

Тема: «Підвищення довговічності захисних втулок компресорів, що працюють в умовах АПК»

Виконав: Васильченко Владислав Олегович

Керівник: Тарельник В.Б.

## ВСТУП

У світі інженерії втулка — це поняття, яке забезпечує безперебійну роботу всіх видів техніки. Втулка — це циліндричний вкладиш, призначений для запобігання зносу рухомих компонентів. Вони часто використовуються як корпус у машинах з обертовими або ковзними валами, штифтами або шарнірами. Вони також відомі як втулки, підшипники котіння або підшипники ковзання.

Втулки є одними з найбільш універсальних компонентів у сучасній техніці, вони доступні з різних матеріалів та розмірів. Вони надзвичайно універсальні та життєво важливі для багатьох сучасних застосувань. Використовувані переважно в машинах для виробництва електроенергії, морської, залізничної, гірничодобувної та нафтогазової промисловості, втулки є життєво необхідною умовою в сучасному обладнанні.

Деякі втулки використовують термічне напилення для забезпечення внутрішнього покриття. Ця обробка зменшує тертя між внутрішньою поверхнею втулки та валом, який вона підтримує. Звичайні типи покриттів, що використовуються, включають мастило сухої плівки, тефлон або графіт.

Хоча її основна функція полягає у зменшенні тертя та шуму між двома поверхнями, які обертаються або ковзають одна відносно одної, втулка також виконує кілька додаткових функцій, наприклад, вона служить для встановлення інших елементів, таких як захисна втулка відцентрового компресора в сальниковому ущільненні. Від якості втулок залежить надійна робота всього компресора його довговічність, а також надійний захист від попадання в оточуюче середовище небажаних речовин.

Враховуючи вище сказане, тема магістерської дипломної роботи «Підвищення довговічності захисних втулок компресорів, що працюють в умовах АПК» актуальна і своєчасна.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАХИСНИХ ВТУЛОК КОМПРЕСОРІВ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

#### **1.1. Загальні положення**

Більшість втулок виготовляються циліндричної або конічної форми з використанням зносостійких та ударопоглинаючих матеріалів. Вони призначені для ковзання по штоках або валах, забезпечуючи рух з надзвичайно низьким тертям та захищаючи важливіші деталі.

Там, де механічні компоненти неминуче зношуються з часом, дешевше та легше замінити втулку, ніж складний компонент підвіски поршня. Втулки також мінімізують споживання енергії, зменшують шум, поглинають вібрацію та захищають обладнання від загального зносу.

Розташування втулки залежить від застосування. Найчастіше втулки встановлюються на деталях, де поширені вібрація та тертя.

В автомобілях втулки знаходяться на автомобільних системах підвіски, стабілізаторах поперечної стійкості, важелях перемикачів передач, дверях та лобовому склі. У парових турбінах втулки встановлені в компонентах клапанів, таких як головний запірний клапан, регулювальний клапан, відсмоктувальний клапан та запірний клапан повторного підігріву. У повітряних компресорах втулки з'єднують трубопроводи повітряного компресора з різьбою.

Втулки компактні та легкі, а також мають високу несучу здатність. Вони також є найдешевшим типом підшипників. Залежно від застосування, деякі втулки доступні з додатковим змащенням або призначені для роботи всухую без додаткового змащення.

Втулки зазвичай виготовляються з одного або комбінації різних матеріалів, кожен з яких має свої переваги та застосування. Поширені типи втулок включають:

*Гумові втулки:* м'якші за поліуретанові, що дозволяє їм гасити більше вібрацій. Однак вони можуть зношуватися під час постійного впливу розтягування, тепла, олії або хімічних речовин.

*Поліуретанові втулки:* міцніші за гумові та витримують більше стирання, але також потребують частішого змащування. Цей тип матеріалу можна формувати.

*Бронзові втулки:* твердіші та менш схильні до руйнування або деформації, ніж гума чи пластик. Для виготовлення втулок використовується близько 17 видів бронзи. Два найпоширеніші – це ойліт, самозмащувальний матеріал, та мідь, яка являє собою бронзу в поєднанні з оловом, алюмінієм або силіконом.

*Втулки зі сталеву підкладкою/бабітові втулки:* дешевший матеріал, ніж бронза, що забезпечує чудову стійкість до втоми та вантажопідйомність.

*Чавунні втулки:* використовуються для підтримки валів із загартованої сталі.

*Неопренові втулки:* виглядають і на дотик схожі на гуму, але краще витримують нагрівання та не швидко псуються під впливом олії чи тепла.

*Нейлоні втулки:* Зменшує тертя та не потребує змащування. Його також можна легко формувати, відливати або обробляти механічно.

*Делринові втулки:* корисні у вологому середовищі завдяки їхній стабільності та стійкості до мокрого стирання.

*Поліетиленові втулки надвисокої молекулярної маси (UHMWPE):* мають поверхню з низьким коефіцієнтом тертя та використовуються як альтернатива втулкам, виготовленим з ацеталю або нейлону.

*Вуглецево-графітові втулки:* самозмащувальні та стійкі до хімічних речовин і розчинників. Також підходять для контакту з рідинами з низькою в'язкістю або агресивними рідинами.

*Поліімідові, полісульфонові, поліфеніленсульфідні втулки:* мають високу стійкість до хімічного горіння.

Втулки використовують в парових турбінах електростанцій, які генерують багато тепла, яке зрештою може призвести до поломки машини. Окрім поглинання тепла, втулки захищають компоненти машини від вібрації та зносу. Вони також запобігають витоку пари та іншим проблемам з експлуатацією та обслуговуванням. Також їх використовують в повітряних компресорах де вони створюють простір між рухомими частинами. Оскільки втулки не містять металевих частин, що труться, вони майже не мають ризику зниження продуктивності через знос. Вони також змащуються під тиском, що допомагає підвищити загальну ефективність компресора.

В автомобілях втулки встановлюються на шарнірах підвіски та рульового керування для контролю руху. Вони також поглинають шум і вібрацію, коли ви стикаєтеся з нерівністю на дорозі, забезпечуючи плавну їзду. Окрім рульового керування та підвіски автомобіля, втулки також використовуються в нерухомих частинах, таких як кузов та опори стійок.

Втулки можуть бути невеликими, але вони відіграють життєво важливу роль в ефективності та довговічності машини. Вони ізолюють шум, вібрацію та удари, дозволяючи рухомих компонентам працювати плавно, забезпечуючи при цьому додаткову стійкість до стирання та пошкоджень.

