує 10%.

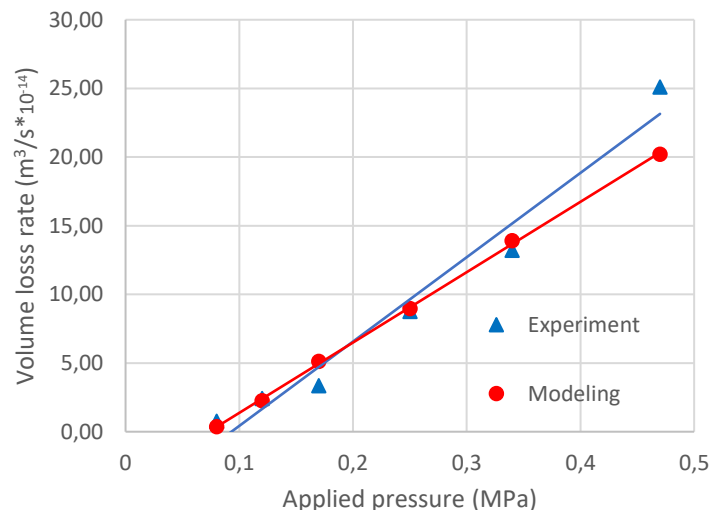


Рисунок 2.5 – Залежність величини об'ємного зношення від прикладеного навантаження

Крім того, необхідно відмітити, що в роботі [27] також експериментально досліджувалася величина відносного зношення вала, виготовленого з різних матеріалів та при різному способі загартування. У зв'язку з тим, що у цій роботі відсутня інформація відносно конкретних значень твердості вала, а лише показано різницю в інтенсивності зношення. Тому значення твердості вибиралися із довідникової літератури (ДСТУ 7806:2015). Порівняння

результатів моделювання і експерименту у вигляді відносної величини зношення для різних матеріалів вала наведені на рис. 2.6. За одиницю приймалося значення показника відносного зношення для матеріалу вала, виготовленого із чавуна СЧ18. Проаналізувавши отриману залежність, можна зробити висновок, що хоча значення відносного зношення для розрахункової моделі є заниженими в порівнянні з експериментальними даними, проте зберігається тенденція до зниження величини зношення для різних типів матеріалів у наведеній на рисунку 6 послідовності.

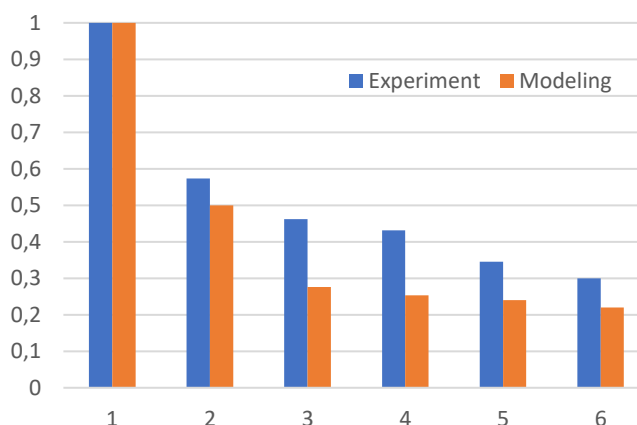


Рисунок 2.6 - Відносне зношення втулок, виготовлених з різних матеріалів:

- 1) чавун СЧ-18; 2) чавун СЧ 18 з індукційним гартуванням; 3) сталь 40Х з ізотермічним гартуванням; 4) чавун СЧ 18 з індукційним гартуванням і науглецюванням; 5) сталь Ст 20 з азотуванням; 6) сталь 45Х

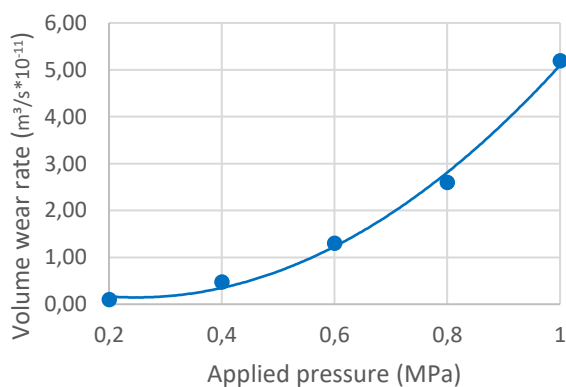
Таким чином, можна стверджувати, що модель Арчарда може бути застосована при дослідженнях зношення вала в сальникових ущільненнях.

