

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз конструкції та підвищення зносостійкості ущільнення колінчастого валу двигуна автомобіля

Рівень вищої освіти: другий магістерський

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр: КРММТВА 25.24338.000. ПЗ


Виконав: студент 2 курсу,
група МТВАм -24-1

 Сергій ВОЙТЮК


Керівник, к.т.н., доцент

 Володимир ДИТИНЮК

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

 Олег БАБАК

До захисту допускаю:
завідувач кафедри ТАМ

 Олександр ДИХА

8 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: другий магістерський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ
Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Войтюк Сергій Володимирович

1. Тема проекту:

«Аналіз конструкції та підвищення зносостійкості ущільнення колінчастого валу двигуна автомобіля»

керівник проекту: Дитинюк Володимир Олександрович, д-р філософ..

Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- 1) Дані про умови роботи манжетного ущільнення колінвала
- 2) Технічні умови на показники герметичності ущільнюючих пристроїв автомобілів
- 3) Матеріали науково-дослідної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація по способам підвищення зносостійкості гумових манжетних ущільнень
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

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

1. Обґрунтування актуальності дослідження герметичності манжетних ущільнень колінчастого валу
2. Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо експлуатації і підвищення довговічності манжетних ущільнень
3. Дослідження манжетних ущільнень на надійність і довговічність їх використання

4. Розробка конструкції інформаційного манжетного ущільнення і стенду для випробування манжетного ущільнення валів

5. Консультанти розділів роботи


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

6. Дата видачі завдання: 30 вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Обґрунтування актуальності дослідження герметичності манжетних ущільнень колінчастого валу	1.11.2025	
2	Огляд літературних джерел та патентно-інформаційних матеріалів щодо експлуатації і підвищення довговічності манжетних ущільнень	15.11.2025	
3	Дослідження манжетних ущільнень на надійність і довговічність їх використання	1.12.2025	
4	Розробка конструкції інформаційного манжетного ущільнення і стенду для випробування манжетного ущільнення валів	05.12.2025	
5	Підготовка публікації	10.12.2025	
6	Оформлення презентаційних матеріалів	15.12.2025	

Студент

 Сергій ВОЙТЮК

Керівник роботи

 Володимир ДИТИНЮК

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 85 сторінок, кількість рисунків - 35, таблиць - 1, додатків - 2, кількість джерел згідно із переліком посилань - 22.

Студент гр. МТВАм-24-1 Войтюк С.В.

Тема «Аналіз конструкції та підвищення зносостійкості ущільнення колінчастого валу двигуна автомобіля»

Манжетні ущільнення обертових валів встановлені на таких важливих агрегатах автомобіля, як двигун, коробка передач, роздавальна коробка, редуктори провідних мостів і рульова колонка. Від надійності ущільнень безпосередньо залежить термін служби агрегатів, а їх раптова відмова тягне за собою трудомісткий дорогий ремонт.

Мета роботи полягає в розробці конструкції манжетних ущільнень і отримання даних щодо їх стану з метою підвищення надійності автомобільних двигунів шляхом контролю герметичності ущільнень колінчастого валу при капітальному ремонті.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:





Для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

1. Дослідження літературних джерел щодо експлуатації манжетних ущільнень, причин їх виходу з ладу і підвищення їх довговічності.
2. Моделювання зношування ущільнення валу для обертових валів і дослідити зносостійкість ущільнення валу.
3. Експериментальні дослідження технічного стану манжетного ущільнення і виконати кінцево-елементне моделювання манжетних ущільнень за допомогою програмного комплексу Ansys.
4. Розробка конструкції інформаційного манжетного ущільнення і стенду для випробування манжетного ущільнення валів.

Перелік ключових слів: манжетні ущільнення, колінчастий вал, зносостійкість, моделювання, надійність, випробувальний стенд

Зміст

Вступ.....	6
1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ МАНЖЕТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ.....	8
1.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження (колінчастий вал двз).....	8
1.2. Обґрунтування теми та формулювання задач досліджень.....	13
2. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЩОДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МАНЖЕТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ.....	15
2.1. Особливості експлуатації манжетних ущільнень.....	15
2.2. Підвищення довговічності манжетних ущільнень.....	22
3. ДОСЛІДЖЕННЯ МАНЖЕТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ НА НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	41
3.1. Моделювання зношування ущільнення валу для обертових валів	41
3.2. Дослідження зносостійкості ущільнення валу.....	45
3.3. Експериментальні дослідження технічного стану манжетного ущільнення.....	50

						КРММТВА 25.24338.000. ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Аналіз конструкції та підвищення зносостійкості ущільнення колінчастого валу двигуна автомобіля					
Розроб.	Войпок							Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дитинюк							4	80	
Н.контр.	Бабак							ХНУ, гр. МТВАм-24-1		
Затвер	Диха									

3.4. Кінцево-елементне моделювання манжетних ущільнень за допомогою програмного комплексу Ansys.....56

4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНОГО МАНЖЕТНОГО УЩІЛЬНЕННЯ І СТЕНДУ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ МАНЖЕТНОГО УЩІЛЬНЕННЯ ВАЛІВ.....60

4.1. Обґрунтування необхідності розробки.....60

4.2. Вимоги, які ставляться до розробки.....60

4.3. Будова і принцип роботи стенду для випробування манжетного ущільнення валів.....62

4.4. Розробка манжетного ущільнення валу з датчиками інформаційно-енергетичного стану.....63

5. ЗАХОДИ З БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.....65

Висновки.....75

Список використаних джерел.....76

Додатки.....79

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Ст.
Зм.	Адк.	№ докум	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Постійне зростання вимог до якості, надійності, довговічності та зменшення маси сучасних елементів конструкцій зумовлює необхідність подальшого розвитку методів механіки деформованого твердого тіла. Ці методи мають забезпечувати можливість максимально повного використання міцнісних характеристик матеріалів під час їх експлуатації. У цьому контексті спектр крайових задач, що розв'язуються для відповідальних конструктивних компонентів із урахуванням деформацій повзучості та критеріїв тривалої міцності, постійно розширюється. Окрім того, явище повзучості широко застосовується у технологічних процесах формозміни (формування) конструктивних елементів під час обробки металів тиском у режимах повільного деформування. Ці процеси є характерними переважно для стадій виготовлення деталей. Проте існує також низка задач відновлення геометричних параметрів контактуючих елементів, які вже відпрацювали свій ресурс (наприклад, надмірне збільшення зазору в циліндричних парах тертя). Подібні задачі можуть бути ефективно розв'язані шляхом використання режимів деформації повзучості.

Розроблення технологій такого типу має спиратися на науково обґрунтовану методологічну базу, ключовим елементом якої є створення методів аналітичного та числового розв'язання контактних крайових задач для пар тертя в умовах повзучості зі змішаними силовими й кінематичними граничними умовами. Окрему групу становлять прикладні задачі, у яких формозміна елементів конструкцій за умов повзучості відбувається вже в процесі експлуатації. У таких ситуаціях зовнішні впливи часто наближаються за своїм характером до режимів деформування, властивих технологіям обробки металів тиском, де реалізуються «жорстко» задані кінематичні граничні умови. До відповідних типів конструкцій належать, зокрема, вузли ущільнювальних систем енергетичного обладнання, що одночасно виконують функції елементів тертя.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою роботи є розроблення конструкції манжетних ущільнень з метою підвищення надійності автомобільних двигунів на основі контролю герметичності ущільнень колінчастого валу під час капітального ремонту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити **задачі**:

1. Провести аналіз літературних джерел щодо умов експлуатації манжетних ущільнень, причин їх виходу з ладу та способів підвищення їх довговічності.
2. Виконати моделювання процесів зношування ущільнення обертового валу та дослідити показники його зносостійкості.
3. Реалізувати експериментальні дослідження технічного стану манжетного ущільнення та здійснити моделювання його роботи в програмному комплексі .
4. Розробити конструкцію манжетного ущільнення та створити стендову установку для випробування ущільнень валів.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ МАНЖЕТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ

1.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження (колінчастий вал ДВЗ)

Поняття «автомобіль» охоплює легкові, вантажні автомобілі та автобуси. Незважаючи на конструктивну різноманітність цих транспортних засобів, їх об'єднує наявність ключових систем: двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), силової несної структури з підвіскою та колесами, органів керування, а також гальмівної системи. Виробничий цикл автомобільних підприємств може включати як випуск повністю зібраних транспортних засобів, так і виготовлення їхніх окремих агрегатів — двигунів, мостів, паливної апаратури тощо, що складаються з численних вузлів і деталей.

Двигуни внутрішнього згоряння отримали свою назву завдяки тому, що хімічна енергія палива перетворюється у теплову та механічну безпосередньо всередині циліндрів. Вони класифікуються за низкою ознак:

- за способом сумішоутворення — на двигуни з зовнішнім (карбюраторні, газові) та внутрішнім (дизелі) сумішоутворенням;
- за типом робочого циклу — на двотактні та чотиритактні;
- за кількістю циліндрів — від одноциліндрових до багатociліндрових конфігурацій;
- за розташуванням циліндрів — рядні, V-подібні, опозитні;
- за типом охолодження — рідинне або повітряне;
- за видом палива — бензинові, дизельні, газові, багатопаливні.

Матеріальне виконання блоку циліндрів залежить від типу двигуна та вимог до його масо-габаритних характеристик. Для забезпечення кращого масляного утримання на дзеркало циліндрів дизельних двигунів наносять дрібну ромбоподібну насічку.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю двигунів із різними типами компонування є відмінності в кількості та конструкції головок циліндрів: для рядних двигунів вона є спільною, для V-подібних — кількість головок дорівнює числу блоків.

Конструкція кривошипно-шатунного механізму включає шатун, нижня головка якого здебільшого виконується роз'ємною у площині, перпендикулярній осі. При великих розмірах нижньої головки (як у дизелів) застосовується косий роз'єм, що полегшує монтажні операції. Маркування з'єднувальних деталей виконується з метою забезпечення правильної орієнтації під час складання — наприклад, на шатуні двигуна КамАЗ-740 вибиваються індивідуальні номери, що відповідають певному циліндру.

Колінчастий вал як основний елемент КШМ

Колінчастий вал є ключовою деталлю кривошипно-шатунного механізму, що сприймає навантаження від шатунів і перетворює зворотно-поступальний рух поршнів у обертальний. До основних конструктивних елементів колінчастого валу належать:

- **корінні шийки** — опори, що взаємодіють із корінними підшипниками у картері двигуна;
- **шатунні шийки** — елементи, через які здійснюється передача зусиль від шатунів (мають канали для подачі мастила в підшипники);
- **шоки** — сегменти, що з'єднують шатунні та корінні шийки;
- **передній кінець валу (носок)** — зона встановлення зубчастого колеса чи шківів приводу газорозподільного механізму й додаткових агрегатів;
- **задній кінець (хвостовик)** — забезпечує приєднання маховика та передавання основної частини крутного моменту;
- **противаги** — елементи балансування, що зменшують динамічні навантаження на корінні підшипники.

У сучасному двигунобудуванні найбільш поширеним матеріалом для виготовлення колінчастих валів є високоміцний чавун, що поєднує технологічність і достатню міцність. Для високонавантажених дизельних або

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужних бензинових двигунів застосовують ковані сталеві вали. Дослідні або малосерійні двигуни часто оснащують валами, виготовленими методом механічного оброблення суцільної сталеві заготовки, оскільки організація технології лиття чи кування для малої партії є економічно недоцільною.

Отримана заготовка, незалежно від способу її виготовлення, піддається подальшій механічній обробці до надання їй номінальних геометричних параметрів. Після цього деталь проходить стадію зміцнення, яка спрямована на підвищення її експлуатаційної надійності. Поверхні корінних і шатунних шийок колінчастого вала, як правило, зміцнюють шляхом термохімічної обробки, що забезпечує підвищення їх твердості та зносостійкості. Крім того, галтелі (переходи між шийками й щоками) виконують зі скругленням, оскільки це сприяє зниженню концентрації напружень та збільшенню опору втомному руйнуванню.

Колінчастий вал сприймає сумарні навантаження, що виникають під дією газових сил, які передаються від поршня під час робочого циклу, а також сил інерції зворотно-поступально рухомих мас кривошипно-шатунного механізму. У результаті дії цих сил у валу формується крутний момент, який через трансмісію передається на ведучі колеса транспортного засобу.

У сучасному двигунобудуванні колінчасті вали виготовляють переважно методом штампування з легованих конструкційних сталей або литтям із високоміцних чавунів. Готовий колінчастий вал включає сукупність елементів: корінні та шатунні шийки, противаги, задній кінець з отвором під шарикопідшипник первинного вала коробки передач та фланець для встановлення маховика, а також передній кінець, на якому монтується муфта (або храповик) ручного пуску, шестерня приводу газорозподільного механізму та шків приводу вентилятора, водяного насоса й генератора.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

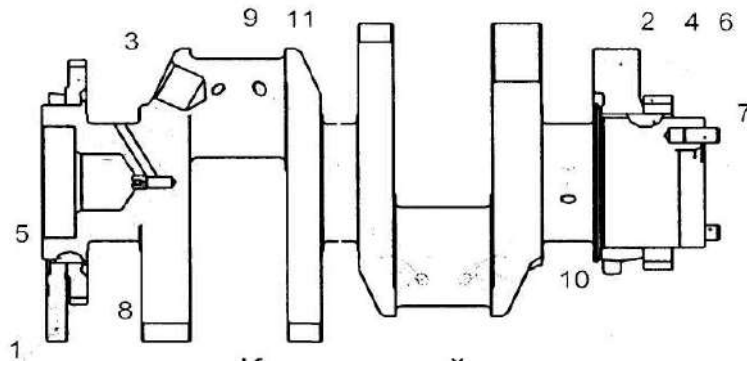


Рис. 1.1 – Колінчастий вал двигуна внутрішнього згорання

Основні дефекти та пошкодження колінчастого валу

До характерних пошкоджень, що виникають у процесі експлуатації колінчастого валу, належать:

- прогин (вигин) валу;
- зношування зовнішньої циліндричної поверхні фланця;
- збільшення торцевого биття фланця;
- знос маслоснімних (маслосгонних) канавок;
- зношування отвору під підшипник;
- збільшення діаметра або деформація отворів під болти кріплення маховика;
- знос корінних і шатунних шийок;
- зношування посадкової шийки під шестерню приводу та маточину шківів;
- руйнування або збільшення ширини шпонкової канавки;
- подовження передньої корінної шийки;
- подовження шатунних шийок.

Корекція геометричних відхилень та правка валу

Вигин колінчастого валу усувають методом механічної правки на пресовому обладнанні. Під час операції вал встановлюють на призми крайніми корінними шийками, після чого прикладають зусилля до середньої шийки, здійснюючи перегин у протилежний бік, що має приблизно у десять разів перевищувати величину вихідного прогину. Допустиме радіальне биття, яке не потребує виконання ремонтних операцій, становить **0,05 мм**.

У випадку чавунних колінчастих валів застосовують метод правки шляхом локального наклепу. Після визначення величини биття вал установлюють таким чином, щоб пошкоджена поверхня шийки була орієнтована вгору. За допомогою спеціальної оправки типу «тупого зубила», яку спрямовують у жолобник шийки, та пневматичного молотка здійснюють наклеп галтелей з перекриттям сусідніх слідів удару. У процесі операції биття контролюють індикатором годинникового типу, доводячи його до значення **0,05...0,08 мм**. Середня тривалість такої операції становить **10...15 хв**.

Прояви та причини функціональних відмов

Основною експлуатаційною ознакою дефектів колінчастого валу є характерний стукіт, що виникає під час роботи двигуна. Основні причини цього явища пов'язані з:

- недостатнім тиском або подачею мастильного матеріалу;
- перевищенням допустимих зазорів між корінними/шатунними шийками та вкладишами відповідних підшипників, що є наслідком інтенсивного зношування.

За статистичними даними, найбільш поширеною несправністю є **проворот вкладиша** з одночасним утворенням задирів на поверхні шийок валу. В умовах експлуатації легкових автомобілів частіше спостерігається поступове зношування та задирне руйнування шийки, тоді як у вантажних автомобілях (через значно вищі навантаження) вкладиш практично миттєво прилипає до шийки і провертається всередині постелі блока.

Приблизно **80 %** усіх відмов становлять проворот вкладиша та задирні пошкодження валу; решта випадків пов'язані з природним зношуванням двигуна після вичерпання ресурсу. Рідше зустрічаються нетипові («ексклюзивні») пошкодження, такі як повне руйнування (тріщина чи перелом) валу. У більшості таких випадків детальніше дослідження свідчить про наявність раніше не виявлених дефектів після попереднього ремонту.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технологічні підходи до ремонту

Основним методом відновлення працездатності колінчастого валу є шліфування шийок до ремонтного розміру з наступною перевіркою валу на наявність прогину. Методи правки, наплавлення або напилення застосовуються значно рідше — як правило, у випадках, коли інші технології вже не забезпечують відновлення. Застосування таких методів пов'язане з високим ризиком нерегламентованих руйнувань валу, зумовлених прихованими внутрішніми дефектами, виявлення яких є складною та витратною процедурою. Проведення дефектації економічно доцільне лише для деталей невеликих габаритів (близько 10×10 см); для більших деталей вартість дослідження стає порівнянною з ціною нового колінчастого валу, що робить заміну економічно вигіднішою.

1.2. Обґрунтування теми та формулювання задачі досліджень

Модернізація сучасної економіки закономірно супроводжується потребою вирішення комплексу науково-технічних завдань, спрямованих на підвищення ефективності, конкурентоспроможності та експлуатаційної надійності технічних систем, зокрема систем подвійного призначення. Особливе значення при цьому набувають матеріалознавчі аспекти, пов'язані зі створенням, удосконаленням та впровадженням технологій виготовлення нових зносостійких полімерних композиційних матеріалів, а також із науково обґрунтованим вибором їх для роботи в конкретних триботехнічних вузлах. Такий підхід забезпечує підвищення надійності та ресурсу металополімерних трибосистем, у тому числі герметизуючих пристроїв у рухомих сполуках машин і технологічного обладнання. У більшості випадків рівень надійності таких вузлів обмежується рядом чинників, серед яких:

– недостатня зносостійкість і антифрикційні властивості матеріалів, що працюють у змінних режимах тертя, за умов неповноцінного змащення або повної його відсутності;

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– нерегламентований або недостатньо обґрунтований вибір матеріалів та конструктивних рішень, які визначають загальну ефективність застосування манжетних ущільнень.