Підшипники та втулки часто використовуються як взаємозамінні, але важливо зазначити, що це два різні компоненти (рис. 1.1)



## Рисунок 1.1- Втулки та підшипники

«Підшипники» – це загальний термін, що стосується будь-якого механічного компонента, призначеного для підтримки обертового тіла та зменшення тертя між рухомими частинами. Це сприяє високошвидкісному руху, одночасно справляючись з навантаженнями та забезпечуючи точність обертання.

Технічно втулки можна вважати простим типом підшипника, який також називають «підшипником ковзання».

Кулькові підшипники зазвичай мають складнішу конструкцію, ніж втулки, зазвичай складаючись з кількох роликів або кульок. На відміну від втулок, які потребують лише невеликої кількості мастила, підшипники потребують постійного подачі мастила, щоб запобігти пошкодженню та зносу.

Втулки – це специфічний підтип підшипників. Вони підтримують компонент у вузлі, забезпечуючи плавну роботу та зменшуючи знос машини. На відміну від підшипників, що складаються з кількох частин, втулка часто постачається як єдиний компонент. Однак вона може бути оснащена елементами кочення для ковзання або опори. Порівняно з підшипниками, втулки є більш довговічними та потребують менше обслуговування, оскільки не мають рухомих частин.

### **1.2. Різновиди ущільнення валу компресора**

Високопродуктивний відцентровий компресор – це ретельно налаштований механізм, де оптимальна продуктивність та надійність мають першочергове значення. Цілісність усієї системи, що забезпечує як надійність, так і ефективність, часто зводиться до компонента, який часто неправильно розуміють: ущільнення компресора. Поломка ущільнення – це не просто незначний витік; це пряма загроза продуктивності, безпечній роботі та прибутку

підприємству. Пошкоджене ущільнення валу компресора може призвести до незапланованого простою, катастрофічного пошкодження обладнання, викидів небезпечних технологічних газів та штрафів за шкоду навколишньому середовищу. Правильна робота компресора залежить від цієї критичної деталі.

По суті, кожне ущільнення в цьому застосуванні виконує різні та критично важливі функції:

- Утримання мастила всередині корпусу підшипника та його відсутність у технологічному потоці.
- Не допускати потрапляння атмосферного повітря в замкнуту газову систему.
- Зберігання цінного або небезпечного технологічного газу в компресорі та подалі від атмосфери.

Терміни « повітряне ущільнення », « масляне ущільнення » та « газове ущільнення » часто використовуються як взаємозамінні, що призводить до серйозних непорозумінь. Кожен з них є окремою технологією, розробленою для певної мети та конфігурації . Потрібно спостерігати еволюцію в рішеннях для герметизації, таких як розділове ущільнення , яке забезпечує вирішальний бар'єр.

### **Повітряний ущільнювач**

У типовому інтегрально-редукторному повітряному компресорі основним завданням повітряного ущільнення є запобігання забрудненню потоку технологічного повітря мастилом з високошвидкісного підшипника шестерні. Такі ущільнення зазвичай використовуються в повітряних компресорах.

Основне призначення: утримання оливи. Це ущільнення створює бар'єр між корпусом підшипника, що змащується оливою, та сухою стороною компресора, де працює робоче колесо.

**Лабіринтові ущільнення та вуглецеві кільцеві ущільнення** є найпоширенішими типами. Вони працюють, створюючи складний шлях

або вуглецеву втулку дросельної заслінки з вузьким зазором, яка обмежує міграцію повітря.

Принцип роботи: Зазвичай це «безконтактні» ущільнення. «Повітряний буфер», що подається з нагнітального отвору компресора, створює баланс тиску, який запобігає потраплянню оливи на робоче колесо. Головний вал компресора може вільно обертатися.

### **Масляне ущільнення**

Під час стискання цінних або легкозаймистих газів простого повітряного ущільнення недостатньо. Масляне ущільнення, також відоме як вологе або механічне контактне ущільнення, забезпечує позитивний бар'єр проти витоку газу. Це надійні системи для компресорних застосувань з високим навантаженням.

Основне призначення: Запобігання витоку технологічного газу з корпусу компресора. У деяких конструкціях для менш критичних функцій може використовуватися просте манжетне ущільнення.

Загальна технологія: Вузол механічного ущільнення, що складається з обертового кільця (з'єданого з валом) та нерухомого кільця (у корпусі). Між цими двома поверхнями вприскується тонка плівка олії під високим тиском.

Принцип роботи: Ця система працює на основі перепаду тиску. Ущільнювальна олива подається під тиском, трохи вищим за опорний тиск технологічного газу, який можна перевірити манометром. Це гарантує, що всередину потрапляє лише невелика кількість чистої оливи. Ці системи потребують складної допоміжної масляної консолі (насоса, фільтрів), що відповідає стандартам API 614 [1].

**Сухе газове ущільнення** — це безконтактне, сухохідне механічне торцеве ущільнення, яке зараз є промисловим стандартом. Воно забезпечує високу надійність та усуває забруднення процесу ущільнювальним маслом.

Основне призначення: запобігання витоку технологічного газу без використання олії.

Загальна технологія: картриджна система з обертовим кільцем з спіральними канавками та нерухомим сполучним кільцем. Часто конфігурація включає роздільне ущільнення для запобігання міграції оливи.

Принцип роботи: Під час обертання валу компресора канавки на обертовій поверхні вбирають газ ( азот або інші інертні гази ) та перекачують його до центру ущільнення. Це створює стиснену «газову плівку», яка розділяє поверхні на кілька мікронів (за даними Джона Крейна ), запобігаючи зносу під час роботи. Потрібна складна газова панель ущільнення, як це визначено стандартами, такими як API 692 [2].

### **Ранні ознаки та симптоми пошкодження ущільнення**

Розпізнавання ранніх симптомів деградації ущільнення є ключем до запобігання катастрофічним поломкам. Кожен тип ущільнення має унікальні попереджувальні ознаки, що впливають на загальну роботу .

Симптоми несправності лабіринтного та повітряного ущільнення:

- Олива в системі : Найбільш очевидною ознакою є видима олива на виході стисненого повітря або забруднення обладнання нижче за течією.
- Збільшення споживання оливи : незрозуміле падіння рівня мастила в резервуарі свідчить про те, що олива протікає повз повітряний затвор.
- Вібрації: Сильно зношене лабіринтне ущільнення може збільшити радіальний зазор навколо валу компресора, що сприяє підвищенню обертальної вібрації.

Симптоми несправності масляного (механічного) ущільнення:

- Потік кислої оливи: Збільшення потоку через злив кислої оливи є основним показником несправності ущільнення.

- Неможливість підтримувати перепад тиску: Якщо системі важко підтримувати необхідний перепад тиску та потоку, це вказує на значний витік на поверхнях ущільнення.