2.4 Результати розв'язання зносоконтактної задачі з урахуванням гідропружної поведінки сальникової набивки

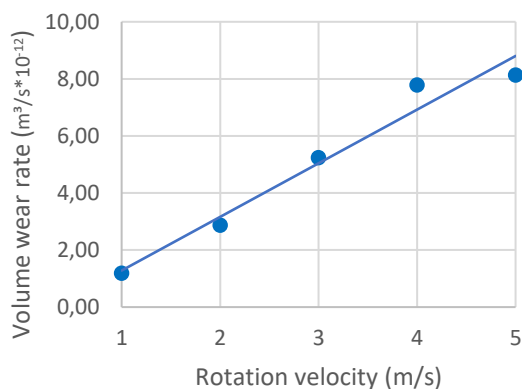
В якості результатів проведеного дослідження обрано інтенсивність зношення та розподіл контактного тиску по ширині пари тертя.

2.4.1 Інтенсивність зношення.

В результаті проведених досліджень визначено інтенсивність зношення вала в залежності від змінення робочого тиску (рис. 2.7,а) та лінійної швидкості обертання вала (рис. 2.7,б). Так, зі зміненням швидкості обертання вала спостерігається лінійний ріст інтенсивності зношення. При цьому, зі збільшенням величини робочого тиску інтенсивність зношення збільшується за поліноміальною залежністю. Така розбіжність в залежностях пояснюється тим, що при розрахунку інтенсивності зношення при змінній робочого тиску, зі змінням тиску також змінюється коефіцієнт зношення.



a)



б)

Рисунок 2.7 – Залежність інтенсивності зношення від тиску робочого середовища (а) та лінійної швидкості обертання вала (б)

2.4.2 Розподіл контактного тиску.

На рис. 2.8 зображено розподіл контактного тиску по ширині пари тертя при різних значеннях робочого тиску. Точка 0 мм по ширині пари тертя є входом в ущільнення, а точка 13 мм – виходом. З графіка видно, що із збільшенням робочого тиску контактний тиск також збільшується. Контактний тиск зростає при наближенні до виходу з ущільнення. Така тенденція пояснюється тим, що гідравлічний тиск по мірі наближення до виходу з ущільнення зменшується (Рис. 2.3).

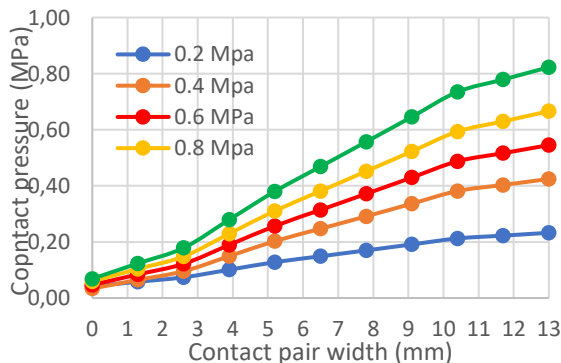
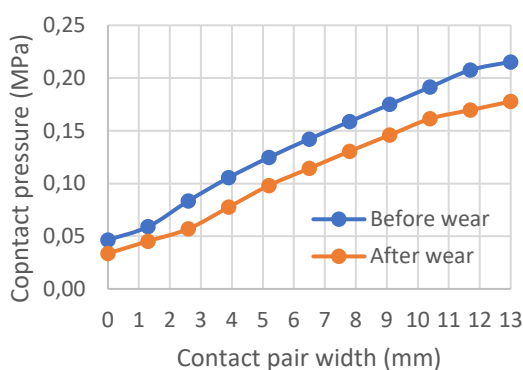
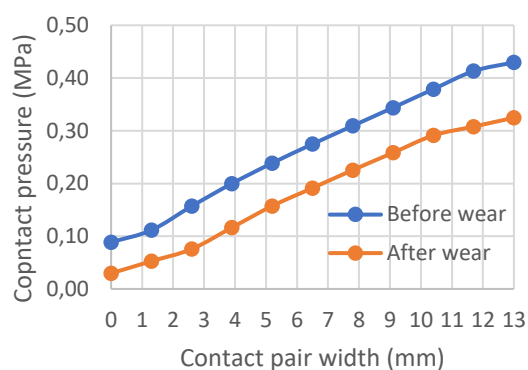