У герметизуючих системах, що використовуються в машинах різних галузей промисловості, ключову роль відіграють різні з'єднання, від працездатності яких залежить допустимий рівень робочих тисків і стабільність функціонування обладнання. Вихід з ладу вузла ущільнення знижує працездатність агрегату в цілому та істотно підвищує ризик аварійних ситуацій. Порушення герметичності призводить до погіршення технологічного процесу, зниження якості кінцевого продукту, збільшення втрат сировини та підвищення собівартості продукції.

Попри значну кількість існуючих напрацювань у сфері проектування ущільнень, у багатьох розрахунках досі не враховується низка важливих чинників, зокрема залежність модуля пружності полімерних та еластомерних матеріалів від виду й величини навантаження. У розрахунках цей модуль часто приймають як сталу величину, що не відповідає реальним умовам експлуатації. Зазначена невідповідність робить проблему вдосконалення конструкцій та методів розрахунку манжетних ущільнень актуальною як у практичному, так і в фундаментальному науковому аспектах.

Підвищення надійності є одним з основних технічних завдань сучасного автомобілебудування. Найрезультативніший шлях його вирішення це застосування високоякісних деталей у відповідальних агрегатах. Манжетні ущільнення обертових валів встановлюються в двигунах, коробках передач, роздавальних коробках, головних передачах та рульових механізмах, тобто у вузлах, вихід з ладу яких призводить до значних експлуатаційних і ремонтних витрат. Від надійності ущільнень безпосередньо залежить ресурс агрегатів, а їх раптова відмова, навіть за низької вартості самої деталі, тягне за собою складний і дорогий ремонт.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЩОДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МАНЖЕТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ

2.1. Особливості експлуатації манжетних ущільнень

Манжетні ущільнення є одним із найбільш розповсюджених елементів герметизації в сучасному машинобудуванні. Вони належать до контактних радіальних ущільнень і забезпечують герметичність у вузлах, що працюють у режимах обертального або осьового переміщення валів і штоків гідравлічних та пневматичних систем. Ефективність їх роботи визначає надійність функціонування значної частини машин та агрегатів, у тому числі обладнання з підвищеними вимогами до герметичності.

За функціональним призначенням манжети поділяють на кілька основних груп:

– **армовані манжети для ущільнення обертального руху** (у технічній практиці часто називаються *сальниками*) — рис. 2.1;

– **гідравлічні манжети** для ущільнення зворотно-поступального руху штоків гідроциліндрів — рис. 2.2;

– **пневматичні манжети**, що працюють у системах пневмоприводів — рис. 2.3.

Армовані манжети характеризуються наявністю металевого кільця-армування, що забезпечує стабільність форми та здатність до сприйняття радіального натиску. Ущільнювальна кромка такої манжети створює постійний контакт із поверхнею обертового валу, формуючи необхідний бар'єр проти витoku робочого середовища.

Гідравлічні та пневматичні манжети призначені для роботи в умовах циклічного навантаження, де ущільнювальний елемент зазнає значних деформацій під час повторного переміщення штоків. До таких ущільнень висуваються підвищені вимоги щодо еластичності, зносостійкості та стійкості до дії робочих рідин або газів.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.1. Манжети армовані для ущільнення обертального руху



Рис. 2.2. Манжети гідравлічні



Рис. 2.3. Манжети пневматичні

Торцеве механічне ущільнення (механічне торцеве ущільнення) належить до класу високонадійних контактних ущільнювальних пристроїв, які

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

застосовують в обертовому обладнанні для забезпечення герметизації валу, що передає механічну енергію робочому органу машини. Основне функціональне призначення такого типу ущільнення полягає у забезпеченні розділення двох середовищ та мінімізації витоків при інтенсивному динамічному впливі.

Основні типи торцевих механічних ущільнень

1. Одинарне торцеве ущільнення
2. Подвійне торцеве ущільнення
3. Картриджне торцеве ущільнення

У конструкції торцевого механічного ущільнення використовуються *основне* та *допоміжні (рухоме і нерухоме)* ущільнення, які безпосередньо контактують з робочим середовищем, забезпечуючи можливість проходження обертового елемента через камеру ущільнення без порушення герметичності.

Основне ущільнення являє собою пару тертя, що складається з рухомого та нерухомого кілець, виготовлених із різних матеріалів із високими антифрикційними властивостями. Для створення необхідного осьового натиску між кільцями використовують одинарну пружину, пакет пружин або пружний сильфон.

У процесі роботи на торцеві поверхні кілець діють гідравлічні сили, які при позитивному тиску ущільнюваного середовища прагнуть додатково притиснути кільця одне до одного, що призводить до зростання тепловиділення. Теоретичний статичний зазор між контактними поверхнями дорівнює сумарній висоті мікронерівностей і зазвичай не перевищує 1 мкм, що забезпечує мінімальну витрату середовища.

Допоміжні ущільнення забезпечують герметизацію стиків у зоні взаємодії корпусу, валу та основних елементів торцевого вузла.

- Нерухоме допоміжне ущільнення герметизує місце посадки нерухомого кільця в корпусі механізму та зону контакту рухомого кільця з валом.
- Рухоме допоміжне ущільнення компенсує радіальні та осьові зміщення між

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

валом і рухомим кільцем. Його робоча рухливість визначається точністю виготовлення поверхонь, торцевим биттям нерухомого кільця та дією зовнішніх сил, які прагнуть розкрити ущільнення. У більшості випадків ця рухливість не перевищує 0,2 мм.

Величина витоку через стик ущільнювальних кілець визначається статичним зазором, геометрією кілець, рівнем вібрації, режимами роботи, дією зовнішніх розкривальних сил, якістю монтажу та фізико-хімічними властивостями ущільнюваного середовища.

Завдяки таким заходам суттєво підвищується ресурс роботи вузла герметизації в умовах абразивного або хімічно агресивного середовища.

Для запобігання потраплянню забруднень у підшипникові опори та утримання мастильного матеріалу застосовують різні типи ущільнювальних пристроїв. За принципом дії їх поділяють на:

1. Контактні (манжетні та сальникові) — використовуються переважно при низьких і середніх швидкостях обертання; забезпечують герметичність завдяки безпосередньому контакту поверхонь.
2. Лабіринтні та щілинні — придатні для широкого діапазону швидкостей; їхній принцип дії ґрунтується на створенні підвищеного гідродинамічного опору витіканню мастила через систему щілин.
3. Відцентрові — застосовують при середніх і високих швидкостях; мастило відкидається відцентровими силами, що перешкоджає його витіканню із зони підшипника.
4. Комбіновані — поєднують два або більше типів ущільнень для підвищення надійності.

Манжетні ущільнення за швидкісними режимами

Манжетні ущільнення класифікують:

- Тип I — застосовується при швидкості ковзання $v \leq 20$ м/с (рис. 2.4, а).

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Тип II (із пильником) — рекомендується для роботи у середовищах із високою запиленістю при $v \leq 15 \text{ м/с}$ (рис. 2.4, б).

Наявність пильника дозволяє додатково захищати робочу кромку манжети від твердих частинок, що значно збільшує ресурс підшипникової опори в агресивних умовах.

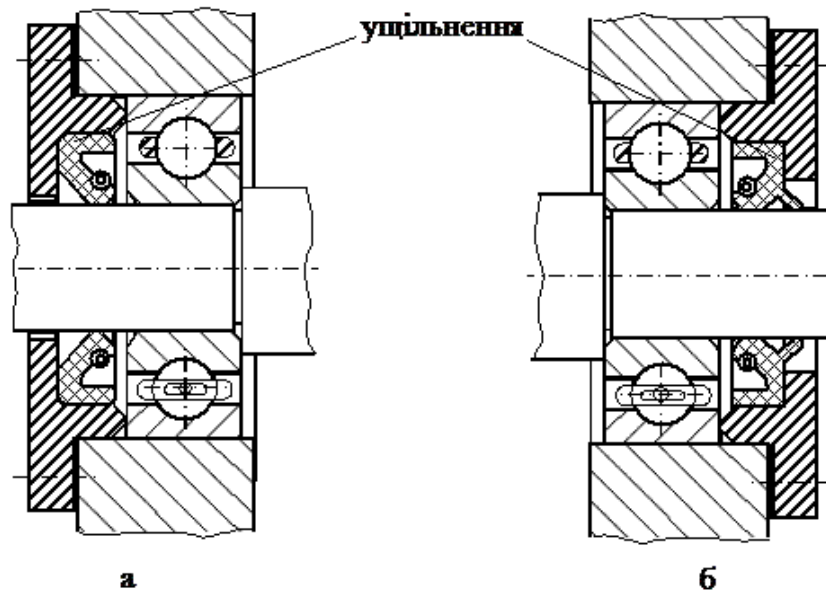


Рис. 2.4. Манжетні ущільнення

Поверхня обертового валу в зоні контакту з манжетним ущільненням повинна відповідати підвищеним вимогам щодо механічних і геометричних параметрів. Зокрема, твердість поверхневого шару має становити **HRC 40...45**, що забезпечує необхідну зносостійкість при тривалому терті. Параметр шорсткості поверхні не повинен перевищувати **Ra ≤ 0,32 мкм**, а посадочний розмір виконується в полі допуску **h11**, що гарантує стабільність контакту та мінімізацію витоків. Манжетні ущільнення здатні ефективно працювати як із пластичними мастильними матеріалами, так і з рідкими мастилами у широкому температурному діапазоні — від **-45 °C до +150 °C**.

Сальникові ущільнення, які застосовуються в менш динамічно навантажених вузлах, виготовляють переважно у вигляді кілець із фетру або повсті (рис. 2.5, а), попередньо просочених розігрітим мастильним матеріалом. Такі ущільнювальні елементи встановлюють із натягом у спеціально

виконаних кільцевих канавках кришок або корпусних деталей (рис. 2.5, б; рис. 2.5, в). Типова форма канавки наведена на рис. 2.5, г. Для забезпечення герметичності поверхня валу в зоні контакту з ущільнювальним кільцем піддається тонкому поліруванню.

Сальникові ущільнення функціонують у режимах відносно невеликих швидкостей обертання — до **5 м/с** — та можуть працювати як із рідкими мастильними матеріалами, так і з пластичними мастилами, забезпечуючи задовільну герметизацію в умовах помірних механічних навантажень.

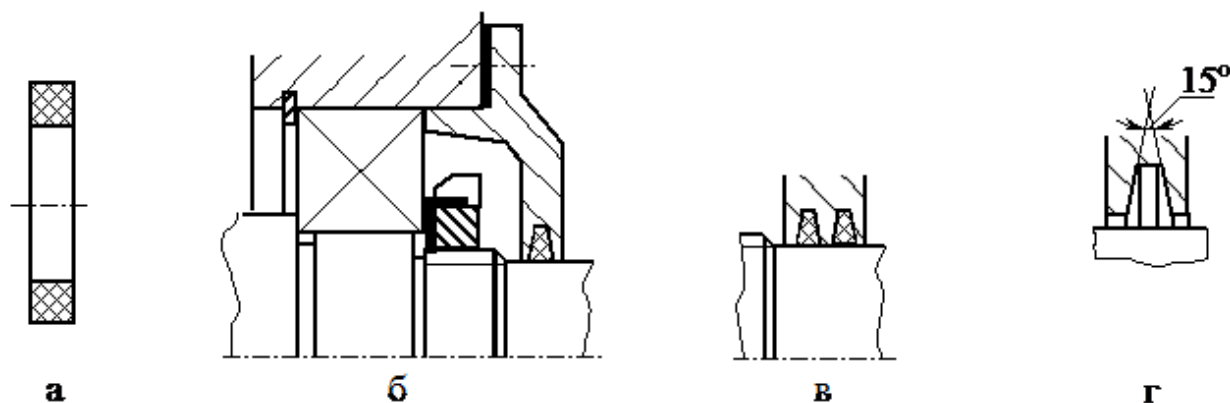


Рис. 2.5. Сальникове ущільнення

Щілинні ущільнення конструктивно виконуються у вигляді системи концентричних кільцевих щілин із спеціальними проточками (рис. 2.6). Робочий об'єм таких щілин заповнюється пластичним мастильним матеріалом, який створює додатковий гідродинамічний опір витіканню та перешкоджає потраплянню сторонніх частинок у зону підшипникової опори.

Однак ефективність захисної дії щілинних ущільнень є обмеженою, оскільки механізм герметизації базується лише на опорі середовищу в вузьких щілинах та в'язкості мастила. Тому такі ущільнювальні пристрої доцільно застосовують у підшипникових вузлах, які експлуатуються в умовах чистого, сухого та малозапиленого середовища, де відсутні інтенсивні зовнішні забруднення.

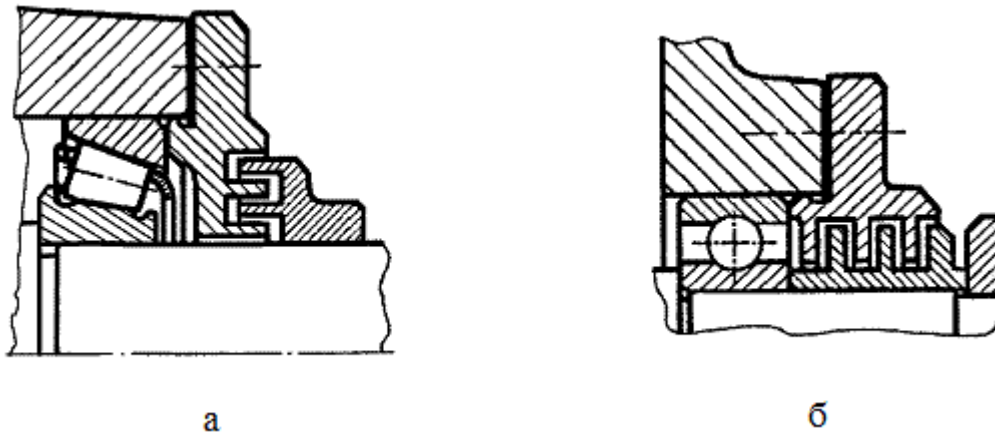


Рис. 2.7. Лабіринтне радіальне (а) та осьове (б) ущільнення

Якщо в підшипниковому вузлі використовують пластичні мастила, а у корпусі механізму — рідке мастило, виникає потреба у захисті підшипників від вимивання пластичного мастила рідким середовищем. У таких випадках застосовують маслозатримувальні кільця або шайби, які створюють бар'єр між мастильними матеріалами різної консистенції. Подібні елементи особливо ефективні у підшипникових вузлах черв'ячних та гвинтових передач, де гвинтова поверхня деталей, працюючи як гідродинамічний насос, спрямовує мастило у бік нарізки різьби та підвищує його рівень у підшипниковому вузлі вище допустимих норм, що збільшує момент опору та ускладнює роботу механізму.

2.2. Підвищення довговічності манжетних ущільнень

Експлуатаційна надійність заздалегідь визначається якістю роботи манжетних ущільнень, оскільки саме вони забезпечують виконання розділових та герметизаційних функцій у вузлах тертя механічних передач. Несвоєчасний або прискорений знос манжети часто спричиняє недопустимі витрати мастильного матеріалу, що у свою чергу може призвести до виходу з ладу всього агрегату. Особливо критичною ця проблема є для технологічного обладнання, яке працює без резервних механізмів або дублюючих систем.

Для забезпечення стабільної та гарантованої герметичності манжетні ущільнення встановлюють на вал із радіальним натягом. З метою мінімізації впливу релаксаційних процесів у гумовій основі манжети застосовують **кільцеву металеву пружину**, що охоплює робочу кромку і створює постійний радіальний тиск на вал. Однак використання такої пружини має низку суттєвих недоліків, серед яких: відсутність можливості контролю правильності з'єднання кінців пружини перед її монтажем у канавку манжети; неможливість візуальної оцінки якості встановлення манжети на вал; підвищена трудомісткість операцій з її заміни, пов'язана з необхідністю роз'єднання та повторного з'єднання пружини.

Альтернативна модель манжетного ущільнення без кільцевої пружини

Як перспективний варіант конструкції запропоновано **модель манжети без кільцевої пружини**, в якій опорне кільце та ущільнювальний поясок із робочою кромкою з'єднані між собою системою радіальних секторів змінного перерізу. Плавні переходи між цими елементами забезпечують рівномірний розподіл контактної тиску по всій охопленій поверхні. У міру зношування робочої кромки деформівні сектори компенсують втрату натягу, автоматично відновлюючи герметичність. У конструкції також передбачено **поверхневе зміцнення робочої кромки**, що формує неоднорідний розподіл фізико-механічних властивостей у перерізі: підвищену твердість зовнішнього шару при збереженні еластичності внутрішніх елементів.

Фізико-математичне моделювання та визначення параметрів контактної взаємодії

Для дослідження впливу геометричних і механічних параметрів манжетного ущільнення на характер розподілу контактної тиску по робочій кромці була розроблена **фізико-математична модель**, у якій манжета розглядається як тіло обертання конічної форми з поверхнево модифікованим шаром.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математичний апарат моделі ґрунтується на лінійній теорії пружності у варіаційній постановці задачі осесиметричного навантаження в циліндричній системі координат. Контактна задача розв’язана методом можливих переміщень у рамках лінійної теорії пружності із застосуванням **методу скінчених елементів** у матричній формі. Аналіз деформаційних процесів проводили без врахування релаксаційних ефектів і передбачав лінійні характеристики гумового матеріалу за сталого стаціонарного навантаження.

Для моделювання використовували процес пружного деформування ущільнювального елемента при монтажі на вал із радіальним натягом Δ . Використання МСЕ дозволило визначити початкову ширину зони контакту a та дослідити вплив параметрів моделі на характер зміни контактного тиску q по радіальному перетину робочої кромки. Епюри розподілу контактного тиску q для випадків постійного модуля пружності та з урахуванням зміцненого шару наведено на рис. 2.8.