- Газ у масляному резервуарі: Сильне витікання ущільнення може призвести до потрапляння технологічного газу в масляне ущільнення, що спричиняє піноутворення.

Симптоми несправності сухогазового ущільнення:

- Високий рівень витоку через первинний вентиляційний отвір: Сигналізація високого рівня витоку на панелі ущільнювального газу є найбезпосереднішим показником проблеми з первинним ущільненням.

- Сигналізація забруднення: Сигналізація високого перепаду тиску на фільтрі ущільнювального газу вказує на забруднення подачі, що призведе до руйнування сухого газового ущільнення.

- Збільшення тиску вторинного ущільнення: У тандемній схемі ущільнення підвищення тиску в проміжній камері вказує на те, що первинне ущільнення виходить з ладу та пропускає надлишок газу до вторинного ущільнення. Це вказує на проблему з сегментом первинного ущільнення. Ці вторинні ущільнення є критично важливими для безпечної роботи.

### **Покроковий діагностичний процес**

Коли є підозра на проблему з ущільненням компресора, методичний підхід є вирішальним. Це діагностичне рішення допомагає точно визначити першопричину.

**Крок 1:** Збір та аналіз даних. Перш ніж торкатися обладнання, проаналізуйте експлуатаційні дані. Перегляньте тенденції тиску ущільнень, потоку вентиляційних отворів та швидкості споживання оливи. Повільне, але стабільне збільшення витоків вказує на поступовий знос. Порівняйте поточні показники з початковими даними введення в експлуатацію для

цієї моделі компресора . Перевірте журнали технічного обслуговування на наявність нещодавніх робіт.

**Крок 2:** Огляд на місці. Виконайте фізичний огляд обладнання. Для масляного ущільнення перевірте швидкість потоку та температуру пастки для кислій олій. Для сухого газового ущільнення спостерігайте за витратоміром на первинній вентиляційній лінії. Використовуйте ультразвуковий детектор витоків, щоб точно визначити виток газу навколо корпусу ущільнення.

**Крок 3:** Аналіз системи підтримки. Поломки ущільнень часто спричинені проблемою з їх системою підтримки.

Для масляних ущільнень: чи правильно працює консоль мастила ? Перевірте тиск і перепад тиску фільтра.

Для сухих газових ущільнень: Чи подає газова панель ущільнювального газу газ під правильним тиском та якістю? Забруднений ущільнювальний газ є головною причиною поломки сухих газових ущільнень .

### **Поширені причини та стратегії профілактики**

Ефективна програма надійності виходить за рамки реактивного ремонту та ставить перед собою проактивну профілактику для зниження витрат на технічне обслуговування. Це включає план заміни комплекту.

#### **Причина 1: Забруднене герметизуюче середовище**

Проблема: У випадку масляних ущільнень частинки мастильної оливи подряпають поверхні. У випадку газового ущільнення рідини або бруд у подачі ущільнювального газу призведуть до контакту з поверхнями. Це впливає на весь компресор.

Стратегія профілактики : Впроваджуйте ретельну програму аналізу оливи. Підтримуйте чистоту оливи на чітко визначеному рівні. Для газових систем переконайтеся, що система кондиціонування має правильний розмір, а

коалесцентні фільтри регулярно обслуговуються. Це надзвичайно важливе технічне обслуговування.

- **Причина 2:** Неправильні процедури експлуатації

Проблема : Швидкий запуск або збої в процесі роботи можуть спричинити «зворотне підвищення тиску», що призводить до катастрофічного виходу з ладу ущільнення . Повільне обертання компресора із сухим газовим ущільненням без належного тиску бар'єрного газу може призвести до контакту з поверхнею та зносу. Це стосується будь-якого застосування, від промислового компресора до кондиціонера.

Стратегія запобігання: Суворе дотримання рекомендованих виробником оригінального обладнання робочих процедур не підлягає обговоренню.

- **Причина 3:** Звичайний знос

Проблема : Вторинні ущільнювальні елементи, такі як ущільнювальне кільце та прокладка, мають обмежений термін служби.

Стратегія профілактики: Дотримуйтеся інтервалів обслуговування, встановлених виробником. Зазвичай це включає повну заміну картриджа та капітальний ремонт з використанням належного комплекту ущільнень під час капітального ремонту. Проактивна заміна цих «м'яких деталей» на сумісний комплект ущільнень набагато дешевша, ніж усунення несправності під час експлуатації. Хоча принципи схожі, зверніть увагу, що комплект ущільнень валу компресора кондиціонера дуже відрізняється від комплекту ущільнень відцентрового компресора. Повна заміна є ключовою частиною технічного обслуговування.

### **1.3. Особливості конструкції та експлуатації деталей компресорного обладнання**

Завдяки компресорним машинам вирішується велика кількість технічних завдань, основними з яких є компрімірвання газів з найрізноманітнішими фізичними властивостями, переміщення газової сировини, виробництво стисненого газу для перетворення на механічну енергію та багато іншого.

Як один з інструментів, необхідних у різних галузях промисловості, компресор виконує важливу функцію для забезпечення тиску газу або повітря в обладнанні, починаючи від побутового та закінчуючи сільськогосподарським. Нижче наведено різні функції компресора, які вам необхідно знати:

#### *1. Збільшення тиску газу або повітря*

Компресор перекачує газ або повітря з меншої камери до більшої, таким чином збільшуючи тиск. Ця функція дуже корисна в різних галузях промисловості, таких як нафтохімічна та нафтова, де газ і повітря відіграють важливу роль у виробництві.

#### *2. Подача повітря або газу для застосувань, що потребують високого тиску*

Компресори також подають повітря або газ для застосувань високого тиску, таких як перекачування води, системи охолодження та заряджання акумуляторів в електронному обладнанні. За допомогою компресора тиск повітря або газу можна підвищити до рівня, необхідного для забезпечення оптимальної продуктивності в даному застосуванні.

#### *3. Подача чистого повітря до систем управління будівлею*

Коли повітря використовується як рушійне середовище в системі керування будівлею, важливо забезпечити, щоб повітря, що надходить у систему, було чистим і не містило забруднюючих речовин.

У цьому випадку функція повітряного компресора і компресорного агрегату (КА) в цілому полягає в поданні чистого повітря до системи керування будівлею. Повітряні компресори накопичують повітря ззовні, перш ніж воно потрапить до системи керування будівлею. Таким чином, повітря в системі керування будівлею стає чистішим і може працювати ефективніше.

#### *4. Виробляє стиснене повітря у великих обсягах*

Ще однією функцією повітряного компресора є стиснення повітря або інших газів до меншого об'єму. Повітряні компресори можуть виробляти стиснене повітря, яке використовується в різноманітних інструментах.