Рисунок 2.8 - Розподіл контактного тиску по ширині пари тертя при змінненні тиску робочого середовища

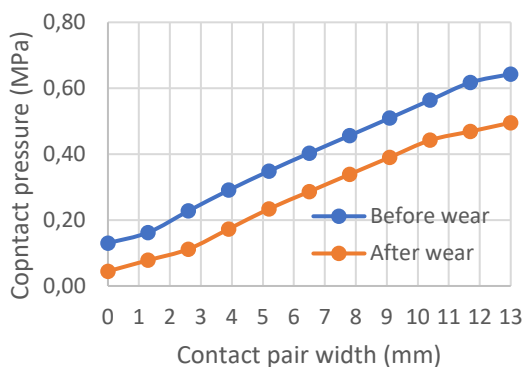
На рис. 2.9 а-д зображено розподіли контактної тиску до і після зношення втулки вала. Із графіків видно, що після зношення контактний тиск зменшується по всій ширині пари тертя. При чому при збільшенні робочого тиску падіння контактної тиску також збільшується. Змінення (зменшення) контактної тиску в процесі моделювання є однією із непрямих ознак зношення контактуючих поверхонь.



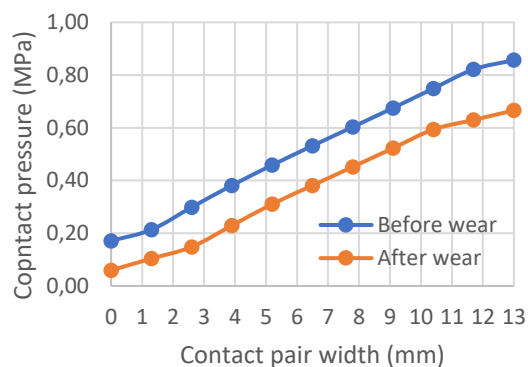
а)



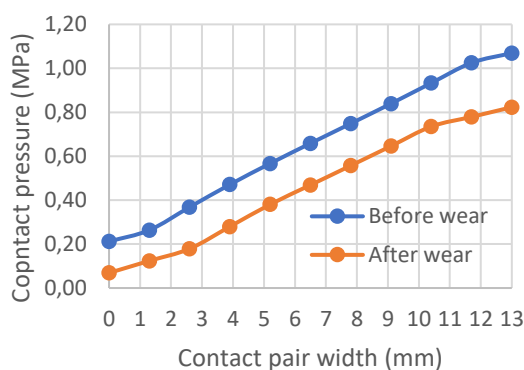
б)



в)



г)



д)

Рисунок 2.9 – Розподіл контактної тиску до та після зношення при робочому тиску: а) 0,2 МПа, б) 0,4 МПа, в) 0,6 МПа, г) 0,8 МПа, д) 1 МПа

Дослідження впливу змінення швидкості обертання вала на розподіл контактного тиску виконувалося при робочому тиску 0.4 МПа (рис. 2.10). Аналізуючи вплив змінення швидкості обертання вала можна відмітити, що немає чіткої залежності між збільшенням або зменшенням контактного тиску відносно збільшення лінійної швидкості обертання вала. Таким чином, існує можливість для подальшого покращення представленої моделі зношення щодо врахування швидкості ковзання контактуючих елементів.