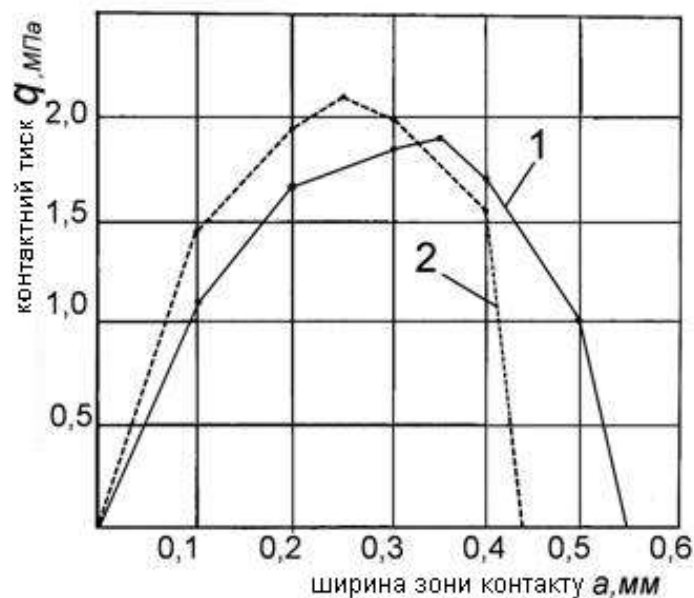


Рис. 2.8. Епюри розподілу контактної тиску q по радіальному перетину робочої кромки манжетного ущільнення
 1 — еюра контактної тиску за умови постійного модуля пружності матеріалу; 2 — еюра контактної тиску для моделі з поверхневим зміцненим шаром.

Результати числового розв'язання контактної задачі на основі методу скінченних елементів свідчать, що за однакових розрахункових параметрів максимальне значення контактного тиску у радіальному перетині робочої кромки манжетного ущільнення формується у центральній частині зони контакту. Через надзвичайно малу ширину зони контакту — не більше 0,55 мм — частина продуктів зношування гумового матеріалу видавлюється за межі реальної площі тертя у периферійну область. На поверхні взаємодії робочої кромки манжети з валом формується характерна плівка змінної товщини — так зване «третьє тіло», що складається з мастильного матеріалу, абразивних частинок, адсорбованої вологи та деградованих фрагментів гумового полімеру (рис. 2.9). Саме в цій прошарковій зоні відбуваються ключові процеси молекулярної взаємодії, що охоплюють поверхневі шари кромки на глибину лише декількох сотих часток мікрометра [3].

Під дією тривалого механічного навантаження та температурних впливів компоненти «третього тіла» інтенсивно втираються у поверхню валу, формуючи стійку кільцеву доріжку, яка складається переважно з активних продуктів зношування гумового ущільнювача. Ширина цієї доріжки зазвичай у 1,5...2 рази перевищує ширину контактної смуги a . Це пов'язано як з осьовим биттям валу у процесі зміни навантаження приводу, так і з переміщенням та втиранням компонентів «третього тіла» у металеву поверхню (рис. 2.9). Зсувний опір такого прошарку визначається міцністю окремих міжмолекулярних зв'язків і характеризується енергією активації, необхідною для їх руйнування.

Відомо, що під дією основних експлуатаційних факторів — дотичних напружень τ , окружної швидкості v та сумарного коефіцієнта тертя f — у зоні тертя формується підвищена температура T . Підвищення температури спричинює зниження фізико-механічних властивостей гумового матеріалу, зменшення модуля пружності E , що, у свою чергу, призводить до погіршення зносостійкості робочої кромки манжетного ущільнення.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При подальшому зростанні температури, у діапазоні 100–150°C, сумарний коефіцієнт тертя зменшується на близько 23 %, а межа міцності гуми падає до 40 % від початкової. Водночас результати розрахунків показують, що при температурах, які перевищують 100°C, подальше зростання сумарного коефіцієнта тертя практично не впливає на швидкість зниження механічної міцності гуми [5].

Отже, саме температура у зоні контакту є домінуючим чинником, який визначає перебіг термомеханічних процесів взаємодії сталевого валу з робочою кромкою манжетного ущільнення під час тертя ковзання.

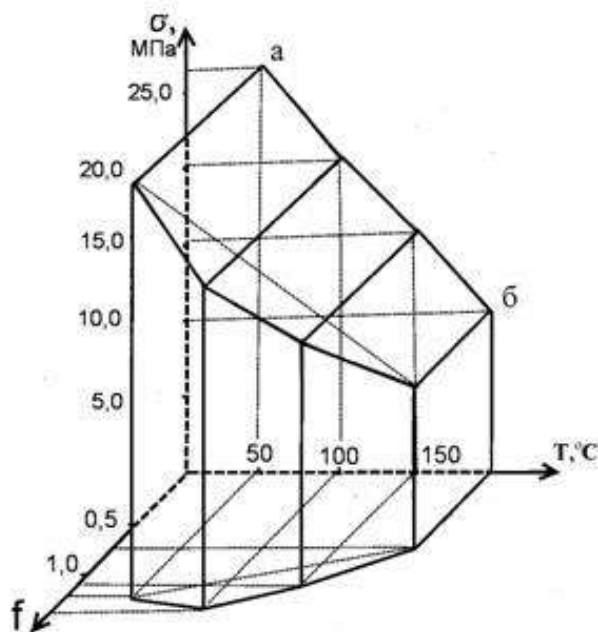


Рис. 2.10. Графіки зміни межі міцності гуми та коефіцієнта тертя залежно від температури поверхні контакту в манжетних ущільненнях обертових валів

Встановлено, що домінуючим механізмом зношування манжетних ущільнень, які працюють у контакті з обертовими валами, є втомне зношування при терті ковзання. Цей вид зносу супроводжується утворенням об'ємних втрат матеріалу робочої кромки манжети dV , що виникають під дією роботи тертя $A_{тр}$ [2].

Результати числових досліджень свідчать, що зі збільшенням статичного модуля пружності гумового матеріалу E зростає опір стиранню

робочої кромки манжетного ущільнення, позначений як β (рис. 2.11). З аналізу графіка 1 (рис. 2.11) видно, що у випадку манжети зі статичним модулем пружності $E = 3 \text{ МПа}$ при зменшенні радіального натягу від 0,8 до 0,2 мм — що є типовим для реальних умов експлуатаційного зношування — опір стиранню β змінюється від 1,7 МДж/м³ до 6,0 МДж/м³.

Суттєві зміни спостерігаються при поверхневому зміцненні робочої кромки, що проявляється у збільшенні значення статичного модуля пружності. Так:

- при підвищенні E до 14 МПа (графік 3), за аналогічного зменшення радіального натягу, опір стиранню β збільшується у 2,6 раза порівняно з базовим варіантом;

Таким чином, зростання жорсткості поверхневого шару робочої кромки манжетного ущільнення істотно підвищує її здатність протистояти втомному зносу та абразивному руйнуванню, що підтверджує ефективність поверхневого зміцнення як засобу підвищення довговічності ущільнювальних елементів.

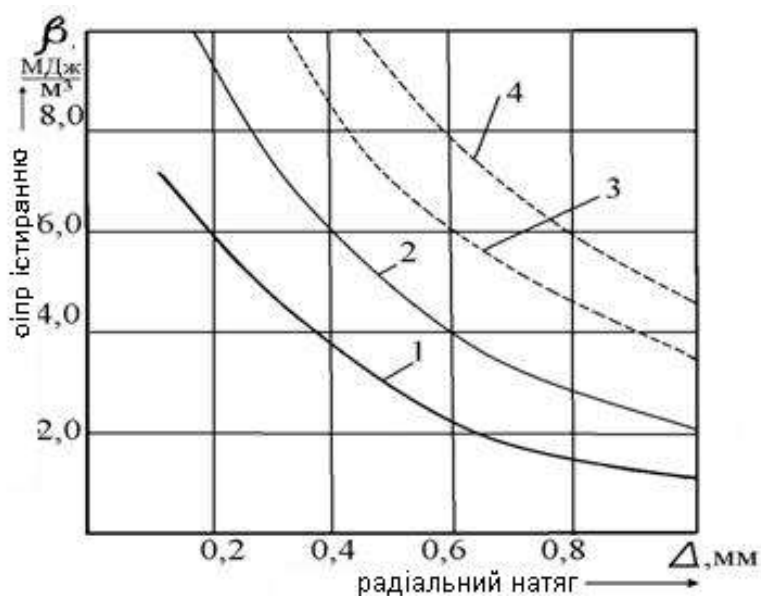


Рис. 2.11. Графіки залежності опору стирання гуми β від радіального натягу Δ та модуля пружності E

Аналіз механіки зношування робочої кромки манжетного ущільнення свідчить, що за умов кільцевого термомеханічного контакту з обертовим валом збільшення статичного модуля пружності матеріалу суттєво впливає на характер перебігу трибологічних процесів. Підвищена жорсткість сприяє стабільній та безперервній формозміні прошарку «третього тіла» у зоні контакту, зменшує кількість розривів молекулярних зв'язків і водночас інтенсифікує формування нових міжмолекулярних зв'язків — як у самому третьому тілі, так і в найбільш деформованих приповерхневих шарах робочої кромки.

У таких умовах зменшується інтенсивність механічної взаємодії деформованих структур манжетного ущільнення з поверхнею валу. Зростання статичного модуля пружності елементів, що визначають фактичну площу контакту, призводить до зниження внеску молекулярної складової у загальний коефіцієнт тертя. Одночасно мінімальний реологічний опір, сформований за участю третього тіла, забезпечує підвищення опору стиранню під час ковзання.

Результати аналізу деформованого стану кінцевих елементів моделі зі зміцненим поверхневим шаром засвідчують, що після монтажу манжети на вал із радіальним натягом фактична площа контакту формується переважно за рахунок еластичної деформації периферійних шарів матеріалу товщиною не більш ніж **0,5 мм**.

Поверхнєве зміцнення робочої кромки через збільшення модуля пружності матеріалу приводить до істотного зростання опору стиранню при ковзанні сталевго валу по гумовому ущільнювачу. Відповідно прогнозується **підвищення терміну гарантованої герметизації ущільнювального вузла у 2–4 рази порівняно з традиційними конструкціями**.

Експериментальні дослідження процесу **алмазного вигладжування** проводилися в умовах серійного виробництва під час оброблення поверхонь

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

валів двигуна під манжетне ущільнення. На рис. 2.12 представлено зовнішній вигляд обладнання та технологічну конфігурацію наладки, використаної для реалізації процесу вигладжування.

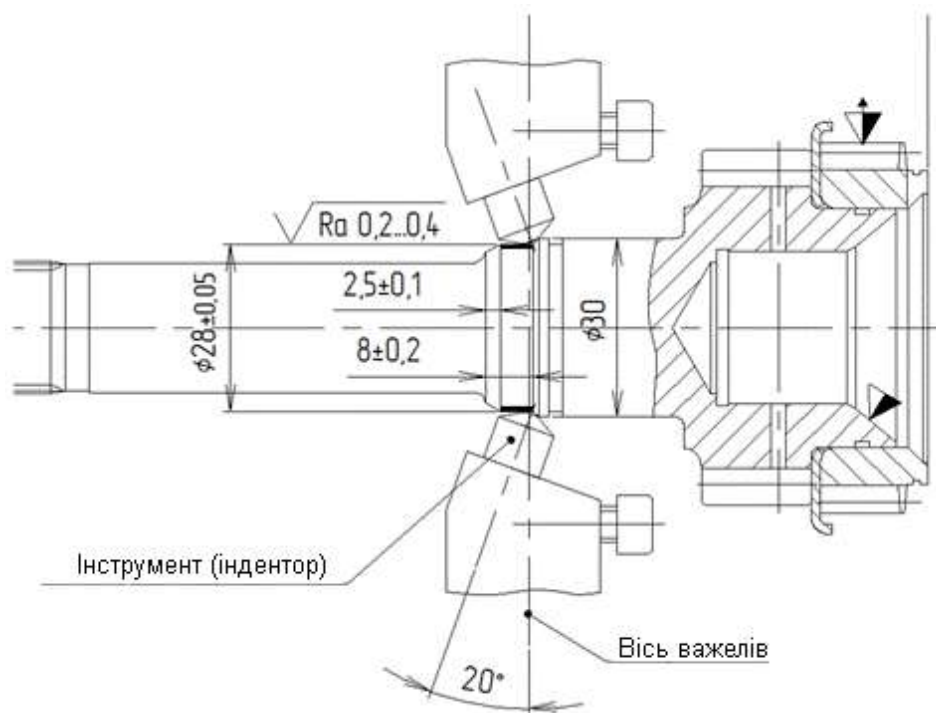


Рис. 2.12. ехнологічна наладка верстата для оброблення валу двигуна під манжетне ущільнення

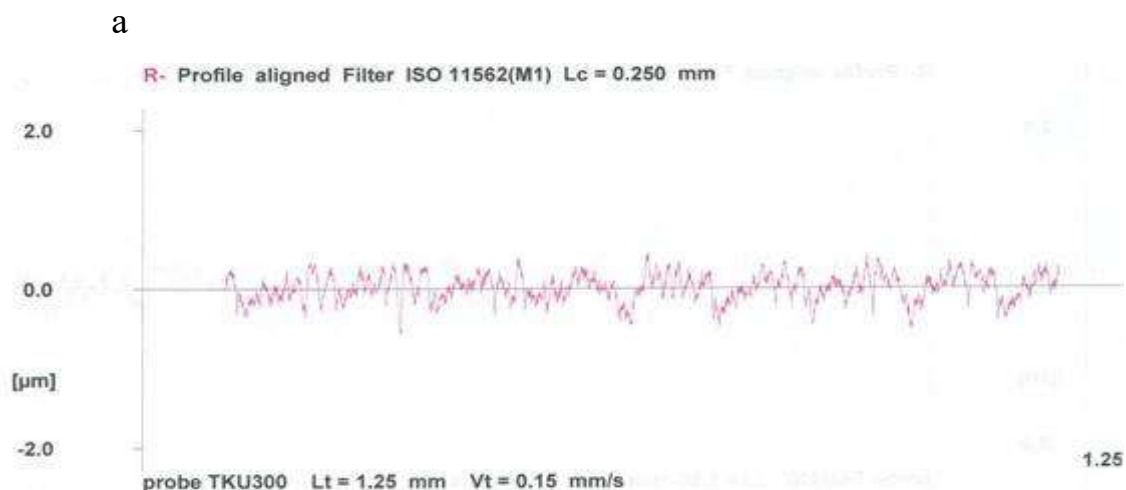
У ході теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено, що оптимальне зусилля алмазного вигладжування становить $P = 160\text{Н}$. Надалі ця величина була підтверджена в процесі налагодження обладнання під час оброблення поверхні валу, що свідчить про коректність попередніх розрахунків.

Окрім забезпечення вимог щодо шорсткості поверхні Ra , до обробленої поверхні висувається ще одне важливе технологічне обмеження: на ній не повинно залишатися слідів механічної обробки у вигляді гвинтової лінії. Таку вимогу пред'являє фірма *Freudenberg* — провідний виробник манжетних ущільнень, які працюють у парі тертя з обробленою поверхнею валу. Це обумовлено тим, що на робочій кромці манжети формується спеціальний мікрорельєф, призначений для створення гідродинамічного ефекту під час експлуатації [7]. Наявність гвинтового мікрорельєфу на валу може порушити

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

умови формування мастильної плівки, викликати підсмоктування робочого середовища або прискорити зношування ущільнення.

Кінематична схема процесу алмазного вигладжування за своєю суттю подібна до процесу точіння, що об'єктивно сприяє утворенню мікрорельєфу спірального типу. Це твердження підтверджується аналізом профілограм поверхні після вигладжування (рис. 2.13), де чітко простежуються ознаки формування гвинтової структури.



б
Рис. 2.13. Профілограми поверхні, обробленої вигладжуванням: а - R_a 0,36 мкм; б - R_a 0,14 мкм

Оброблювана циліндрична поверхня має номінальний діаметр 30 мм, причому необхідно забезпечити параметри шорсткості в діапазоні $R_a = 0,2-0,4$ мкм. На рис. 2.13 наведено профілограми поверхонь деталей, які пройшли операцію алмазного вигладжування. В одному випадку зафіксовано шорсткість $R_a = 0,36$ мкм, в іншому — $R_a = 0,14$ мкм, що навіть дещо нижче за нормативну нижню межу допуску. Водночас шорсткість поверхні після попередньої операції шліфування становила приблизно $R_a = 0,8$ мкм, тобто застосування вигладжування забезпечило зменшення шорсткості майже у п'ять разів.

Додаткове експериментальне дослідження зміни мікротвердості та шорсткості поверхневого шару деталей, оброблених шліфуванням та

вигладжуванням, показало, що мікротвердість після вигладжування збільшується приблизно на 10 %. Це свідчить про формування зміцненого поверхневого шару, зумовленого пластичним деформуванням мікронерівностей.

Таким чином, встановлено, що впровадження процесу алмазного вигладжування у серійне та масове виробництво забезпечує значно вищі показники якості поверхні — як за параметрами шорсткості, так і за величиною мікротвердості — порівняно з традиційними методами фінішної механічної обробки (наприклад, поліруванням). Важливо, що вигладжування дозволяє ефективно корегувати навіть надмірно високу шорсткість, отриману після шліфування, забезпечуючи суттєве вирівнювання мікрорельєфу [8].

У низці досліджень [2–9] підтверджено, що застосування оптоелектронних пристроїв у системах трибомоніторингу істотно підвищує чутливість, інформативність і точність розпізнавання змін параметрів вузлів машин та механізмів. У зв'язку з цим запропоновано технічні рішення, які забезпечують безперервний контроль зношування валів у вузлах із сальниковими та манжетними ущільненнями з використанням оптоелектронних датчиків.

Розглянемо оптоелектронний пристрій для безперервного вимірювання зношування валу, оснащений сальниковим ущільненням [10]. Принципова схема подібного пристрою наведена на рис. 2.14.