Це пояснюється тим, що повітряні компресори можуть виробляти великі обсяги стисненого повітря, тому їх можна використовувати для застосувань, які потребують великої кількості повітря за короткий час. Це дозволяє зробити виробничий процес більш ефективним та результативним.

### **Типи компресорів**

Окрім розуміння функцій компресора, потрібно розуміти його типи, щоб була можливість правильно використовувати його відповідно до ваших потреб та цілей. Для цього потрібно ознайомитись з типами компресорів за допомогою оглядів нижче:

#### *1. Повітряний компресор*

Повітряний компресор — це тип компресора, який використовується для накачування повітря та підвищення його тиску. Повітряні компресори можуть використовуватися в різних сферах, таких як накачування автомобільних шин, заряджання акумуляторів електронного обладнання та подача повітря для пневматичних інструментів.

#### *2. Електричний компресор*

Електричний компресор – це тип компресора, який використовує електроенергію як джерело енергії для приводу двигуна. Електричні компресори зазвичай тихіші та простіші в експлуатації, ніж бензинові. Електричні компресори також можна експлуатувати в приміщенні, оскільки вони не виробляють диму та вихлопних газів, як бензинові компресори.

Однак недоліком електричних компресорів є їхня обмежена міцність та довговічність порівняно з бензиновими компресорами. Електричні компресори більше підходять для використання в легких умовах та з менш частим використанням.

#### *3. Бензиновий компресор*

Бензиновий компресор – це тип компресора, що приводиться в дію бензиновим двигуном. Бензинові компресори зазвичай використовуються, коли потрібна мобільність, наприклад, на будівельних майданчиках або фермах.

Бензинові компресори мають перевагу мобільності та здатності виробляти велику кількість повітря під тиском за короткий час. Однак недоліками бензинових компресорів є високий рівень шуму та необхідність частішого технічного обслуговування.

Досвід експлуатації компресорного обладнання вказує на те, що більшість відмов відбуваються внаслідок порушення працездатності основних вузлів: ротора компресора та масляних ущільнень.

Ротор відцентрового компресора (ВК) (рис. 1.2) це вузол, який складається з валу (1), упорного диска (2), захисних втулок (ЗВ) (3), робочих коліс (4), втулок дистанційних (5) та думісу (6).

На вал ротора, в процесі роботи та безпосередньо, діють динамічні навантаження, що позначається на експлуатаційні характеристики всього компресорного агрегату. Як правило для виготовлення валів використовують конструкційні сталі: 45, 40Х, 40ХН або леговані сталі в залежності від оточуючого робочого середовища.

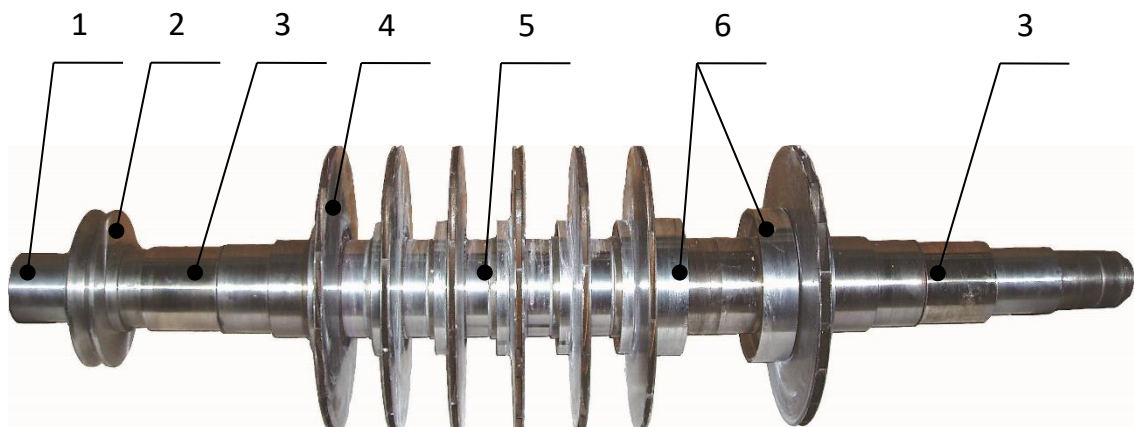


Рисунок 1.2 - Ротор відцентрового компресора 401КВД

Упорний диск існує щоб запобігати осьовому зсуву ротора, та належної установки та фіксації ротора по відношенню до статорних деталей. Він працює у парі з бабітовими колодками, враховуючи принцип рідинного тертя. Робочими поверхнями дисків є торці, до яких висуваються підвищені вимоги щодо шорсткості та твердості поверхневого шару.

Робочі колеса ВК є основним елементом його проточної частини. Вони забезпечують газодинамічні дані всього компресорного агрегату. Конструктивно робоче колесо можна розглядати як два диска з розташованими між ними лопатками, які створюють частину робочого каналу проточної частини ВК. Міжступінчасте ущільнення робочого середовища виконується завдяки мінімальному зазору між робочою поверхнею ущільнювача деталі і елементом ущільнення (рис. 1.3).

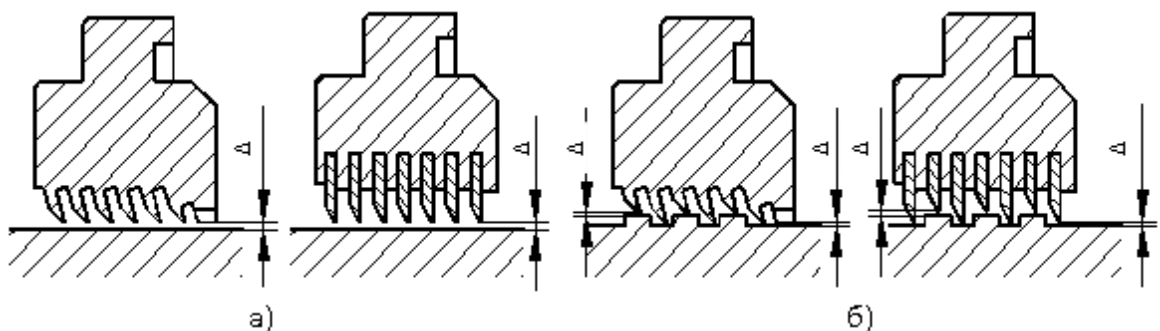


Рисунок 1.3 - Різновиди лабиринтних ущільнень: а – безступінчаста форма з'єднання збірного лабіринту; б – ступінчаста форма з'єднання;  $\Delta$  – зазор між лабиринтною втулкою та робочою поверхнею деталі

Думміс це диск на поверхню якого з одного боку діє тиск крайнього колеса, з іншого - діє тиск газу на всмоктуванні. Осьова сила ротора врівноважується різницею сил від дії обох тисків на площу думмісу.