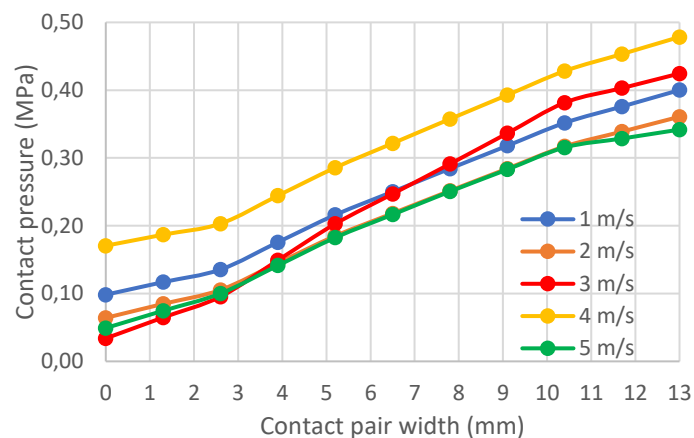


Рисунок 2.10 – Розподіл контактний тиску по ширині пари тертя при змінній швидкості обертання вала

На рис. 2.11 показане змінення форми контактної поверхні. Із графіків видно, що найбільшій втраті матеріалу зазнає ділянка ближча до виходу з ущільнення. Тобто, як зазначено вище, в місцях більших значень контактний тиску. Також варто відмітити той факт, що із ростом лінійної швидкості обертання вала величина втрати матеріалу збільшується прямо пропорційно.

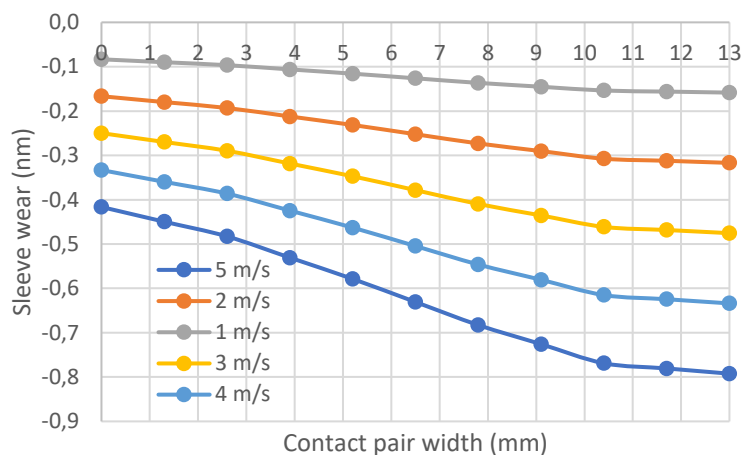


Рисунок 2.11 – Змінення форми контактної поверхні за час 10^7 с

Окремо необхідно зазначити, що отримані результати моделювання можуть мати дещо ідеалізовану картину зношення контактуючих поверхонь так як не враховується дія абразивних включень, які можуть бути присутні в робочому середовищі сальникового ущільнення; не враховується неспіввісність вала та ущільнення і нерівномірне навантаження натискного елемента ущільнення, який утримує сальникову набивку всередині камери; не враховується ступінь вимивання просочення сальникової набивки; не враховується вплив температури. Вплив цих факторів може бути відображений у подальших дослідженнях.

Тим не менш, незважаючи на всі вказані обмеження запропонованої моделі, її можна використовувати для визначення зношення контактуючих поверхонь. Що стосується сальникових ущільнень, то цю модель можна використовувати для прогнозування зношення поверхонь захисних втулок і як наслідок уточнення проміжків часу для проведення обслуговування сальникових ущільнень.

2.5 Висновок

Отримані результати досліджень вказують на те, що запропонована модель зношення сальникового ущільнення, побудована на основі моделі Арчарда,

достатньо точно відповідає експериментальним даним при показниках ступеня $m=1.5$ та $n=1.3$. Графічне представлення залежності об'єму зношення від прикладеного навантаження підтверджує відповідність результатів розрахунку експериментальним даним з точністю до 10%.

Наведені результати розрахунку вказують на те, що модель враховує вплив робочого тиску та швидкості обертання вала на інтенсивність зношення. Розбіжність у впливі цих параметрів на інтенсивність зношення пояснюється зміненням коефіцієнту зношення із ростом робочого тиску.

Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Модель зношення може бути використана для прогнозування зношення поверхонь захисних втулок, що допоможе уточнити періоди обслуговування сальникових ущільнень і, отже, підвищити їх термін служби. В результаті розв'язання зносоконтактної задачі поглиблено розуміння процесів зношення в сальникових ущільненнях. Врахування недоліків моделі, таких як відсутність урахування абразивних включень, нерівномірного навантаження чи змінення температури у подальших дослідженнях, може покращити її точність та застосовність.

ВИСНОВКИ

Досліджено причини зношування поверхні валу, зокрема тертя, ковзання, зміщення, вібрацію, високий тиск та підвищену температуру. Встановлено, що знос поверхні вала має негативні наслідки, такі як погіршення продуктивності, збільшення витрат на обслуговування та можливі відмови системи.

Оглянуто різні методи вимірювання та аналізу зносу поверхні вала, зокрема фізичні методи (профілометрія, мікроскопія) та непрямі методи (аналіз вібрацій, тепловізуальний аналіз). Зазначено, що ці методи можуть бути трудомісткими та не завжди забезпечують точні результати, тому необхідна розробка більш ефективних методів.

У цій магістрській роботі запропоновано комп'ютерну модель зношування поверхні вала з сальником з використанням методу скінченних елементів (FEM) та програмного комплексу Ansys. Зазначено, що цей підхід дозволяє отримати точні та надійні результати.

Проаналізовано модель зносу Арчарда як одну з поширених моделей зносу. Визначено її переваги (простота реалізації, здатність прогнозувати термін служби деталей) та недоліки (спрощені припущення, обмежена точність).

Незважаючи на свої обмеження, модель Арчарда може бути корисною для проектування та прогнозування термінів служби деталей. Вона може сприяти врахуванню зношування та плануванню обслуговування або заміни деталей інженерами.

Використання моделі Арчарда може бути першим кроком у поліпшенні моделей зношування. Вона може служити базовою основою для розробки більш складних моделей, які враховують додаткові фактори та процеси, що впливають на зношування.

Загалом, модель Арчарда має свої переваги у вигляді простоти та універсальності, але також має обмеження, пов'язані з спрощеними припущеннями та обмеженою точністю. Використання цієї моделі може бути

корисним для початкової оцінки зношування та прогнозування термінів служби деталей, а також для подальшого розвитку більш складних моделей зношування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lu F, Liu J, Pang X, Song C, Xu Z. Wear modelling and sealing performance prediction of C/C composite finger seal. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2023;237(5):1142-1155. doi:10.1177/13506501221145509.
2. Wei Q, Ahmat M, Runsheng Y, He W. Numerical analysis and formula correction of mechanical seal ring wear of slurry pump based on thermal deformation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023;0(0). doi:10.1177/09544089231191463.
3. X. Ni, J. Sun, C. Ma, and Y. Zhang, "Wear Model of a Mechanical Seal Based on Piecewise Fractal Theory," *Fractal and Fractional*, vol. 7, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/fractalfract7030251.
4. L. Mattei and F. Di Puccio, "Influence of the wear partition factor on wear evolution modelling of sliding surfaces," *Int J Mech Sci*, vol. 99, pp. 72–88, May 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.03.022.
5. W. He, S. Wang, C. Zhang, X. Wang, and D. Liu, "A wear simulation method for mechanical face seals under friction instability conditions," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/APP10082875.
6. Grün, J., Feldmeth, S., & Bauer, F. (2021). Wear on radial lip seals: a numerical study of the influence on the sealing mechanism. *Wear*, 476, 203674. doi:10.1016/j.wear.2021.203674.
7. Anne Bolvari, Sherry Glenn, Rob Janssen, Chris Ellis "Wear and friction of aramid fibre and PTFE filled composites"
8. ДСТУ EN 12266-2:2009. Арматура трубопровідна промислова. Випробування.
9. Гермомеханіка. Розділ "Теорія і конструкції сальникових ущільнень" [Текст] : конспект лекцій для студ. спец. 8.080303 "Динаміка і міцність" денної форми навчання / В. А. Марцінковський, А. В. Загоруйко, С. М. Гудков. — Суми : СумДУ, 2009. — 92 с.
10. ДСТУ EN ISO 9222-1:2018 Кресленики технічні. Ущільнювачі для рухомого з'єднання. Частина 1. Загальне спрощене подання (EN ISO 9222-1:1995, IDT; ISO 9222-1:1989, IDT)
11. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004. — Т. 1 : А — К. — 640 с. — ISBN 966-7804-14-3.
12. Хоменко І. М. Технологічні критерії граничного зносу машин. Чернігів: Чернігівський держ. техн. ун-т, 2005. — 191 с. — ISBN 966-7496-17-1
13. Di Liu, Shaoping Wang, Chao Zhang "A multiscale wear simulation method for rotary lip seal under mixed lubricating conditions."
14. Bekesi N, Varadi K. Wear simulation of a reciprocating seal by global remeshing. *Period Polytech - Mech Eng* 2010;54(2):71.