Конструктивно пристрій складається з корпусу 7, який має внутрішню порожнину 10 для циркуляції мастильної рідини. В середині корпусу встановлені основне 5 та допоміжне 13 сальникові ущільнення, що забезпечують відсутність витоків. З обох сторін ці ущільнення фіксуються шайбами 4, 6, 11, 14, які виконують функцію жорсткого обмеження їх положення. Тиск на сальникові ущільнення 5 та 13 регулюється притискними гайками 3 та 15, відповідно. Обидві гайки обладнані спеціальними отворами

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початком експерименту калібрується так, щоб вихідна напруга дорівнювала нулю. У процесі експлуатаційного зношування валу електричний опір ділянки K_1-K_2 збільшується, що при сталому струмі призводить до пропорційного зростання напруги. Це, у свою чергу, викликає появу сигналу на виході диференціального підсилювача.

Оптоелектронний пристрій для безперервного моніторингу зносу манжетних ущільнень

Для забезпечення тривалого моніторингу зношування та визначення моменту порушення герметичності манжетного ущільнення, а також оцінки об'єму та динаміки витoku робочої рідини, розроблено спеціалізований оптоелектронний стенд. Конструкцію цього пристрою наведено на рис. 2.15 [11].

Оптоелектронний стенд включає:

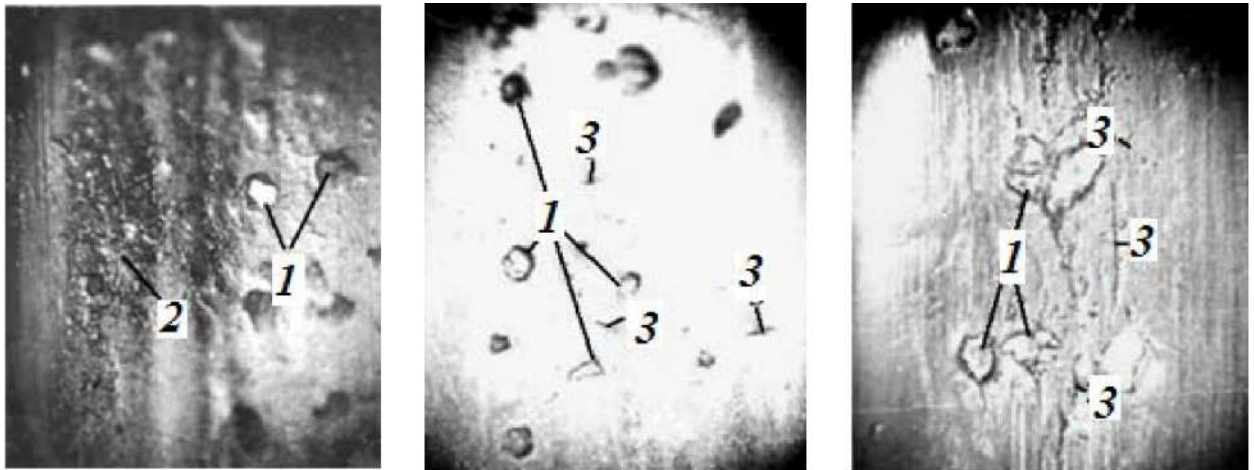
- електродвигун постійного струму 3 із регульованою частотою обертання (керованою блоком 4);
- тахогенератор 1 для контролю швидкості;
- верхню 10 та нижню 17 частини корпусу стенду;
- насос 19 з манометром 20, які через шланг високого тиску 21 з'єднані з верхньою частиною корпусу.

Корпус заповнюється робочою рідиною (маслом, водою тощо) із флуоресцентними добавками, що підвищують точність виявлення витоків. Для забезпечення герметичності на вал 9 встановлюються два манжетні ущільнення — 12 та 22.

Нижня частина корпусу 17 закріплена на силовій рамі 2. Вал 9 встановлено у підшипниках 11 і з'єднано з вихідним валом 5 електродвигуна за допомогою спеціальної фрикційної муфти 6, конструкція якої містить «кишені» для розміщення регульовальних грузиків з метою створення необхідного значення ексцентриситету. Величина ексцентриситету контролюється лазерним віброметром 29.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

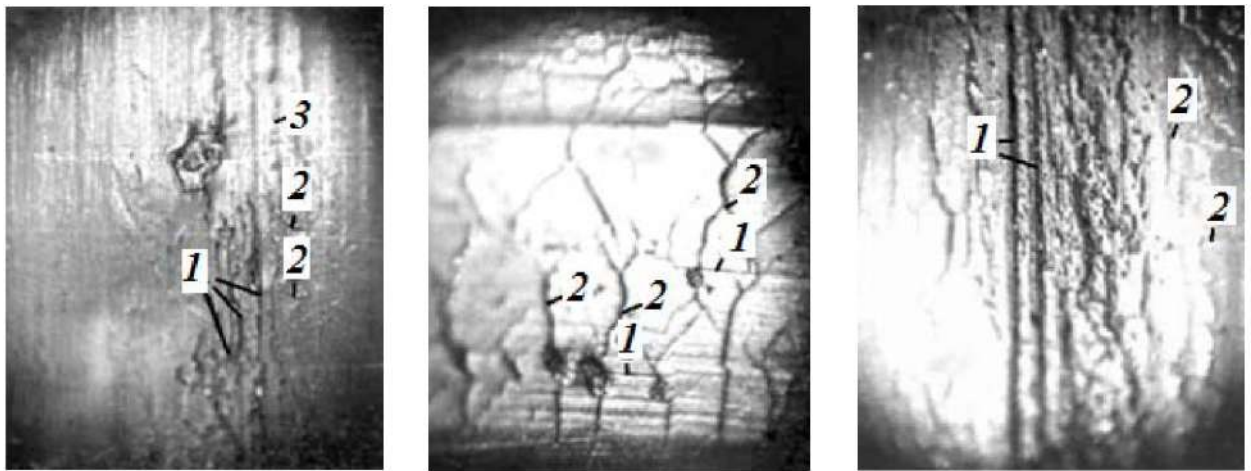
поверхнями. Поверхні після електромеханічної обробки займали проміжне положення. Паралельно з цим з'являлися тріщини, перпендикулярні до напрямку руху, що свідчить про локальне підвищення температури та перехід до режиму мастильного голодування — характерного для сполучень із торованими валами (рис. 2.17). При подальшому збільшенні часу досліджень у зонах таких тріщин виникали відшарування гуми, що призводило до втрати герметичності. У випадку шліфованих валів перпендикулярні тріщини практично не спостерігалися. Руйнування відбувалося переважно в паралельному напрямку, коли гострі вершини мікронерівностей різали робочу кромку манжети (рис. 2.17).



№ 1 № 2 № 3

Рис. 2.16. Зовнішній вигляд робочих крайок манжет при контакті з різними поверхнями після 10 годин досліджень:

1 - впроваджений абразив; 2 - наволакування гуми; 3 – тріщини, надриви;
 № 1 – алмазне вигладжування сталі 40; №2 - ЕМО сталі 40; №3 – шліфування наплавленого Св.08Г2С шару



№ 1 № 2 № 3

Рис. 2.17. Руйнування поверхні робочих крайок манжет при контакті з різними поверхнями в кінці дослідження:

1 - поздовжні тріщини; 2 - поперечні тріщини; 3 - кільцеві риски

№ 1 - алмазне вигладжування сталі 40; №2 - ЕМО сталі 40; №3 – шліфування наплавленого Св.08Г2С шару

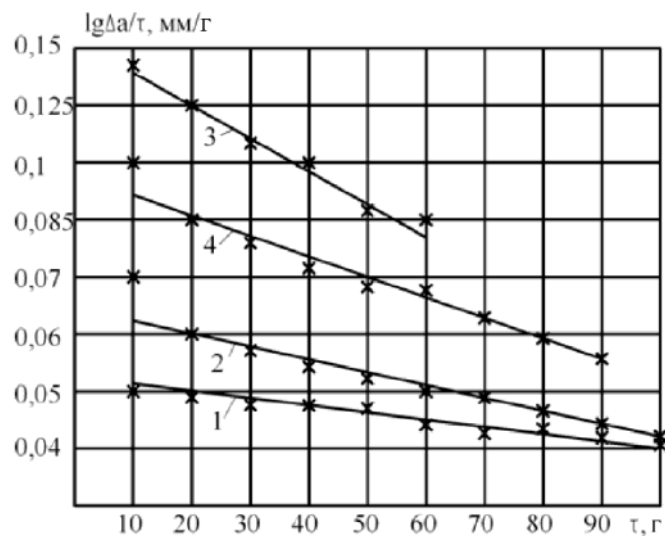


Рис. 2.18. Вплив оздоблювальних обробок валу на інтенсивність зношування робочої кромки манжети при контакті з різними типами поверхонь 1 – алмазне вигладжування сталі 40; 2 – електромеханічна обробка (ЕМО) сталі 40, 3 – шліфування наплавленого шару Св08Г2С; 4 – ЕМО наплавленого шару Св08Г2С.

У манжетних ущільнень, що працювали в контактi з поверхнями після ЕМО, спостерігалися одночасно кільцеві риси та тріщини, орієнтовані перпендикулярно до напрямку відносного руху. Одночасно на робочій кромці манжет реєструвалися сліди наволокнення (прилипання) гумового матеріалу, аналогічні тим, що проявлялися при контактi з торованими поверхнями. Водночас такі сліди повністю відсутні під час роботи зі шліфованими валами, що підтверджує різну природу трибологічної взаємодії у кожному з випадків.

Незважаючи на наявність наволокнення при ЕМО та торованих поверхнях, найбільша інтенсивність зношування робочої кромки манжети спостерігається саме при контактi зі шліфованими поверхнями (рис. 2.18). Це пояснюється тим, що мікрорельєф після шліфування має множину гострих вершин, які в процесі обертання вала діють як мікрорізці. Вони циклічно прорізають еластомер, прискорюючи руйнування приповерхневих шарів та полегшуючи відокремлення дрібних фрагментів матеріалу робочої кромки. Така *різальна дія мікронерівностей* є головною причиною інтенсивного зношування.

Після завершення стадії припрацювання інтенсивність зносу манжет, що працюють у парі з поверхнями після алмазного вигладжування та електромеханічної обробки, дещо збільшується (рис. 2.19, 2.20). Це пов'язано зі стабілізацією умов контакту, розвитком приповерхневих мікродеформацій та частковим вичерпанням початкової адаптаційної здатності матеріалу манжети.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

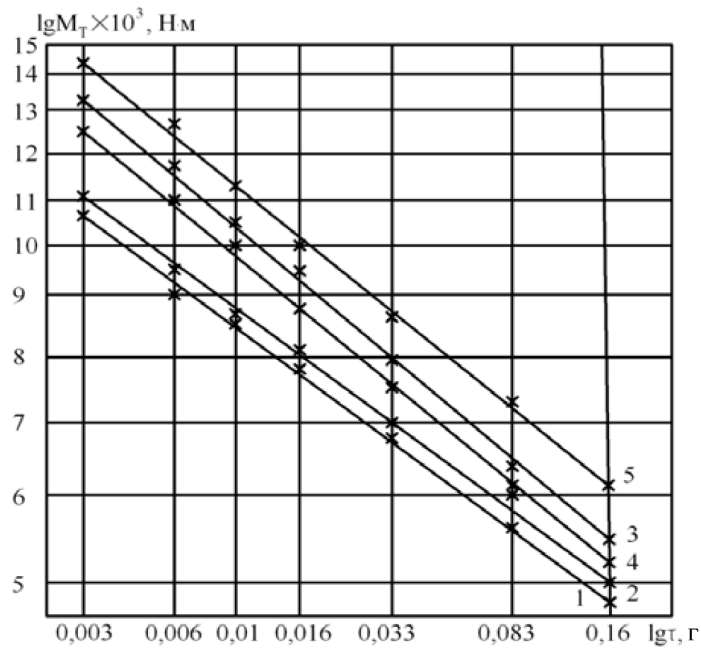


Рис. 2.19. Вплив оздоблювальних операцій валу на зміну моменту тертя герметичних сполучень: 1 - алмазне вигладжування валів зі сталі 40; 2 - ЕМО валів зі сталі 40; 3 - шліфування наплавлених Св.08Г2С валів; 4 - ЕМО наплавлених Св.08Г2С валів; 5 - шліфування валів зі сталі 40; 1, 2, 3, 4 - при наявності мастила Літол-24; 5 - мастило ТАп-15В

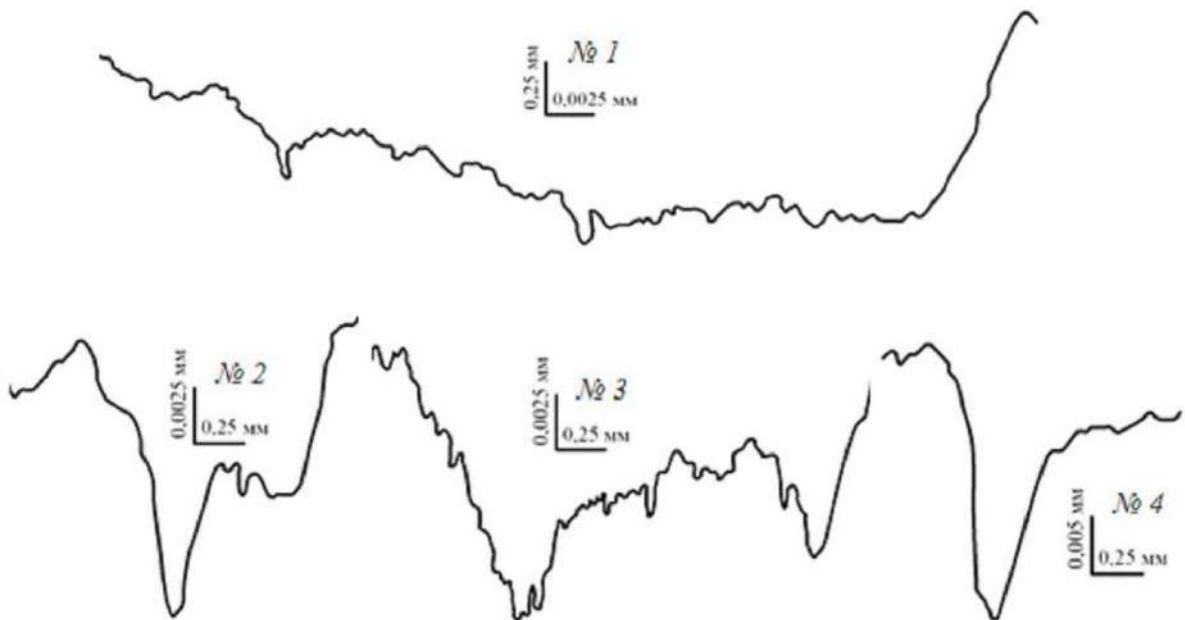


Рис. 2.20. Канавка зносу поверхні валів в герметичних сполученнях

Підвищена інтенсивність зношування робочої кромки манжети після ЕМО та алмазного вигладжування зумовлена зменшенням радіусів вершин мікронерівностей, що виникає внаслідок наявності абразивних частинок у зоні контакту. Для зміцнених поверхонь це спричиняє формування локальних зон з підвищеним контактним тиском, а також нерівномірність паска зношування на загартованій поверхні валу після ЕМО. Такі особливості мікрорельєфу посилюють механічний вплив на гумовий матеріал манжети, активізують процеси руйнування еластомеру та сприяють подальшому відокремленню деформованих частинок гуми.

У процесі тривалої взаємодії гума–метал на поверхні валу формується кільцева доріжка зношування, геометричні параметри якої визначаються типом фінішної обробки, характером зміцнення поверхні та наявністю абразивних включень. Як зазначалося вище, домінуючим механізмом руйнування поверхні валу в рухомих герметичних сполученнях є абразивний знос. На незагартованих валах зношування починається одночасно на всій ширині контакту з робочою кромкою манжети, тоді як на загартованих поверхнях або поверхнях із нерівномірною твердістю руйнування концентрується на порівняно вузькій ділянці (рис. 2.20). Інтенсивні глибокі дефекти на загартованих поверхнях пов'язані переважно з дряпанням валу твердими частинками абразиву, які зазвичай впроваджуються в матеріал манжети в процесі роботи вузла.

Застосування алмазного вигладжування забезпечує формування мікрорельєфу з більшими радіусами округлення вершин мікронерівностей як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках, що є суттєвою перевагою порівняно зі шліфуванням та ЕМО. Такі геометричні характеристики поверхні значно знижують теплонапруженість, зменшують момент тертя в герметичних стиках і, відповідно, підвищують їх експлуатаційний ресурс та надійність.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ВИПРОБУВАННЯ МАНЖЕТНИХ УЩІЛЬНЕНЬ НА НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

3.1. Моделювання зношування манжетного ущільнення для обертових валів

Манжетні ущільнення з еластомерних матеріалів, що застосовуються у вузлах з обертальним рухом валу, встановлюються на посадочну поверхню з радіальним натягом. За таких умов робоча кромка разом із прилеглими деформівними елементами ущільнення зазнає складних напружено-деформаційних впливів. Найбільш інтенсивним навантаженням піддаються периферійні ділянки робочої кромки, де формується кільцеве розтягування.

У режимах лінійної деформації при контакті з валом відбувається часткова орієнтація макромолекулярних ланцюгів у поверхневому шарі гуми, яка проте не призводить до його зміцнення. Відомо, що підвищення модуля пружності еластомерних матеріалів прямо корелює зі збільшенням їхньої зносостійкості [1].

З метою дослідження процесів зношування манжетного ущільнення з поверхневим зміцненням була розроблена фізико-математична модель, у якій манжета розглядається як обертальне тіло конічної геометрії, навантажене осесиметрично у циліндричній системі координат (рис. 3.1). Геометрія моделі дискретизувалася трикутними скінченними елементами, координати вершин яких заносились до глобальної матриці з урахуванням коефіцієнтів масштабування. Товщина зміцненого поверхневого шару визначалася величиною $h = 0,3$ мм, а внутрішні елементи моделі забезпечували достатню еластичність (рис. 3.1, б). Таким чином, модель характеризується неоднорідними фізико-механічними властивостями по перерізу, що відображає реальний стан поверхнево модифікованої манжети.