ЗВ є основною деталлю масляного ущільнення (МУ) від працездатності якого залежить безпечна та безвідмовна робота всього КА. Ущільнювальний

вузол може зруйнуватись за рахунок впливу ряду факторів, таких як: підвищений тиск, висока температура, агресивне оточуюче робоче середовище. Тому МУ є одним із найбільш відповідальних вузлів, що забезпечують герметичність компресорного агрегату, а отже, і його надійну, безпечну та безвідмовну роботу.

На сьогодні до ущільнень висуваються дуже високі вимоги: щодо герметичності, довговічності, здатності працювати при високих значеннях технологічних параметрів (швидкості, тиску, температури та ін.).

В залежності від напрямку дії контактних тисків ущільнювальні пристрої поділяються на торцеві та радіальні. До радіальних відносяться радіальні манжетні ущільнення, радіальні сальникові ущільнення, ущільнення з плаваючими кільцями, які є одним із основних типів ущільнень роторів ВК. Їхня перевага над конструкціями безконтактних ущільнень обумовлена можливістю звести до мінімуму радіальний зазор і за рахунок цього суттєво знизити або зовсім виключити протікання ущільнення.

Для ущільнення оточуючого середовища у високооборотних ГПА широке застосування знайшли системи подачі затворного середовища, в основному масла, в яких через вузол ущільнення проходить тільки кількість затворної рідини, яке дроселювалося в ущільнювальних зазорах плаваючих кілець. Причому герметизація робочого середовища здійснюється за рахунок різниці тисків на виході компресорного агрегату та масляного ущільнення, а протікання масла здійснюється у бік газової порожнини компресора. Величина перепаду тиску підтримується в межах 0,04-0,055 МПа (в особливих випадках 0,085-0,25 МПа). На ущільненнях компресорів компанії Дрессер Кларк (США) в зовнішньому кільці (1) розташований підшипник з самовстановлюваними вкладишами (2), що покращує самоцентрування і розширює сферу динамічної стійкості ротора (рис. 1.4).

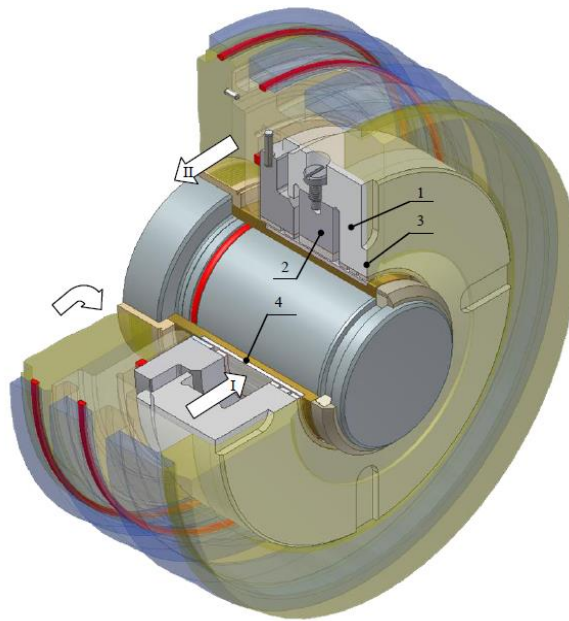


Рисунок 1.4 - МУ компресора фірми Дрессер Кларк: I – камера підведення буферної рідини; II – змішувальна камера

На торцевій поверхні розташований додатковий упорний пояс (3), що знижує небезпеку розкриття кутового стику. У корпусі кільце встановлено з малим радіальним зазором, що виконує функцію зовнішнього гасіння циліндричних коливань. Циліндричні ущільнюючі поверхні плаваючих кілець залиті бабітом, а робоча поверхня ЗВ (4), виготовленої з монель-металу, а поверхня покрита твёрдосплавним матеріалом (Хастелой D) методом плазмового напилення.

Робота МУ залежить від матеріалів, що застосовуються при його виготовленні. Основними деталями, що забезпечують герметизацію робочого середовища, а також безпосередньо впливають на працездатність вузла в цілому, є пара – «вкладиш – захисна втулка» (рис. 1.5).

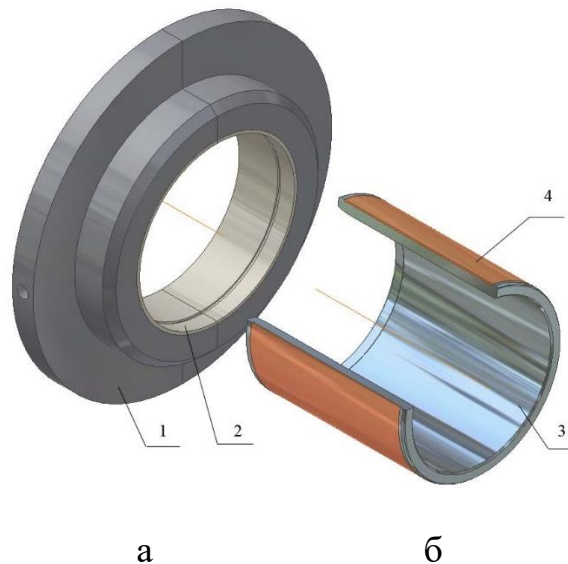


Рисунок 1.5 - Ущільнювальна пара тертя МУ: а - "вкладыш"; б - "ЗВ".

1 – підлога вкладишу; 2 – антифрикційне покриття; 3 – підлога ЗВ;

4 – тверде зносостійке покриття

Вибір матеріалів деталей МУ залежить від умов роботи КА.

Вкладыш є тілом обертання (рис 1.5, а), основа якого виконана, як правило, зі сталі 20, або сірого чавуну СЧ10. На внутрішню поверхню вкладишу нанесено антифрикційне покриття з бабіту марки Б83 або Б88.