15. Bekesi N, Varadi K, Felhos D. Wear simulation of a reciprocating seal. *J Tribol* 2011; 133(3), 031601.
16. Stormorken H. Wear and friction of PTFE seals. *Wear* 1999;224(2):175–82.
17. Weber D, Haas W. Wear behaviour of PTFE lip seals with different sealing edge designs, experiments and simulation. *Seal Technol* 2007;2007(2):7–12.
18. Wang Z, Draper D, Hodapp T. Radial lip seal simulation using ANSYS non-standard procedures. In: International ANSYS conference, Pittsburgh; 2006. p. 1–12.
19. Xin L, Gaoliang P, Zhe L. Prediction of seal wear with thermal–structural coupled finite element method. *Finite Elem Anal Des* 2014;83:10–21.
20. Li X, Peng G, Wang Q, Liu Y. A numerical analysis method of hydraulic seals for downhole equipments. *Adv Mech Eng* 2013;2013(3):833–9.
21. Frolich D, Magyar B, Sauer B. A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals. *Wear* 2014;311(1):71–80.
22. D. Liu, S. Wang, C. Zhang, and M. Tomovic, “Wear Simulation Method for Mechanical Seals Under Mixed Lubrication Using Flow Factors,” 2019, pp. 705–718. doi: 10.1007/978-981-13-0411-8_63.
23. T. C. Huang, C. Y. Lin, and K. C. Liao, “Sealing performance assessments of PTFE rotary lip seals based on the elasto-hydrodynamic analysis with the modified archard wear model,” *Tribol Int*, vol. 176, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107917.
24. Yang, Guijuan, Zhang, Huifang and Zhang, Lirong. "Study of frictional wear properties of materials for mechanical seals" *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol.0, no.0, 2023, pp.-. <https://doi.org/10.2478/amns.2023.1.00058>.
25. Zhao, W., Zhang, G. & Dong, G. Friction and wear behavior of different seal materials under water-lubricated conditions. *Friction* 9, 697–709 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0364-5>.
26. S. Gudkov, Mechanical seals with hydrodynamic unloading of friction pair, *News of Sumy State University, Series Technical Sciences*, No. 2, 2007, 34-41.
27. Gaft Y.Z., Zagorulko A.V. Experimental investigations of shaft/gland packing friction pair wearing characteristics, *Problemy Eksploatacji*, (1998) 113-119.
28. Y. Sapozhnykov, A. Zahorulko, and G. Peczkis, “Numerical Simulation of 2-Way FSI Problem of Face Packing Seal: Impact of Parameters Change,” *Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. E12–E27, 2022, doi: 10.21272/jes.2022.9(2).e3.
29. ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide. https://www.academia.edu/38866112/ANSYS_Mechanical_APDL_Contact_Technology_Guide
30. Розрахунок напружень у сальниковому ущільненні [Текст] / В. А. Марцинковський // *Машинознавство : Науково-технічний і виробничий журнал; Внесений ВАК до Переліку наукових фахових видань України у галузі "Технічні науки", "Фізико-математичні науки (механіка деформівного твердого тіла)";*

Мова видання: українська / Засновник: Товариство з обмеженою відповідальністю «КІНПАТРІ ЛТД». — 1999. — № 4. — С. 41-44.