На основі цієї моделі створено спеціалізоване багатофункціональне програмне забезпечення «*Mangeta*», яке дозволяє працювати як із постійним

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

достовірністю оцінити закономірності зношування робочої кромки. Вхідні параметри моделі задавалися в діапазонах, що відповідають типовому ресурсу експлуатації манжети — приблизно 3000 годин роботи за умов постійної температури та відсутності надлишкового тиску ущільнюваного середовища. Аналіз результатів, отриманих за допомогою методу скінченних елементів, засвідчив, що при обертанні валу дотичні напруження τ у зоні контакту робочої кромки розподіляються відповідно до нормального закону, який описується залежністю:

$$\tau = a \cdot f \cdot E^{0,63} \cdot e^{-1,7\alpha x},$$

де a, f, α — емпіричні коефіцієнти [3].

За допомогою спеціально розробленої програми була також розв’язана зворотна задача, яка дозволила визначати необхідний статичний модуль пружності E для забезпечення нормативної герметизації ущільнення за заданих значень дотичного напруження τ і радіального натягу Δ .

На початковій стадії роботи ущільнення τ набуває максимальних значень, після чого поступово зменшується внаслідок зносу робочої кромки.

Підвищення статичного модуля пружності гумового матеріалу E у сталих умовах тертя приводить до істотного зниження швидкості зношування (рис. 3.2, графік 1). Однак збільшення E спричиняє небажане підвищення загальної жорсткості манжети та зниження її еластичності, що може негативно позначитися на герметизаційній здатності. За таких умов найбільш ефективними виявляються ущільнення з поверхневим зміцненням, які поєднують високу зносостійкість поверхневого шару з еластичністю внутрішнього об’єму [4].

Зменшення цього параметра впливає на стабільність і рівномірність формування «третього тіла» на поверхні тертя, знижує кількість розривів молекулярних зв’язків і сприяє утворенню нових міжмолекулярних структур як у третьому тілі, так і в приповерхневій зоні робочої кромки. Це, в свою

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чергу, зменшує інтенсивність механічної взаємодії деформованих елементів манжети з валом.

Зменшення відносного зближення контактуючих поверхонь веде до зниження молекулярної складової коефіцієнта тертя, а мінімальний реологічний опір, забезпечений присутністю третього тіла, сприяє зменшенню узагальненого коефіцієнта тертя та підвищенню довговічності ущільнення.

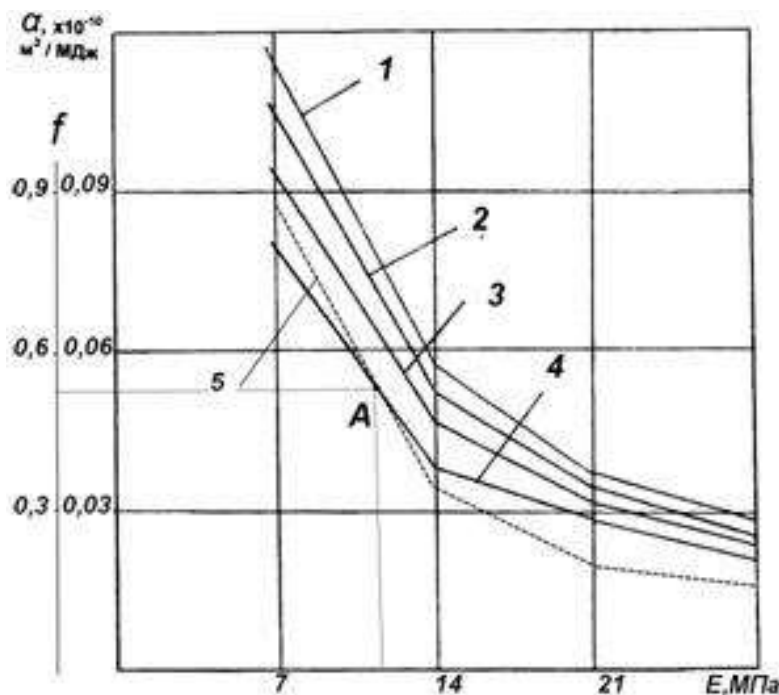


Рис. 3.2. Графіки зміни показника зносу робочої кромки манжетного ущільнення і коефіцієнта тертя в залежності від величини статичного модуля пружності

Аналіз зміни симплексу

$$\beta_1 = \frac{\Delta}{a},$$

який характеризує співвідношення радіального натягу до ширини контактної смуги, свідчить, що обидва параметри мають часову залежність, обумовлену тривалістю експлуатації t . На початковому етапі роботи ущільнення β_1 досягає максимального значення, оскільки Δ є найбільшим, а a — мінімальним. У процесі роботи ущільнення та поступового зношування

робочої кромки величина β_1 монотонно зменшується. Для цієї моделі встановлено емпіричний зв'язок:

$$a = 0,25 \cdot \Delta^{-0,8},$$

що підтверджує наявність слабкого оберненого кореляційного зв'язку між зазначеними параметрами.

Кореляційний аналіз також продемонстрував, що симплекс β_2 і швидкість ковзання v в досліджуваному діапазоні значень мають незначний вплив на зміну інтенсивності зношення робочої кромки.

На рис. 3.2 наведено графічне представлення залежностей показника зносу від величини статичного модуля пружності гуми. Графік 1 ілюструє поведінку ущільнень без поверхневого зміцнення, коли $E_0 = const$. У всіх розглянутих режимах простежується чітка тенденція: збільшення статичного модуля пружності призводить до істотного зменшення інтенсивності зношування. Зокрема, при зростанні E_0 у 4 рази показник зносу зменшується майже пропорційно.

Найбільш інтенсивне зниження зносу спостерігається при зміні E_0 у межах 7–14 МПа. У цих умовах відбувається різке зменшення величини симплексу, що забезпечує покращення формування третього тіла та зменшення термомеханічних руйнувань поверхні контакту. За межами цього діапазону зростання модуля пружності дає помітно менший ефект.

Використання моделі з поверхневим зміцненням демонструє суттєве покращення показників зносостійкості у всьому діапазоні зміни E_0 . За товщини зміцненого шару до 0,3 мм інтенсивність зношування зменшується приблизно на 30 % (графік 4). При зменшенні товщини зміцненого шару до 0,1–0,2 мм знос зменшується вже лише приблизно на 20 % (графіки 2 та 3). При $E_i > 14$ МПа темп зниження зносу незначно сповільнюється.

3.2. Дослідження зносостійкості ущільнення валу

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Манжетні ущільнення широко застосовуються у приводних системах технологічного обладнання, забезпечуючи герметизацію валів у різних агрегатах. Проте їхній передчасний знос є однією з основних причин виникнення неприпустимих витоків мастильного матеріалу, що може призвести до виходу з ладу всього вузла або навіть агрегату в цілому. Втрата герметичності ущільнення супроводжується погіршенням технічного стану механізму, підвищенням ризику аварійних ситуацій та необхідністю виконання нерегламентованих ремонтних впливів (рис. 3.3). Такі ситуації особливо критичні для об'єктів, які експлуатуються без резервних механізмів.

Втрати часу через ремонтні простоя та зниження техніко-економічних показників транспортних або технологічних систем підкреслюють актуальність досліджень, спрямованих на підвищення довговічності та надійності манжетних ущільнень.



Рис. 3.3. Фрагменти розгерметизації вузлів ущільнення в приводах двигуна

Відомо, що специфіка технологічного виготовлення манжетних ущільнень зумовлює формування хвилястого профілю їхньої робочої кромки. Цей мікрорельєф визначається висотою геометричних нерівностей δ_1 , тоді як неточності, що виникають у процесах складання та встановлення елементів ущільнювального вузла, характеризуються величиною радіального биття δ_2 . Сумарний вплив цих факторів формує інтегральну похибку

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_2,$$

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

яку в подальшому приймають як розрахунковий ексцентриситет у трибосистемі «вал – манжетне ущільнення».

Для забезпечення гарантованої герметизації вузла ущільнення манжетні елементи встановлюються на вал із радіальним натягом Δ . За таких умов робоча кромка разом з прилеглими деформівними ділянками ущільнення зазнає складних напружено-деформованих станів. Периферійні сегменти кромки, що здійснюють безпосередній контакт з поверхнею вала, перебувають у стані кільцевого розтягнення. Під дією осевого монтажного зусилля хвилястий мікрорельєф кромки розтягується, і для забезпечення стабільного прилягання необхідно, щоб натяг Δ перевищував висоту нерівностей δ_1 .

У межах лінійної деформації, що відповідає нормальним умовам роботи ущільнення, ізотропна структура гуми зазнає лише незначної орієнтації молекулярних зв'язків. Значення цього параметра значно перевищує аналогічні величини для підшипників ковзання чи кулачкових механізмів, що істотно впливає на адгезійну складову загального коефіцієнта тертя.

У початковий період експлуатації, коли $\Delta = \max$, величина відносного зближення також максимальна, що супроводжується підвищеним зносом кромки — так званім режимом припрацювання. Оскільки цей режим характеризується нестабільністю триботехнічних параметрів, його не враховували в розрахунковій моделі; аналіз проводився для стаціонарного рівноважного стану, який найбільш адекватно відтворює реальні умови зношування.

Під час обертання вала на поверхні контакту виникають дотичні напруження τ , які є основним чинником абразивно-адгезійного зносу. Ексцентриситет δ_2 спричинює вимушені коливання елементів манжетного ущільнення з частотою, що дорівнює частоті обертання вала. Накладання змінних дотичних напружень на циклічні деформації розтягу в зоні контакту приводить до періодичного накопичення втомних пошкоджень матеріалу.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Внаслідок цього у гумі руйнуються не лише вуглеводневі ланцюги каучуку, але й поперечні міжмолекулярні зв'язки, утворені вулканізаційними компонентами. Часткове руйнування вулканізаційної сітки є визначальною причиною прискореного зношування робочої кромки.

Характерною ознакою такого механізму є поява гладкої, полірованої поверхні зносу, що підтверджує фрикційну природу втомного руйнування у режимі ковзання по гладкій сталевій поверхні вала (рис. 3.4).

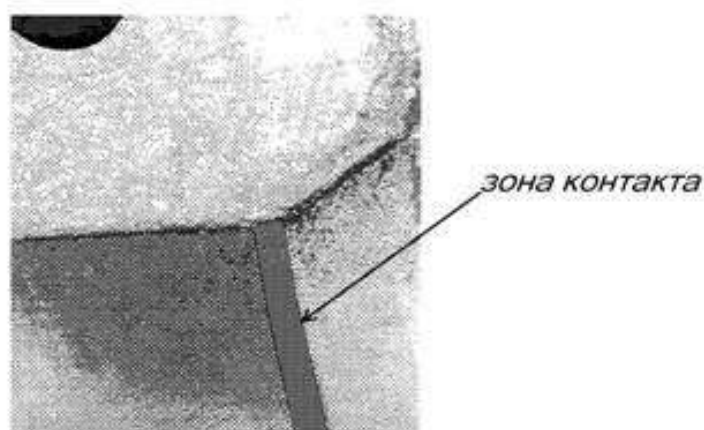


Рис. 3.4. Радіальний розріз зношеного манжетного ущільнення

Дослідження зносостійкості манжетних ущільнень здійснювалися із застосуванням методів фізико-математичного моделювання. У рамках розробленої концепції манжетне ущільнення представлено у вигляді тіла обертання складної кінчної конфігурації, на яке діє осесиметричне навантаження в циліндричній системі координат. На основі зазначеної геометричної та фізичної моделі створено спеціалізований програмний комплекс «Mangeta», що дозволяє виконувати детальну імітацію деформування гумового елемента під час його монтажу на вал, а також процесу тертя робочої кромки по його поверхні.

У програмі реалізовано чисельне розв'язання системи визначальних рівнянь лінійної теорії пружності у варіаційному формулюванні. Контактна задача формувалася на основі принципу можливих переміщень і

розв'язувалася методом кінцевих елементів у матричному поданні. Використання процедур лінеаризації та апроксимації дозволило забезпечити стійке чисельне рішення і коректне відтворення напружено-деформованого стану при моделюванні процесу зношування. Частина отриманих результатів опублікована авторами у відповідній науковій праці [1].

Наявність ексцентриситету у вузлі ущільнення призводить до виникнення змінних за величиною дотичних напружень τ . В умовах гармонійного навантаження їх величину визначали за максимальною амплітудою синусоїдальної деформації. У поверхневих шарах робочої кромки формувався складний напружено-деформований стан, зумовлений дією як нормальних, так і тангенціальних сил. Механізм зношування гумового матеріалу має втомний характер, що пов'язано з дискретною природою трибоконтакту: елемент робочої кромки багаторазово входить у взаємодію з поверхнею вала, проходячи циклічні стадії деформації та часткового руйнування. Це в підсумку спричинює відділення частинок матеріалу.

У рамках математичної моделі багатокомпонентний напружений стан приводився до еквівалентного одноосьового, що значно спрощувало аналіз без втрати адекватності опису процесу зношування.

Комп'ютерне моделювання режимів роботи ущільнювального вузла дало можливість визначити вплив радіального натягу на характер зміни дотичних напружень і обчислити граничне число циклів втомного фрикційного руйнування кромки манжети за умови обертання вала з визначеним ексцентриситетом. Кореляційний аналіз показав наявність стійкого зворотного зв'язку між радіальним натягом та допустимим числом циклів (коефіцієнт кореляції $r = 0,82$), що узгоджується з фізичною природою процесу втомного руйнування.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

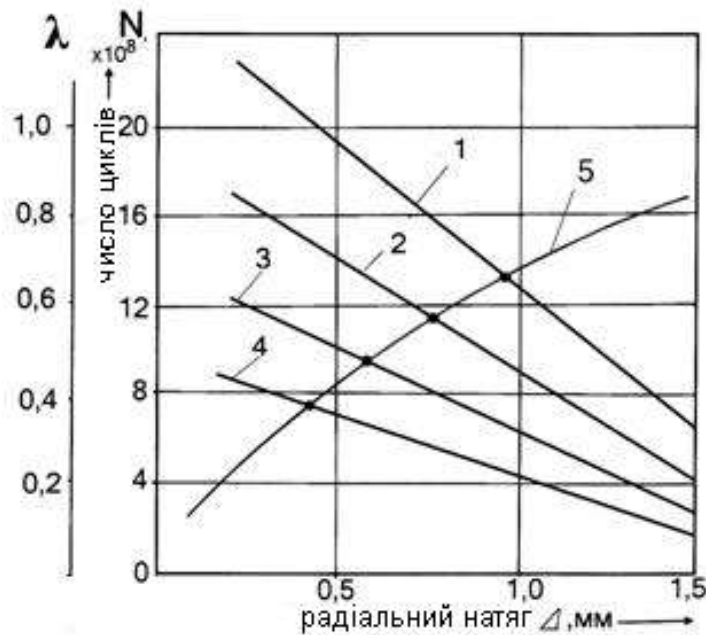


Рис. 3.5. Графіки залежності числа циклів втомного фрикційного зносу робочої кромки манжетного ущільнення від величини радіального натягу при різних величині ексцентриситету

Результати фізико-математичного моделювання процесів втомного зношування робочої кромки манжетного ущільнення засвідчують, що збільшення величини радіального натягу неминуче супроводжується зростанням контактного тиску та дотичних напружень у зоні тертя. З одного боку, це сприяє формуванню стабільного замикання ущільнювальної пари та підвищує рівень герметизації, а з іншого — істотно скорочує ресурс манжети через інтенсифікацію втомного фрикційного руйнування.

3.3. Експериментальні дослідження технічного стану манжетного ущільнення

Ресурс манжетних ущільнень визначається дією навантажувальних, швидкісних та теплових режимів експлуатації. Залежно від характеру використання агрегату, довговічність може оцінюватися або в кілометрах пробігу транспортного засобу, або в годинах роботи відповідного механізму. Для транспортних систем основним фактором є фрикційне зношування вузла,

тоді як для стаціонарного технологічного обладнання вирішальними є процеси релаксації та старіння гумового матеріалу.

Гума — це сітчастий полімерний матеріал, властивості якого формуються внаслідок вулканізації суміші каучуку, вулканізуючих агентів, пластифікаторів і наповнювачів. У ході вулканізації між макромолекулами каучуку утворюються поперечні хімічні зв'язки, результатом чого є тривимірна просторово-зорована структура. Ланцюгові ділянки між вузлами зшивання зберігають рухливість і забезпечують здатність до значних зворотних деформацій.

У високоеластичному стані гума проявляє властивості як твердих, так і в'язких матеріалів. Деформаційний процес має часову природу: від моменту прикладення навантаження до встановлення рівноважного стану проходить певний інтервал часу. Такі явища відносяться до релаксаційних процесів, зумовлених тепловим переміщенням сегментів макромолекул.

У більшості манжетних ущільнень робочий режим відповідає умовам постійної деформації, у межах яких відбувається поступове зниження напруги до рівноважного значення. Швидкість накопичення залишкової деформації характеризується параметром відносної залишкової деформації H . Температурний режим суттєво впливає на ці процеси: підвищення температури різко активізує хімічну релаксацію, прискорює старіння матеріалу та скорочує ресурс ущільнення.

У процесі роботи спостерігається зношування не лише робочої кромки манжети, але й поверхні вала. Для опису цього явища було складено диференціальне рівняння швидкості зношування, прийнявши додаткове припущення про лінійний характер зниження контактного тиску зі збільшенням глибини зношеної зони.

Для верифікації моделі зібрано статистичний матеріал, на основі якого побудовано залежність величини зносу поверхні вала під манжетне ущільнення від напрацювання (рис. 3.6). Графік підтверджує адекватність

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модельних припущень щодо закономірностей зметричного й фрикційного руйнування поверхонь.