ЗВ є також тілом обертання. Вона складається з основи та зносостійкого покриття (рис. 1.5, б). ЗВ працює у дуже важких умовах: агресивного оточуючого середовища, несприятливого температурного режиму роботи і витримує тиск до 35-40 МПа. У МУ компресорів, працюючих в умовах агресивного оточуючого середовища, в якості матеріалу основи ЗВ використовують монель-метал (сплав на основі нікелю, що містить як основний легуючий елемент 27-37 % міді). Цей сплав корозійностійкий, високоміцний і має гарну пластичність як у гарячому так і холодному станах (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Експлуатаційно-технологічні властивості деталей ВК

Назва деталі	Матеріал	Види зносу	Поверхі що зношуються	Технологічні методи зміцнення робочих поверхонь
Вал	40X, 40XH*	Механічний	Підшипникові шийки	СВЧ Азотування
Диск упорний	38ХМЮА Сталь 20	Механічний	Торцеві поверхні	Азотування Цементация
ЗВ масляних ущільнень	Монель-метал*	Кавітаційний, корозійний, механічний	Зовнішній діаметр	Нанесення покриття + оплавлення в вакуумній камері
Втулки дистанційні	40X, 30X13*	Механічний	Зовнішній діаметр (поверхня ущільнення)	Термообробка
Колесо	Вибирають з умов роботи	Механічний	Зовнішній діаметр (поверхня ущільнення)	Термообробка *
Думіс	40X, Сталь 20*	Механічний	Зовнішній діаметр (поверхня ущільнення)	Термообробка Цементация

\* Може бути змінено залежно від робочого середовища та технологічного методу утворення поверхонь.

Як попередньо підкреслювалось, для збільшення надійності і довговічності роботи ЗВ на її робочу поверхню плазмовим напиленням або вакуумним наплавленням наноситься зносостійкий композиційний матеріал на основі нікелю - Хастелой.

Аналіз таблиці 1.1 показав, що ЗВ МУ працюють в найбільш важких умовах, технологія їх виготовлення складна, а матеріали мають високу вартість. У зв'язку з цим існує проблема удосконалити технологію виготовлення ЗВ відцентрових компресорів.

#### 1.4. Висновки:

1. Проведений аналіз різних конструкцій і призначення різновидів ущільнень валів відцентрових компресорів.

2. Аналіз деталей роторів ВК показав, що ЗВ масляних ущільнень працюють в найбільш важких умовах, технологія їх виготовлення складна, а матеріали мають високу вартість.

3. Визначено, що існує проблема удосконалення технології виготовлення ЗВ відцентрових компресорів.

### **1.5. Мета та завдання проведення необхідних досліджень**

**Метою** магістерської дипломної роботи є підвищення надійності та довговічності захисних втулок масляних ущільнень відцентрових компресорів, шляхом удосконалення технології їх виготовлення, за рахунок використання сучасних, комбінованих екологічно безпечних методів.

Для того, щоб досягнути поставленої мети потрібно вирішити ряд **завдань**:

- провести аналіз умов роботи, та видів зносу ЗВ;
- провести аналіз сучасних та екологічно безпечних методів виготовлення та зміцнення поверхневих шарів ЗВ;
- розробити методику проведення досліджень;
- провести порівняльні випробування.

## **РОЗДІЛ 2**

### **УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАХИСНИХ ВТУЛОК МАСЛЯНИХ УЩІЛЬНЕНЬ ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРИВ**

#### **2.1. Аналіз умов роботи, та видів зносу ЗВ**

Робота МУ залежить від відмінності тисків рідини, яка замикається, та оточуючого робочого середовища, що повністю виключає попадання агресивних газів в навколишнє середовище. Для протидії робочому середовищу, тиск якого на виході КА становить 35-40 МПа, в замикаючу камеру подається олія, під

тиском на 0,035-0,05 МПа вище чим тиск робочого газу (рис. 2.1). В результаті , під дією тиску внутрішнє кільце (5) притискається до валу (3); зовнішнє кільце (2) входить у контакт з корпусом (1) і утворює герметичну замикаючу камеру. Для запобігання влученню робочого середовища між захисною втулкою (4) і валом (3) передбачене гумове кільце (ущільнення) (6), виготовлене з спеціальної кислотостійкої гуми.

Сукупність факторів: малі зазори між внутрішнім кільцем (5) і ЗВ (4), високий тиск ущільнюючого середовища, високі частоти обертання валу (3) (до 12000 об/хв), зумовлюють підвищене нагрівання внутрішніх кілець ущільнювачів. В результаті мінімальний зазор між плаваючими кільцями та ЗВ встановлюється таким, щоб забезпечити витрату затворної рідини, необхідної для охолодження внутрішнього та зовнішнього кілець.

Збільшення розрахункового зазору, пов'язаного зі зношуванням робочої поверхні ЗВ (4), призводить до збільшеного витрати ущільнювальної рідини, що, у свою чергу, може призвести до перегріву зовнішніх і внутрішніх плаваючих кілець. Підвищення температури може викликати оплавлення антифрикційного бабітового шару плаваючих кілець і призвести до передчасного виходу з ладу ущільнення.

Істотний вплив на інтенсивність зношування робочої поверхні ЗВ надає робоче середовище. В результаті відбувається поверхневий знос в результаті дії різних за величиною та інтенсивністю актів руйнування та змін механічних та фізико-хімічних властивостей поверхневого шару ЗВ.

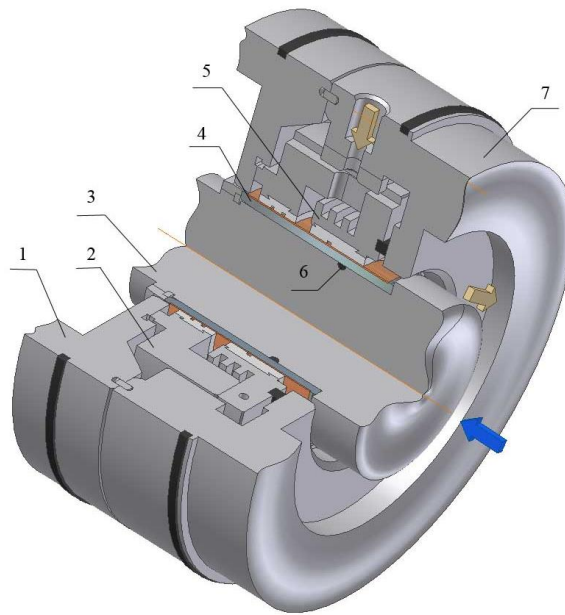


Рисунок 2.1 – МУ відцентрового компресора:

← - підведення та відведення олії в ущільненні;

← - напрямок дії робочого середовища.

Аналіз літературних джерел показав, що поверхневі шари ЗВ підлягають корозійному, кавітаційному та механічному зношуванню.

**Корозійне зношування** – це тип серйозного пошкодження поверхні, що виникає, коли спільна дія механічного зношування та хімічного впливу призводить до втрати матеріалу та пошкодження поверхні. Цей механізм зношування зазвичай спостерігається в системах, що піддаються впливу агресивних середовищ, таких як хімічна обробка, морське суднобудування, видобуток нафти та газу, а також аерокосмічна промисловість. При корозійному зношуванні хімічна або електрохімічна реакція з навколишнім середовищем є значною, і поєднання корозії та зношування може відбуватися як по черзі, так і одночасно.