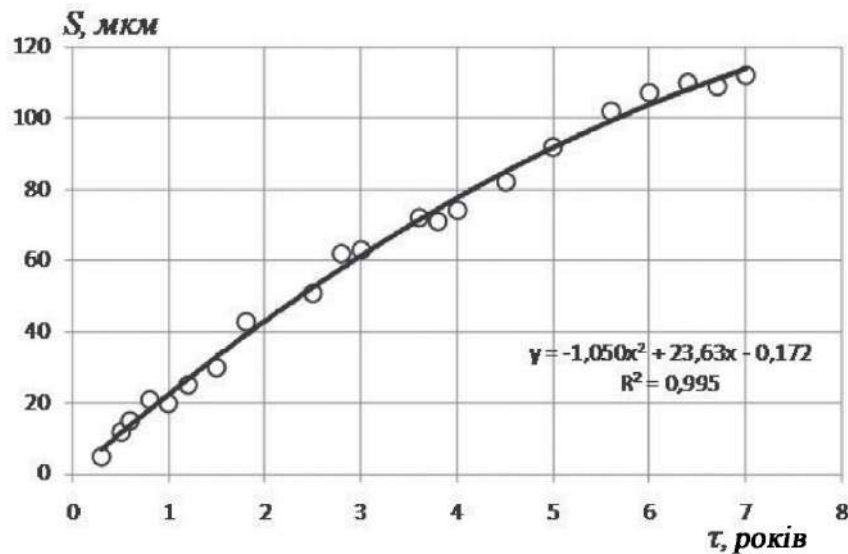


Рис. 3.6. Залежність зносу поверхні вала під манжетне ущільнення від напрацювання

Аналіз побудованої залежності свідчить, що зі зростанням напрацювання інтенсивність зношування манжетного ущільнення поступово знижується, що відповідає закономірностям фрикційного припрацювання та стабілізації контактної взаємодії. За умов експлуатації автомобільної техніки доцільно використовувати величину пробігу як інтегральний показник напрацювання, який найбільш повно відображає сумарний режим роботи ущільнювального вузла.

Для більшості типів технічних систем допустимий рівень витoku робочої рідини не повинен перевищувати $0,5 \text{ см}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ [2]. Використання цього нормативного значення дає можливість оцінити та прогнозувати залишковий ресурс манжетного ущільнення в умовах реальної експлуатації.

Якщо прийняти умовний ресурс ущільнення в режимі зберігання (тобто при відсутності обертання вала та нагріву) за 100 %, то під час роботи агрегату тривалість ефективної служби зменшується внаслідок температурного впливу та механічного зношування. У конкретних кліматичних умовах середню

температуру роботи ущільнення можна визначити з урахуванням інтенсивності використання автомобіля.

У режимі зберігання, коли двигун вимкнений, частка активного часу дорівнює нулю, а температура ущільнення наближається до температури навколишнього середовища.

У таблиці 3.1 наведено розрахункові значення частки часу роботи двигуна та відповідної середньої температури зони ущільнення залежно від середньодобового пробігу транспортного засобу.

I_{cc}	0	50	200	250	200	250	300	400	500	2000
d	0	0.052	0.204	0.256	0.208	0.26	0.323	0.426	0.522	0.83
t_y	20	27.3	30.4	35.6	40.8	46	52.3	62.7	72.2	203.4
H'	0.35	0.4	0.53	0.7	0.8	2.0	2.2	2.5	2.75	3.5
τ	200	87.5	66	50	43.8	35	29	23	20	20

У таблиці 3.1 подано розрахункові значення основних параметрів роботи манжетного ущільнення залежно від інтенсивності експлуатації автомобіля. Узагальнені характеристики враховують як температурні умови, так і частку часу, протягом якого ущільнення працює у напруженому стані, що дозволяє оцінити зміну його технічного стану та прогнозувати втрату герметичності.

Для встановлення взаємозв'язку між ресурсом ущільнень за різних режимів експлуатації були використані результати дослідження [1], присвячені кінетиці накопичення залишкової деформації гумових матеріалів при різних температурах. Графічне подання цих залежностей наведено на рис. 3.7. Отримані дані дозволяють скорегувати оцінку працездатності ущільнювального елемента, виходячи з того, що підвищення температури значно прискорює процеси старіння та релаксації напружень, які є критичними для гумових манжет.

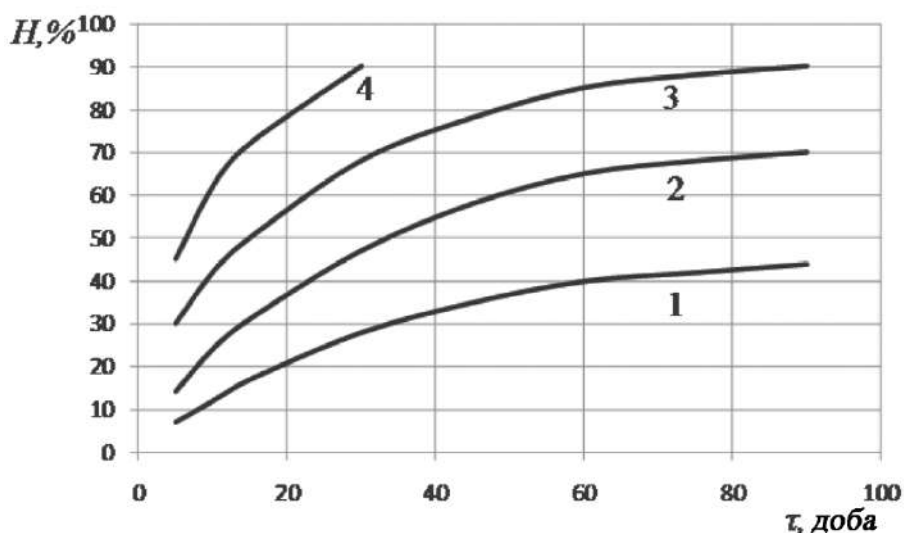


Рис. 3.7. Кінетика накопичення гумою залишкової деформації при різних температурах: 1 - 50 °C; 2 - 70 °C; 3 - 90 °C; 4 - 110 °C

На основі експериментальних даних, наведених у [1], було побудовано залежність середнього темпу старіння гумового матеріалу — тобто швидкості накопичення залишкової деформації — від температури (рис. 3.8). Використавши поліноміальну апроксимацію другого ступеня, визначено орієнтовне значення темпу старіння при температурі 20 °C, яке було обрано за еталонне. З огляду на те, що ресурс манжетного ущільнення є величиною, обернено пропорційною темпу старіння, функціональна залежність працездатності ущільнення від температури має спадний характер. Інакше кажучи, зі збільшенням температури темп деградаційних процесів зростає, а відносний ресурс ущільнення відповідно зменшується. Для оцінювання ресурсу ущільнювальних елементів при проміжних значеннях середньодобового пробігу транспортних засобів доцільно користуватися графічними залежностями, наведеними на рис. 3.9. Ці діаграми дозволяють виконувати коректне уточнення прогнозованого ресурсу з урахуванням фактичних умов експлуатації та змінної температури робочої зони ущільнення.

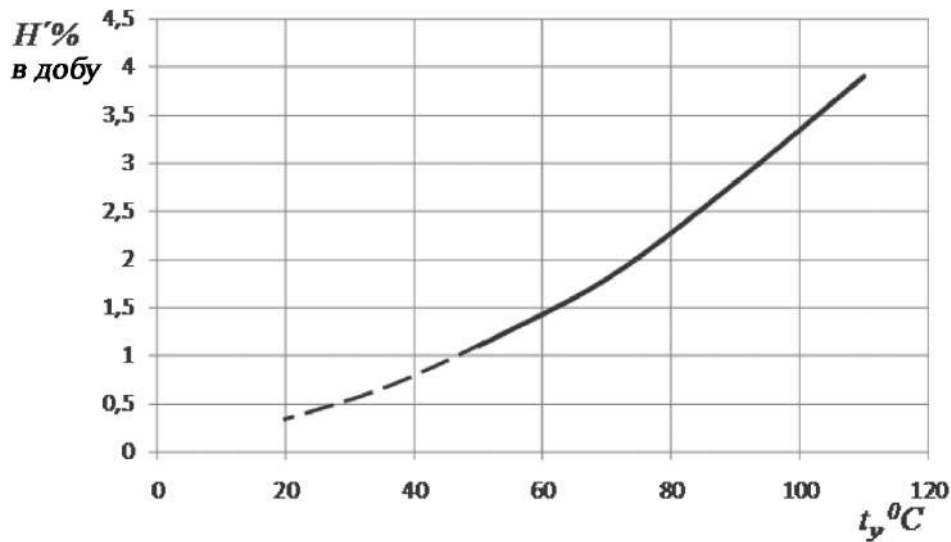


Рис. 3.8. Залежність середнього темпу приросту залишкової деформації гуми від температури ущільнення

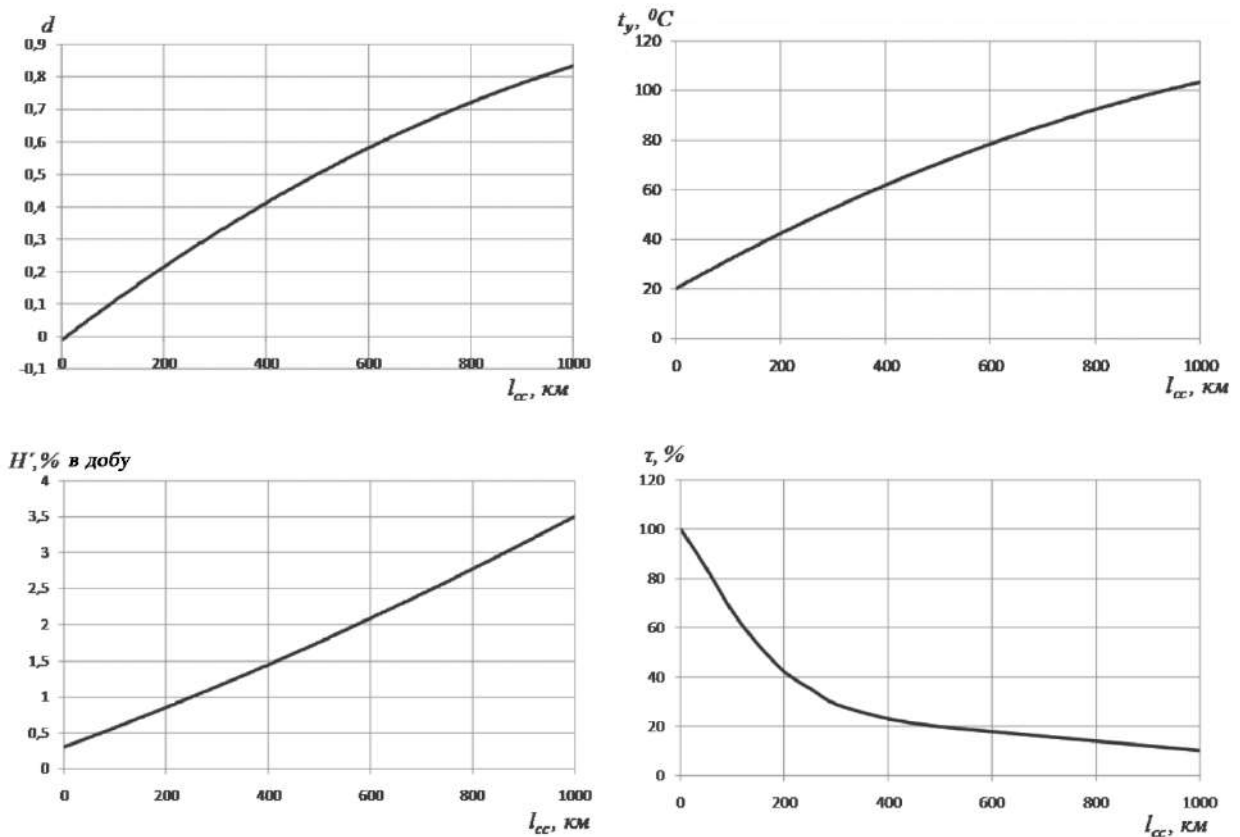


Рис. 3.9. Залежність параметрів ущільнення від середньодобового пробігу

Найважливіші показники - сили тертя ущільнень, зафіксовані експериментально і аналітично, представлені в вигляді порівняльних даних

(рис. 3.10). Тут індекс Т означає: теоретичні дані. При розрахунках прийняті коефіцієнти тертя : для манжет без модифікації $f = 0,25$; для тих ж манжет з модифікацією $f = 0,125$; для гумовотканинних манжет $f = 0,18$.

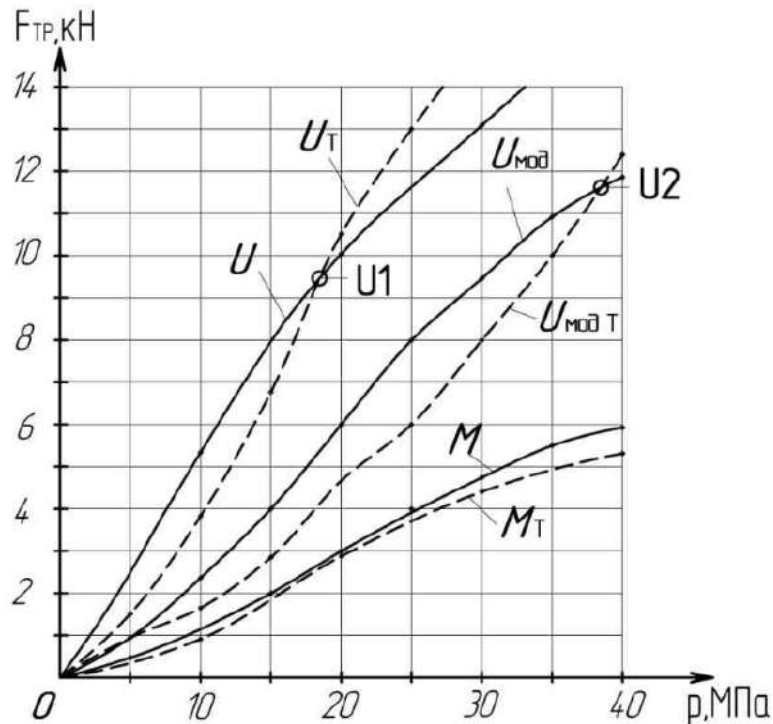


Рис. 3.10. Експериментальні і теоретичні значення сили тертя ущільнень

3.4. Моделювання манжетних ущільнень у програмному комплексі ANSYS

Чисельне відтворення напружено-деформованого стану елементів манжетного ущільнення (МУ) є складною задачею механіки деформівного твердого тіла [1–3]. Найбільші труднощі виникають під час опису контактної взаємодії двох тіл із суттєво різними механічними властивостями, а також з урахуванням великих деформацій, що виникають під дією монтажного натягу та робочих навантажень на гумовий елемент. Для коректного моделювання необхідно не лише сформулювати відповідну систему граничних умов взаємодії тіл, але й коректно задати реологічні характеристики матеріалів, що входять до складу конструктивних елементів ущільнення.

У задачах такого типу ефективними є чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів (МКЕ). Вибір конкретного програмного середовища повинен ґрунтуватися як на обчислювальній ефективності алгоритмів, так і на можливостях системи з точки зору контролю точності, вирішення контактних задач і проведення верифікаційних тестів.

Побудова кінцево-елементної моделі та задання властивостей матеріалів

Геометрична модель повністю відтворювала реальні розміри манжетного ущільнення. На схемах представлено лише ті структурні елементи, які безпосередньо беруть участь у контактній взаємодії та визначають працездатність МУ. Завдяки осевій симетрії конструкції (відносно осі Z) поставлене завдання може бути зведено до двовимірної осесиметричної постановки, що значно оптимізує обчислення. Для цього у параметрах моделі активізовано режим «Осесиметричний напружений стан».

Оскільки модуль Юнга сталі на декілька порядків перевищує аналогічний параметр для гумових матеріалів, сталеві частини моделі розглядалися як абсолютно жорсткі тіла. Коефіцієнт тертя в зоні контакту приймався сталим і становив 0,2.

Після виконання розрахункових процедур було отримано просторові поля напружень і деформацій у числовій та графічній формах. Аналіз результатів (рис. 3.11, 3.12) показав, що:

- максимальні контактні напруження виникають не на самому краю кромки манжети, а на певній відстані від нього;
- ширина фактичної зони контакту змінюється в межах 6–15 мм, що узгоджується з характеристиками реальних ущільнювальних систем.

Отримані результати підтверджують адекватність моделі та дозволяють використовувати її для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію геометричних параметрів і матеріалів манжетних ущільнень.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

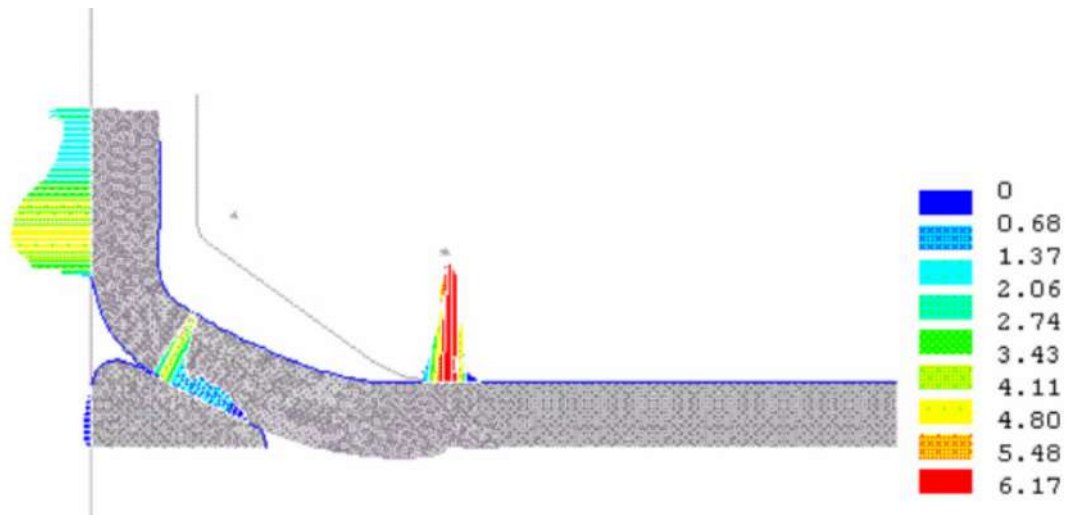


Рис. 3.11. Розподілення нормальних контактних напружень в манжетному ущільненні відразу після монтажу

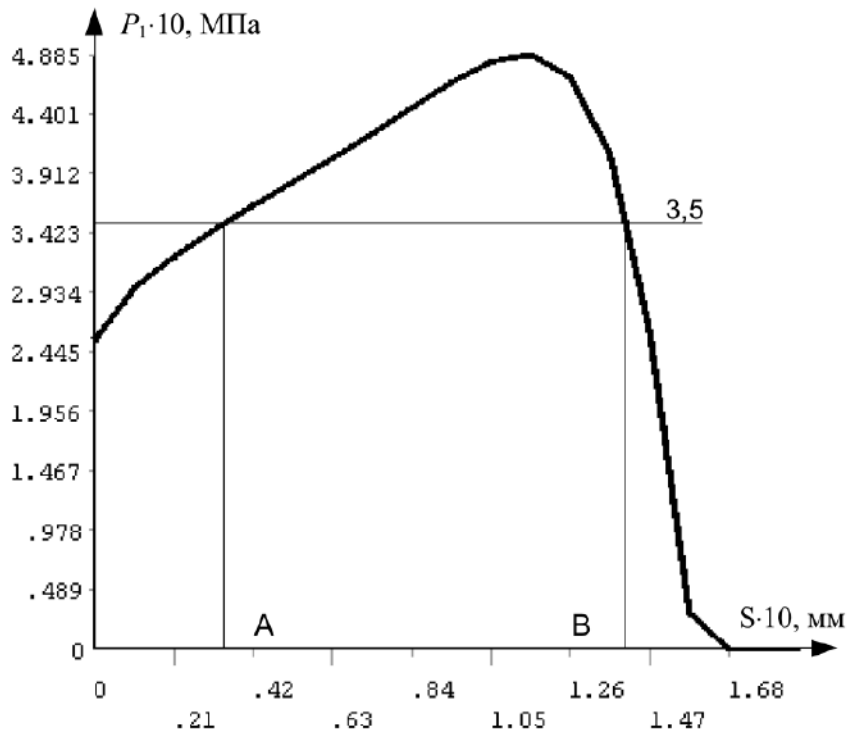


Рис. 3.12. Розподіл контактних тисків по довжині повністю армованої манжети уздовж її контакту з площиною ущільнюючого кільця в початковий момент при $t = 0$

Одним із ключових параметрів, що визначають герметичність манжетного з'єднання, є ширина фактичної зони контакту між робочою

кромкою ущільнення та поверхнею вала. Результати кінцево-елементного аналізу дозволили встановити характер її зміни протягом тривалого часу експлуатації.

На початковому етапі, одразу після монтажу манжети на вал і прикладання робочого гідростатичного тиску, ширина зони контакту становить приблизно 6,1 мм. У подальшому, в процесі тривалої експлуатації ущільнювача, відбувається поступове розширення цієї зони, і через приблизно 12 років роботи її величина збільшується до 14,8 мм.

На рис. 3.13 наведено результати моделювання розподілу контактних напружень для різних моментів часу з урахуванням робочого тиску. Дані графічні залежності наочно демонструють, як із плином часу відбувається зміна інтенсивності та розподілу контактних напружень у зоні взаємодії манжети з валом.

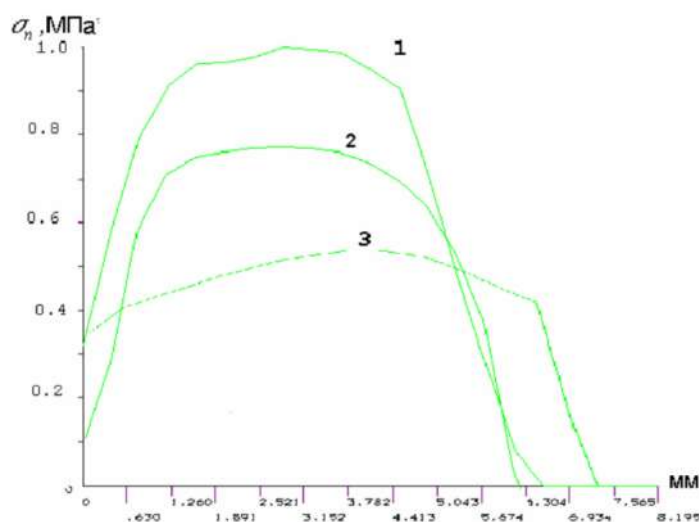


Рис. 3.13. Розподілення нормальних контактних тисків в манжетному ущільненні протягом часу: 1 – відразу після прикладання навантаження; 2 – через 6 років експлуатації; 3 – через 10 років експлуатації

4. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІІ МАНЖЕТНОГО УЩІЛЬНЕННЯ І СТЕНДУ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ВАЛІВ

4.1. Обґрунтування розробки

Однією з відомих конструкційних реалізацій стендів для випробування ущільнень обертових валів є установка, що містить циліндричний корпус на підшипникових опорах, співвісно змонтований вал, привід його обертання, датчик крутного моменту, випробувальні ущільнення та герметизувальні елементи. Додатково стенд обладнано гільзою з гвинтовою нарізкою, встановленою на валу, та штуцером типу «труба в трубі» для підведення та відведення робочої рідини; у корпусі виконано отвір для пропускання зовнішньої труби штуцера з радіальним зазором. Ущільнення, що досліджуються, монтуються на валу і герметизують зазор.

Попри функціональність, ця конструкція має низку суттєвих недоліків:

- надмірну складність конструктивного виконання;
- обмеження дослідження лише триботехнічними характеристиками, без можливості комплексної оцінки умов герметизації та деградаційних процесів.

Також відомий інший тип стенда, призначений для випробування контактних ущільнень підшипникових вузлів. Він містить привід із регульованою швидкістю, робочу камеру, повітряну магістраль з редуктором, запобіжним клапаном, електричним нагрівачем та витратоміром, а також систему вихідних комунікацій із дроселем і відсічними кранами. Однак у цій конструкції відсутня мастильна рідина та система її подачі в зону контакту ущільнення з валом, що унеможлиблює моделювання реальних умов роботи та значно прискорює руйнування ущільнювального елемента через сухе тертя.

4.2. Вимоги до стенду

Метою пропонованої розробки є створення стенду, який здатен:

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- здійснювати об'єктивну перевірку якості виготовлення манжетних ущільнень обертових валів;
- забезпечувати порівняльні випробування різних конструкцій ущільнень;
- дозволяти виявляти критичні режими роботи, наближені до реальних умов експлуатації;
- формувати масляний туман у робочій камері для моделювання стандартного мастильного середовища.

Запропонований стенд містить щонайменше одну підшипникову опору, герметичну робочу камеру зі знімним фланцем, вал, встановлений у підшипниковій опорі та розташований співвісно в камері, привід обертання валу, пристрій для подачі стисненого повітря, вимірювальні засоби тиску, температури, частоти обертання та витоку.

Робоча камера конструктивно передбачає можливість створення масляного туману, що дозволяє змоделювати реальний режим роботи манжети.

До складу приводу валу входить електродвигун постійного струму та регульоване джерело живлення, яке забезпечує встановлення необхідної частоти обертання. Джерелом стисненого повітря є компресор. Генератор імпульсів виконується у вигляді магнето, а частота обертання визначається електронним тахометром. Температуру робочої кромки фіксують за допомогою термопари, підключеної до електронного мультиметра.

Для реалізації масляного туману застосовується крильчатка на валу стенда. Під час обертання її лопаті занурюються у мастильну рідину та розбризкують її по робочому об'єму камери у вигляді дрібнодисперсних крапель. Передбачена можливість регулювання тиску, швидкості обертання валу та температури зони ущільнення. Компресор разом із запірною арматурою та манометром забезпечують стабілізацію тиску. Джерело живлення дозволяє встановлювати потрібну частоту обертання, а термопара забезпечує контроль температури робочої кромки з високою точністю.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.3. Конструкція та принцип дії стану для випробування манжетних ущільнень валів

На рис. 4.1 представлено структурну схему розробленого стану для дослідження манжетних ущільнень обертових валів. Конструкція забезпечує формування комплексу реалістичних впливів — тискових, термічних, динамічних та мастильних — що дозволяє отримувати надійну діагностичну інформацію про ресурсоутворювальні процеси та критичні режими роботи ущільнення.

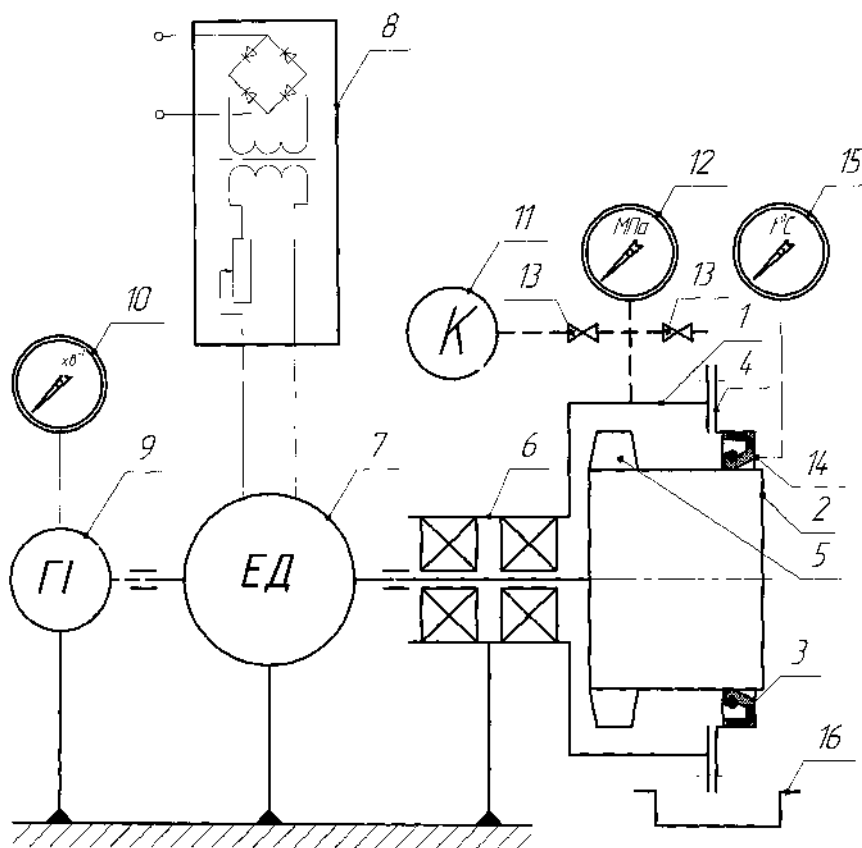


Рис. 4.1. Схема стану для випробування манжетного ущільнення валів

Стенд містить щонайменше одну підшипникову опору 6, у якій встановлено вал 2 з закріпленою на ньому крильчаткою 5; герметичну робочу камеру 1 зі знімним фланцем 4 для монтажу випробуваного ущільнення 3; привід обертання, що складається з електродвигуна 7 постійного струму та джерела живлення 8 із плавним регулюванням напруги, яке забезпечує

можливість варіювання частоти обертання валу. До складу системи також входить повітряний компресор 11, з'єднаний з герметичною камерою 1 через повітряну магістраль; запірна арматура 13, що дозволяє створювати та скидати тиск у камері; манометр 12 для контролю внутрішнього тиску; генератор імпульсів 9 та електронний тахометр 10; а також термopара 14, під'єднана до мультиметра 15, для контролю температури робочої кромки ущільнення.

Після завершення одного режиму проводять перехід на наступний та повторюють вимірювання температури і герметичності. На основі експериментальних даних будують залежності, які дозволяють оцінити вплив обертів валу, тиску в камері та інших чинників на працездатність ущільнювального елемента. Таким чином, запропонована конструкція стенда забезпечує аналіз якості виготовлення манжетних ущільнень, порівняння різних конструкцій, а також визначення критичних режимів їх роботи в умовах, максимально наближених до експлуатаційних.

4.4. Розробка манжетного ущільнення валу з датчиками інформаційно-енергетичного стану

Запропонована конструкція відноситься до манжетних ущільнень рухомих з'єднань вузлів і деталей машин. Основною особливістю є наявність тороподібного датчика механічного напруженого стану, розташованого між робочою поверхнею ущільнення та кільцевою пружиною. Сектори цього датчика виконані з багатокомпонентного полімеру, який демонструє виражений зв'язок між рівнем механічного напруження та електропровідністю. Для зняття сигналів сектора забезпечені відповідними електричними контактами.

Зміна електричного опору в секторах датчиків дозволяє визначати:

- величину контактного тиску в зоні ущільнення;
- інтенсивність та характер зношування ущільнювального елемента;

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. ЗАХОДИ З РЕМОНТУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Ефективна та безперебійна робота сучасного підприємства неможлива без надійно організованої системи промислового транспорту, яка забезпечує своєчасне переміщення значних обсягів вантажів у процесі виробничої діяльності. У промислових, будівельних, енергетичних та сервісних галузях, а також у транспортно-складських комплексах сільського господарства і торгівлі здійснюється постійний рух різноманітних матеріальних потоків, що потребує раціональної організації транспортних операцій.

Промисловий транспорт поділяють на зовнішній та внутрішній. Зовнішній транспорт забезпечує доставку на підприємство сировини, напівфабрикатів, палива та іншої продукції, а також вивезення готових виробів і відходів. Такі операції здійснюються за допомогою залізничного, автомобільного, водного та авіатранспорту.

Внутрішньозаводський транспорт охоплює міжцехові та внутрішньоцехові переміщення. Міжцеховий транспорт організовує переміщення вантажів між виробничими підрозділами, складами та технологічними лініями. На підприємствах масового й великосерійного виробництва основу міжцехового переміщення становлять конвеєрні системи безперервної дії. Внутрішньоцеховий транспорт забезпечує переміщення матеріалів та виробів між окремими робочими зонами, агрегатами й ділянками в межах цеху відповідно до вимог технологічного процесу. Він є ключовим елементом потокової організації виробництва та визначає ритмічність роботи технологічних ліній.

У сучасних умовах транспортні та технологічні системи підприємства утворюють єдиний виробничий комплекс, ефективність якого залежить від злагодженого функціонування всіх елементів транспортної інфраструктури. Висока ступінь механізації та автоматизації вантажно-розвантажувальних і транспортно-складських операцій (ВРТСР) є одним з основних резервів

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищення продуктивності праці та зниження собівартості продукції. Незважаючи на значні досягнення в автоматизації технологічних процесів харчової та переробної промисловості, саме процеси приймання, відправлення і внутрішнього переміщення вантажів на підприємствах часто залишаються недостатньо механізованими.

Безпосередні керівники робіт, у підпорядкуванні яких перебувають виконавці ВРТС-операцій, зобов'язані організовувати безпечне виконання операцій, забезпечувати правильне застосування вантажопідіймальних механізмів і технічних засобів, контролювати використання працівниками спецодягу та індивідуальних засобів захисту, дотримання норм і правил перенесення вантажів, а також підтримання належного санітарного й протипожежного стану робочих місць. Вони здійснюють інструктажі з техніки безпеки та слідкують за наявністю попереджувальних написів і знаків.

До виконання ВРТС-операцій допускаються особи віком не менше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання безпечним методам праці та ознайомлені з вимогами чинних нормативно-правових документів з охорони праці.

Під'їзні шляхи та проходи до вантажних площадок повинні відповідати технічним стандартам і протипожежним вимогам. Місця виконання вантажно-розвантажувальних робіт перед початком процесу очищають від зайвих предметів, снігу, льоду; за потреби поверхню посипають піском для уникнення ковзання.

На підприємствах для виконання навантажувально-транспортних операцій широко застосовуються автотранспортувачі, які використовують для розвантаження вантажних автомобілів, штабелювання вантажів, переміщення матеріалів між цехами та складами. Залежно від типу вантажу автотранспортувач може бути оснащений різними змінними робочими органами: гаком, ковшем, вилковим захоплювачем, а також стрілою. Робота

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автонавантажувача допускається лише на рівних ділянках із твердим покриттям.

Основними вимогами безпечної експлуатації автонавантажувачів є:

- обов'язкова перевірка технічного стану перед початком роботи: гальмівної системи, механізмів керування, шарнірів, рульових тяг, стану шин і тиску в них (експлуатація на заниженому тиску заборонена через ризик втрати стійкості);
- перевірка відсутності витоків палива та пошкоджень гнучких шлангів;
- забезпечення відповідності маси вантажу паспортній вантажопідйомності механізму.

Особливу увагу приділяють правильному положенню центра тяжіння вантажу. Якщо центр тяжіння зміщено на відстань, що перевищує допустиму, виникає ризик перекидання навантажувача та травмування працівників, що є однією з найпоширеніших аварійних ситуацій на складських ділянках.

Для забезпечення стійкого положення вантажів під час переміщення вилкові захоплювачі навантажувача необхідно встановлювати симетрично відносно вертикальної рами та в одній горизонтальній площині з нею. Захоплення та укладання вантажів на вили здійснюють таким чином, щоб повністю виключити їх зміщення або падіння під час підйому, транспортування, опускання й розвантаження. Забороняється розташовувати вантаж вище рівня захисного огородження, яке призначене для убезпечення оператора.

Введення вилочного захоплювача під вантаж і його виймання допускається лише на першій передачі руху, а підйом вантажу здійснюється виключно після повної зупинки навантажувача. Перед початком роботи оператор зобов'язаний провести детальний технічний огляд машини. Заборонено транспортувати вантажі, маса яких перевищує паспортну вантажопідйомність обладнання. Довгомірні об'єкти можна переміщувати лише на відкритих майданчиках, причому спосіб їх стропування та фіксації

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

має виключати можливість руйнування або падіння. Якщо габарити вантажу перекривають огляд оператора, пересування слід здійснювати заднім ходом під керівництвом відповідальної особи, яка подає сигнали та коригує напрям руху.

Перед підйомом вантаж має бути надійно сформований у пакет. Підймання виконують плавно, без ривків, поступово збільшуючи оберти двигуна та керуючи механізмом підйому без різких рухів. Підймання допускається лише при вертикальному або нахиленому назад положенні рами вантажопідйомника. Під час маніпуляцій з вантажем у нахиленому положенні вимагається особлива обережність: забороняються різкі переміщення важеля нахилу, оскільки це може спричинити перекидання машини або випадання вантажу. У процесі транспортування вантаж та рама повинні бути відхилені назад, а вантаж має знаходитись на висоті 0,3–0,4 м над поверхнею.