Корозійне зношування можна визначити як втрату матеріалу або зміну морфології поверхні внаслідок синергетичної дії механічного зношування та електрохімічної атаки, що призводить до прискореної деградації матеріалу та

його руйнування. Терміни, які часто використовуються як синоніми цього виду руйнування металу, включають хіміко-механічне зношування, хімічно підтримане зношування та трибокорозію.

### *Що спричиняє корозійне зношування?*

Існують різні фактори, що впливають на дію корозійного зношування в промисловому застосуванні. Ці змінні включають:

#### Навколишнє середовище

Значною мірою впливовим фактором на швидкість, з якою може відбуватися зношування внаслідок корозії, є робоче середовище. Хімічний склад, температура та вологість можуть суттєво впливати на швидкість хімічного впливу, що, своєю чергою, впливає на ступінь зносу.

#### Властивості матеріалу

Корозійна стійкість, твердість та опір втомі матеріалів відіграють значну роль у визначенні їхньої схильності до корозійного зношування.

#### Хімія поверхні

Хімічні властивості поверхні, такі як пасивність та наявність поверхневих плівок, можуть впливати на процес корозії та, як наслідок, на зношування.

#### Електрохімічні фактори

Електрохімічні властивості матеріалів, такі як гальванічний потенціал та потенціал корозії, можуть впливати на швидкість корозійного зношування, визначаючи електрохімічні реакції, що відбуваються на поверхні.

### *Зменшення корозійного зносу*

Корозійне зношування, що виникає внаслідок комбінованого впливу механічного зношування та хімічного впливу, може значно погіршити стан поверхонь матеріалів. Щоб зменшити цю проблему, розгляньте такі стратегії:

#### Вибір матеріалу

Використовуйте корозійностійкі сплави, такі як нержавіюча сталь, титан або сплави на основі нікелю, а також композитні матеріали, що поєднують метали з корозійностійкими елементами для підвищення довговічності.

### Захисні покриття

Дослідіть покриття TDC для твердої, зносостійкої та захисної від корозії поверхні, нікелювання для рівномірного, корозійностійкого шару на складних геометріях, а також керамічні покриття для високотемпературних застосувань, де потрібна як зносостійкість, так і корозійна стійкість.

### Контроль навколишнього середовища

Підтримуйте стабільну температуру та вологість, щоб зменшити корозійні реакції та обмежити вплив хімічних речовин, використовуючи бар'єри або огорожі.

### *Регулярне технічне обслуговування:*

Проводьте планові огляди, щоб виявити ранні ознаки зносу та корозії для своєчасного втручання, а також очищуйте та змашуйте, щоб мінімізувати тертя та запобігти прилипанню агресивних речовин.

### Роль втулок валу в роботі компресора або насоса

Втулки валу служать захисними покриттями для валу компресора або насоса, захищаючи його від зносу, корозії та потенційних пошкоджень, спричинених повітрям, газом або рідиною, що перекачується, або механічними ущільненнями. Ці втулки зазвичай мають циліндричну форму та встановлюються на вал у місцях, схильних до стирання або хімічного впливу.

### Використання втулок валу пропонує кілька переваг:

Захист від зносу та корозії : Діючи як бар'єр між валом та оточуючим середовищем, втулки запобігають прямому контакту, тим самим зменшуючи ризик корозії та механічного зносу.

Простота обслуговування: Заміна зношеної втулки валу є більш економічно ефективною та менш трудомісткою, ніж заміна всього валу, що призводить до зменшення часу простою та витрат на обслуговування.

Покращена герметичність: Втулки валу забезпечують гладку поверхню для роботи ущільнень, що покращує ефективність герметизації та зменшує ймовірність витоків.

Збільшений термін служби валу: Зменшуючи прямий вплив суворих умов експлуатації, втулки валу сприяють подовженню терміну служби валу насоса.

Основними факторами, що впливають на термін служби деталей компресорів та насосів, є розмір твердих частинок, їх форма, твердість, концентрація, кут удару, швидкість обертання, конструкція компресора або насоса та вибір матеріалу. Знос сильно залежить від швидкості обертання, розміру частинок та концентрації твердих частинок. Знос може виникати через стирання, ерозію та корозію, де ерозійний знос є основним явищем зносу.

**Кавітація** в механіці рідин та інженерії зазвичай є явищем, при якому статичний тиск рідини падає нижче тиску пари рідини, що призводить до утворення невеликих порожнин, заповнених парою, в рідині. Під впливом вищого тиску ці порожнини, які називаються «бульбашками» або «порожнечами», руйнуються та можуть генерувати ударні хвилі, які можуть пошкодити обладнання. Процес утворення цих порожнин називається кавітацією. Якщо порожнини переміщуються в області вищого тиску (нижчої швидкості), вони вибухають або руйнуються. Ці ударні хвилі сильні, коли вони знаходяться дуже близько до бульбашки, що вибухнула, але швидко слабшають, поширюючись від місця вибуху. Тому кавітація є значною причиною зносу в деяких інженерних контекстах. Порожнечі, що вибухають поблизу металевої поверхні, викликають циклічне напруження через повторну вибухову реакцію. Це призводить до поверхневої втоми металу, що спричиняє тип зносу, який також називають «кавітацією».

Кавітацію зазвичай поділяють на два класи поведінки. Інерційна (або тимчасова) кавітація – це процес, при якому порожнина або бульбашка в рідині швидко стискається, створюючи ударну хвилю. У вироблених об'єктах вона може виникати в регульовальних клапанах, насосах, пропелерах та крильчатках [ 3 ]. Неінерційна кавітація – це процес, при якому бульбашка в рідині змушена коливатися за розміром або формою через певну форму введення енергії, таку як акустичне поле. Газ у бульбашці може містити частину газу, відмінного від пароподібної фази рідини. Така кавітація часто використовується в ультразвукових ваннах для очищення, а також може спостерігатися в насосах, пропелерах тощо.

Виходячи з термодинамічної діаграми фазового переходу, підвищення температури може ініціювати відомий механізм фазового переходу, відомий як кипіння. У замкнутій флюїдній системі, де не виявлено витoku потоку, зменшення площі поперечного перерізу призведе до збільшення швидкості та, отже, до падіння статичного тиску. Це принцип роботи багатьох гідродинамічних реакторів на основі кавітації для різних застосувань, таких як очищення води, збір енергії, покращення теплопередачі, переробка харчових продуктів тощо [ 4 ].