Дрібноштучні вантажі дозволяється перевозити лише у спеціальній тарі, заповненій не вище рівня її бортів. У разі порушення стійкості навантажувача вантаж слід негайно опустити на землю.

Особливої уваги потребує транспортування у вузьких проходах. У нічний час ділянки складів повинні мати достатнє штучне освітлення. Під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій категорично забороняється піднімати або перевозити людей, залишати навантажувач з вантажем на піднятому оснащенні чи при піднятому механізмі підйому, працювати при наявності сторонніх шумів, тріску або ознак несправності гідросистеми. По завершенні роботи оператор зобов'язаний вимкнути систему керування, вийнявши ключ запалення, повідомити відповідальну особу про виявлені несправності та сприяти їх усуненню.

Швидкість руху навантажувача не повинна перевищувати 6 км/год на основних проїздах і 5 км/год — на внутрішньоскладських маршрутах. Забороняється користуватися відкритим вогнем або палити біля навантажувача, особливо під час перевірки рівня пального. Неприпустимо

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залишати машину з працюючим двигуном поблизу легкозаймистих матеріалів або відходити від поста управління із піднятим вантажем. У випадку загоряння пального не допускається гасіння водою; необхідно використовувати пінні вогнегасники, пісок або негорючі накривки.

Після завершення роботи оператор повинен очистити навантажувач, перевірити герметичність гідросистеми, підтягнути ущільнення та прибрати горючі матеріали у металеву тару. Змінному працівникові передається інформація про всі виявлені несправності із відповідним записом у змінному журналі.

Головною передумовою безпечної експлуатації електрокарів і електронавантажувачів є їх технічна справність. Перед початком роботи необхідно перевірити напругу акумуляторної батареї під навантаженням (не більше 27 В при підйомі номінального вантажу), стан контактів та клем, наявність пробок на всіх банках, цілісність зовнішніх кріплень, рівень мастила, герметичність гідроліній, працездатність механізмів підйому й нахилу без навантаження, а також справність гальмівних систем.

Періодичне випробування навантажувальної техніки є обов'язковою умовою забезпечення її безпечної експлуатації. Не рідше одного разу на рік автонавантажувач піддають контрольним випробуванням на надійність із підняттям вантажу, маса якого перевищує номінальну вантажопідіймальність машини на 20–25%. Результати таких випробувань фіксують в офіційному акті технічного стану. Експлуатація електронавантажувача з будь-якими виявленими несправностями забороняється; усунення дефектів електричної частини здійснюється виключно кваліфікованим електромеханіком або електриком.

З метою запобігання загорянню, спричиненому можливим іскрінням в районі акумуляторної батареї, забороняється залишати на її поверхні інструмент чи металеві предмети, допускати послаблення контактів, а також перебувати поруч із відкритим вогнем або палити. Під час роботи

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електронавантажувача вилкові органи, що утримують вантаж, повинні бути жорстко зафіксовані на каретці та симетрично розташовані відносно вертикальної рами. Сам вантаж необхідно розміщувати так, щоб виступи з обох боків вил були рівномірними. Перед початком руху раму вантажопідійомника нахиляють у бік оператора для забезпечення стійкості вантажу.

Маніпуляції із захопленням і звільненням вантажу дозволяється проводити лише на першій передачі, тоді як вертикальні переміщення (підйом та опускання) виконують виключно в стані повної зупинки машини. Транспортування вантажів із висотою підйому вил більше ніж 0,2–0,3 м над рівнем підлоги не допускається. Перед початком транспортування оператор повинен переконатися, що маса вантажу не перевищує вантажопідіймальність обладнання, а його габарити відповідають ширині проїзної частини.

У випадку аварійної відмови систем електрообладнання — короткого замикання або нестабільної роботи — акумуляторну батарею негайно вимикають шляхом відключення ключа запалення. Всі роботи з очищення або обслуговування батарей допускається проводити лише після повного від'єднання їх від зарядного пристрою. Перед під'єднанням зарядного обладнання необхідно відкрити кришки банок батареї, після чого приєднати провідники зарядного пристрою, суворо дотримуючись полярності.

Процес зарядження акумуляторів здійснюється виключно в спеціально облаштованих підзарядних пунктах, оснащених припливно-витяжною вентиляцією, що забезпечує 5–10-кратний повітрообмін за годину для лужних та 10–15-кратний — для кислотних батарей. Зарядні установки розміщують у відокремлених приміщеннях. Усі корпуси електричного обладнання підлягають обов'язковому заземленню.

До початку зарядження перевіряють справність засобів індивідуального захисту, інструменту та обладнання зарядних станцій, а також освітлення. Наконечники вимірювальних проводів вольтметрів повинні мати надійну

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ізоляцію. Підключення переносної електролампи виконується у визначеній послідовності: спершу вмикають штепсельну вилку в розетку, а потім — рубильник; під час вимкнення порядок дій зворотний.

З метою уникнення коротких замикань категорично забороняється торкатись одночасно двох клем батареї будь-якими металевими предметами. З'єднання акумуляторів здійснюються свинцевими клемами, які забезпечують щільний електричний контакт та мінімізують ризик іскріння.

У приміщеннях для зарядження заборонено одночасно обслуговувати кислотні та лужні батареї; торкатись струмоведучих частин без гумових рукавичок; користуватися відкритим полум'ям; проводити слюсарні роботи, свердління або інші технологічні операції; промивати акумулятори перед тривалим зберіганням; транспортувати стартерні батареї вручну; а також зберігати харчові продукти чи питну воду.

Підключення чи відключення клем батареї здійснюють лише при вимкненому зарядному пристрої. Електроліт не повинен розливатися під час зарядження. Готують електроліт поза зарядним приміщенням із застосуванням виключно дистильованої води. Забороняється використовувати оцинкований, алюмінієвий, мідний, свинцевий або керамічний посуд.

Гумові чохла, кришки та перемички слід регулярно очищати від забруднень і солей, що виділяються на поверхні батарей, а клеми та з'єднувальні елементи обробляють тонким шаром технічного вазеліну для запобігання корозії.

Акумуляторні кислоти та електроліти лужного або кислотного типу транспортують виключно у спеціальних скляних бутлях, герметизованих притертими пробками й установлених у захисні дерев'яні або металеві обрешітки зі спеціальними шарнірними фіксаторами, що забезпечують безпечне переливання та мінімізують ризик розливу. Переміщення таких бутлів у виробничих приміщеннях здійснюють на спеціалізованих візках або за допомогою носилок. У разі випадкового проливання сірчаної кислоти місце

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забруднення необхідно негайно нейтралізувати, засипавши тирсою або содою, використовуючи захисні рукавички та інші засоби індивідуального захисту.

Акумуляторні батареї транспортують на спеціальних візках із гніздами, що відповідають їх геометричним розмірам, а зберігають — у сухих вентильованих приміщеннях за температури 0...30 °С. Гумові чохла батарей рекомендується захищати від прямих сонячних променів, оскільки ультрафіолетове випромінювання прискорює процеси старіння матеріалу.

Після завершення процесу заряджання необхідно послідовно вимкнути навантажувальний рубильник, від'єднати джерело струму, відключити кабельні проводи, та витримати батарею упродовж 2–3 годин до повного охолодження, після чого закрити кришки. Під час експлуатації електронавантажувачів контроль рівня мастила в гідросистемі є обов'язковою процедурою. Робота заборонена, якщо знято захисні кожухи електродвигуна або кришки акумуляторної батареї.

Експлуатація електрокар і електронавантажувачів повинна суворо відповідати заводській інструкції, а до їх керування допускаються лише підготовлені працівники віком від 18 років, які пройшли навчання, атестацію та мають відповідне посвідчення.

Безпечність експлуатації вантажопідйомних кранів значною мірою визначається якістю їх конструктивного виконання та дотриманням правил використання. Кожен кран комплектується паспортом, заводською інструкцією з монтажу та експлуатації, а також маркувальною табличкою з основними технічними параметрами. Перед введенням у експлуатацію всі крани проходять первинне технічне опосвідчення, а в процесі використання — періодичні та повні огляди: неповне не рідше одного разу на рік, повне — кожні три роки. Повне опосвідчення включає технічний огляд, статичні та динамічні випробування.

Під час огляду перевіряють стан металоконструкцій, канатів, блоків, механізмів підйому, електрообладнання, приладів безпеки, гальм, систем

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управління та сигналізації. Контролюють правильність встановлення крану, заземлення та відповідність маси противаг паспортним даним.

Статичні випробування проводять із вантажем, що перевищує номінальний на 10...25%. Кран вважається придатним, якщо вантаж не опускається протягом 10 хвилин і не спостерігається деформацій чи тріщин. Динамічні випробування оцінюють працездатність механізмів, точність роботи кінцевих вимикачів, гальм та інших систем безпеки. Результати вносять до паспорта механізму.

Безпечна експлуатація вантажопідйомного обладнання та засобів внутрішньоцехової логістики передбачає чітке дотримання встановлених технічних регламентів, а також наявність персональної відповідальності за технічний стан обладнання. Обов'язки щодо контролю працездатності та своєчасного обслуговування ліфтового господарства покладаються на спеціально визначеного працівника підприємства або на уповноважену організацію, яка залучається на договірних засадах. Відповідальна особа зобов'язана забезпечувати безумовне виконання регламентованих технічних оглядів, профілактичних робіт і періодичних опосвідчень та не має права допускати до експлуатації обладнання з простроченими термінами технічного контролю.

Для транспортування сипучих, штучних та інших видів вантажів у вертикальній або похилій площині застосовуються ковшові елеватори. Таке обладнання має бути розміщене у герметизованих кожухах із ревізійними вікнами, встановленими через кожні чотири метри висоти. Усі ревізійні отвори повинні щільно закриватися під час роботи для запобігання витоку пилу. Конструкція кожуха мусить забезпечувати відсутність будь-яких щілин, через які можливий винос сировини або потрапляння пилу у виробничі приміщення.

Для приймальних майданчиків елеваторів передбачаються стаціонарні східці та огороження заввишки не менше одного метра із суцільною обшивкою нижньої частини і додатковою планкою на висоті приблизно 0,5 м.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Елеватори мають бути обладнані автоматичними системами, що забезпечують аварійне вимикання приводу у разі падіння ланцюга чи обриву стрічки. Кришки приводних ланцюгів блокуються із системою керування, що унеможливорює пуск при відкритих оглядових люках. Безпечність проведення технічного обслуговування та ремонту гарантується наявністю пристроїв, що виключають неконтрольований зворотний рух стрічки.

Підіймачі (підйомники), на відміну від ліфтів, можуть працювати у вертикальному або похилому напрямках і не потребують облаштування шахти чи машинного приміщення. Замість традиційної кабіни допускається встановлення огороженої кліті. У зонах завантаження та розвантаження має бути розміщена інструкція з правил безпечної експлуатації та зазначені граничні параметри вантажопідйомності.

Комплектування вантажопідйомних машин здійснюється за допомогою знімних вантажозахоплювальних засобів — стропів, траверс, кліщових та кільцевих захоплювачів. Оскільки ці елементи працюють у складних режимах навантаження, вони підлягають регулярним оглядам: траверси — щонайменше раз на півроку, захоплювачі — щомісяця, канатні стропи — кожні десять днів (за винятком тих, що застосовуються нечасто). Факт огляду фіксується у відповідному журналі.

Переміщення вантажів ручними візками несе додаткові ризики, насамперед через обмежену оглядовість шляху руху й відсутність гальмівних або сигнальних механізмів. Для мінімізації небезпеки рукоятки візків оснащуються захисними скобами. На спусках пересування має здійснюватися під контролем кількох працівників для запобігання неконтрольованому руху візка. Транспортування гарячої продукції (наприклад, котлів із рідкими стравами) дозволяється лише по одному котлу на візок, при мінімальній швидкості руху.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ВИСНОВКИ

1. Встановлено специфіку експлуатації та типові відмови вузла колінчастого валу автомобіля, зокрема виявлено чинники, що визначають характер навантаження і зношування його елементів.

2. Моделювання роботи манжетного ущільнення підтвердило, що застосування робочої кромки зі зміцненим поверхневим шаром призводить до зростання контактного тиску та одночасного зменшення зони контакту .

3. Підвищення температури в зоні тертя зумовлює зниження інтегрального коефіцієнта тертя приблизно на чверть, тоді як межа міцності еластомерного матеріалу зменшується на 40%.

4. Аналіз напружено-деформованого стану манжети із зміцненою поверхнею засвідчив, що після її встановлення на вал із радіальним натягом фактична контактна зона формується завдяки пружній деформації шарів товщиною до 0,5 мм.

6. Підвищення довговічності рухомих ущільнювальних сполучень в умовах підвищеного абразивного зношування можливе за рахунок збільшення твердості та зносостійкості поверхні вала в зоні контакту з, що знижує інтенсивність руйнування як металу, так і еластомерних елементів.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корнійко Є. О. Дослідження експлуатаційних властивостей манжетних ущільнень та причин їх відмов : пояснювальна записка / Є. О. Корнійко. — Дніпро : Дніпровський держ. аграр. ун-т, 2021. — 72 с. — [Електронний ресурс] : <https://dSPACE.dsau.dp.ua>. — Дата доступу: 05.11.2025.
2. Верба І. І. Проектування обладнання галузевого машинобудування : навч. посіб. / І. І. Верба. — Київ, 2020. — 256 с. — Режим доступу: Core. — Дата доступу: 05.11.2025.
3. Левченко Л. О. Модернізація електрообладнання: аналіз надійності вузлів із манжетними ущільненнями / Л. О. Левченко // ES-Journal (укр. електрон. наук. журн.). — 2023. — [Електронний ресурс] : <https://es-journal.in.ua>. — Дата доступу: 05.11.2025.
4. Конструювання з композиційних матеріалів : навч. посіб. / колектив авторів; за заг. ред. ... — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2011. — 312 с. — Розділ: ущільнюючі кільця та манжети. — [Електронний ресурс] : <https://cpsm.kpi.ua>. — Дата доступу: 05.11.2025.
5. ДСТУ ISO 16589-2:2006. Манжети з термопластичними ущільнювальними елементами для валів. Частина 2. Словник термінів. — Київ : Держспоживстандарт України, 2006. — [Електронний ресурс] : Будстандарт Online. — Дата доступу: 05.11.2025.
6. ГОСТ 8752-79. Манжети армовані для валів. — Москва : Видавництво стандартів, 1979. — (стандарт). — [Електронний ресурс] : xp--80aqqskv3f.xn--j1amh. — Дата доступу: 05.11.2025.
7. Збірники науково-технічних доповідей та технічні звіти з трибології (вітчизняні техвузи) : матеріали конференцій, відділи трибології / уклад. ... — Дніпро : ДСАУ/ін. репозитарії. — [Електронний ресурс] : <https://dSPACE.dsau.dp.ua>. — Дата доступу: 05.11.2025.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Технічні паспорти і каталоги виробників манжет (Україна) : технічні матеріали виробників та постачальників арматури і ущільнень. — Режим доступу: офіційні сайти виробників. — [Електронний ресурс] : xn--80affab0accndielu2blc4b3a42a.xn--j1amh. — Дата доступу: 05.11.2025.
9. Методичні вказівки та посібники з ремонту двигунів внутрішнього згоряння (розділ «манжети і їх діагностика») : навч.-метод. матеріали / автосервісні методички. — [Електронний ресурс] : <https://dspace.dsau.dp.ua>. — Дата доступу: 05.11.2025.
10. Патенти України (Укрпатент) на технічні рішення в галузі манжетних ущільнень : патентні описи, корисні моделі, винаходи. — [Електронний ресурс] : <https://ukrpatent.org>. — Дата доступу: 05.11.2025.
11. Kozuch E., Nomikos P., Morris N. J., Rahnejat H., Rahmani R. Effect of shaft surface roughness on the performance of radial lip seals // Lubricants. — 2018. — [Електронний ресурс] : <https://www.mdpi.com/journal/lubricants>. — Дата доступу: 05.11.2025.
12. Guo F., et al. The effect of wear on the performance of a rotary lip seal // Tribology International. — 2014. — [Електронний ресурс] : <https://www.sciencedirect.com/journal/tribology-international>. — Дата доступу: 05.11.2025.
13. Grün J., et al. Multiscale structural mechanics of rotary shaft seals // Lubricants. — 2023. — [Електронний ресурс] : <https://www.mdpi.com/journal/lubricants>. — Дата доступу: 05.11.2025.
14. Mazza L., et al. Failure and damage of reciprocating lip seals for pneumatic cylinders // Lubricants. — 2024. — [Електронний ресурс] : <https://www.mdpi.com/journal/lubricants>. — Дата доступу: 05.11.2025.
15. Rentong C., [et al.] Reliability estimation of mechanical seals based on bivariate dependence analysis and model uncertainty // Engineering Failure Analysis. — 2021. — [Електронний ресурс] :

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- <https://www.sciencedirect.com/journal/engineering-failure-analysis>. — Дата доступу: 05.11.2025.
16. Wang Y., et al. A model for reliability assessment of sealing performance // Journal of Pressure Vessel Technology. — 2022. — [Електронний ресурс] : <https://asmedigitalcollection.asme.org/pressurevessel>. — Дата доступу: 05.11.2025.
17. Chai L., et al. Reliability analysis of dynamic sealing performance // Processes. — 2024. — [Електронний ресурс] : <https://www.mdpi.com/journal/processes>. — Дата доступу: 05.11.2025.
18. Study on sealing performance of oil seal with micro-pores / textured shaft surface : conference paper / ResearchGate. — [Електронний ресурс] : <https://www.researchgate.net>. — Дата доступу: 05.11.2025.
19. Zeng W., et al. Sealing reliability assessment for deep-water applications // Reliability Engineering & System Safety. — 2022. — [Електронний ресурс] : <https://www.journals.elsevier.com/reliability-engineering-and-system-safety>. — Дата доступу: 05.11.2025.
20. Seal technology assures reliability : review // Tribology International / Tribology Letters (review articles). — [Електронний ресурс] : <https://www.sciencedirect.com>. — Дата доступу: 05.11.2025.

					КРММТВА 25.24338.000. ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		