Існують різні схеми потоку, що виявляються під час розвитку кавітаційного потоку: зародження, розвинений потік, суперкавітація та дросельний потік. Після суперкавітації система не здатна пропускати більше потоку. Отже, швидкість не змінюється, поки тиск вище за течією зростає. Це призведе до збільшення кавітаційного числа, що показує, що відбувся дросельний потік. [ 5 ]

При неконтрольованому стані кавітація є шкідливою; однак, контролюючи потік кавітації, можна використовувати її енергію неруйнівно. Контрольовану кавітацію можна використовувати для посилення хімічних реакцій або поширення певних неочікуваних реакцій, оскільки в процесі

утворюються вільні радикали внаслідок дисоціації парів, що утримуються в кавітуючих бульбашках. [ 6 ].

**Механічне зношування** – це найпростіший тип деградації. Воно відбувається щоразу, коли деталі або частинки труться або вдаряються одна об одну. Згодом дрібні шматочки матеріалу відпадають, що ще більше прискорює процес. Деформуючий ефект дрібних частинок або поверхневих виступів під час тертя створює абразивне зношування. Це відбувається, коли один матеріал твердіший за інший, а м'якший є жертвою. Три основні механізми абразивного зношування:

- Різання – видалення матеріалу.
- Фрагментація – наслідок різання, утворення тріщин, а подальше зношування відламує шматки.
- Оранка – зміщення матеріалу в сторони у напрямку скребання

Абразивні частинки можуть потрапляти в систему разом із мастилом, з повітря або бути уламками від попереднього зносу. Абразивне зношування становить небезпеку в багатьох галузях, де можна знайти такі дрібні фрагменти. Деякими прикладами є сільськогосподарська та будівельна техніка.

## **2.2. Аналіз сучасних та екологічно безпечних методів виготовлення та зміцнення поверхневих шарів ЗВ**

Нещодавній прогрес у металургії сталі підвищив межу текучості традиційних сталей до понад 2 ГПа разом із надзвичайною пластичністю та в'язкістю, що особливо важливо для автомобільної та передової аерокосмічної промисловості, де легка вага часто є пріоритетом [ 7 ]. Зі вступом у нову еру промислової революції. Виробництво традиційних сплавів почало трансформуватися в більш розумну виробничу систему, зосереджену на децентралізованому виробництві з акцентом на цифровізацію, автоматизацію та

інтеграцію людина-машина. Поточні сталі з міцністю 2 ГПа розроблені на основі традиційних методів виробництва сталі зі складними обробними процесами, такими як гаряча обробка та холодна прокатка, які по суті непрактичні в сучасному передовому виробництві сплавів за допомогою адитивного виробництва. Таким чином, необхідна розробка нових передових стратегій проектування сталі. Передові сталі також повинні мати хороші механічні властивості в застосуваннях, що включають екстремальні умови експлуатації, такі як ядерні термоядерні електростанції та дослідження космосу. Передові сталі, що демонструють ефект пам'яті форми, також важливі в інтелектуальних конструкційних застосуваннях, особливо в антисейсмічних демпферах та саморегульованих лопатках турбін. Постійний розвиток передових сталей має вирішальне значення для розвитку соціальної економіки.

Наноструктуровані сталі визначаються як вдосконалені сталі, що складаються з нанорозмірних елементів з великим співвідношенням площі межі розділу до об'єму понад  $0,04 \text{ nm}^{-1}$  [8]. Традиційно, розробка наноструктурованих сталей в основному зосереджена на подрібненні зерна, такому як виробництво наноструктурованих сталей з нанорозмірними зернами шляхом інтенсивної пластичної деформації. На жаль, на сучасному етапі сталі, зміцнені осадами, отримані методом адитивного виробництва, мають відносно низьку межу текучості в діапазоні  $\sim 1000 \text{ МПа}$ , можливо, через утворення м'якого аустеніту або укрупнення мікроструктури внаслідок повторюваного термоцикування під час процесу друку [9]. Крім того, адитивне виробництво не включає процес кування, як у звичайному виробничому процесі, що призводить до великих розмірів зерна. Подрібнений розмір зерна важливий для забезпечення додаткового зміцнення наноструктурованих сталей завдяки зміцненню Холла-Петча [10]. Таким чином, для покращення термічної стабільності та уточнення розміру зерна необхідний новий рецепт наноструктурованої сталі для передового виробництва.

Створення універсального, економічного та високотехнологічного способу збільшення терміну служби як зношених, так і нових деталей стало актуальним

завданням. До таких методів належить наноструктурування поверхневих покриттів, яке можна виконати методом електроіскрового легування. Метою дослідження [11] є вивчення можливостей електроіскрового легування при наноструктуруванні поверхневого шару вуглецевих сталей. Автори провели дослідження поверхневого шару вуглецевої сталі 35 з покриттями, отриманими методом електроіскрового легування на установці BIG-1 з різними матеріалами (Cu, Zn, W та WC) та за різних режимів. Для дослідження поверхневого шару елементний склад вивчали методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії, профіль поверхні вивчали методом профілювання, металографічних досліджень та вимірювань мікротвердості. Автори виявили, що хімічний склад легуючого електрода та режими обробки мають прямий вплив на насичення поверхневого шару легуючими елементами, параметри профілю обробленої поверхні, суцільність та механічні властивості покриття. Було виявлено, що жорсткіші режими обробки підвищують продуктивність, але знижують механічні властивості. Також було виявлено, що модифікована структура основного матеріалу містить наноструктуровані елементи внаслідок електроскопічного легування. Різке збільшення механічних властивостей матеріалу покриття дозволяє припустити, що в покритті присутні елементи наноструктурного діапазону. Проведене дослідження показує, що метод електроскопічного легування може бути використаний для наноструктурування поверхневого шару вуглецевих сталей.

В [12-14] досліджували процеси наноструктурування методом ЕІЛ. Досліджені і проаналізовані технології формування структури покриттів при легуванні заліза Армко електродами інструментами з молібдену і використанням спеціальних технологічних насичуючих середовищ складів: 1 – однотінні рівномірно розташовані вуглецеві нанотрубки (РРВН) типу Tuball Ocsial (0.01 %); 2 – однотінні РРВН типу Tuball Ocsial (0.6 %) в полікарбонаті. Дослідженнями доведений позитивний вплив рівномірно розташованих вуглецевих нанотрубок на якість покриттів, наприклад, використання нанотрубок

типу Tuball Ocsial (0.01 %) дозволяє збільшити твердість покриття з 446 до 1438 HV, тобто у 3 рази.

Одним із актуальних завдань матеріалознавства є підвищення опору втомі матеріалів, що використовуються при створенні перспективних та сучасних конструкцій. Відомо, що формування ультрадрібнозернистої (УДЗ) структури призводить до помітного підвищення механічних властивостей металевих матеріалів, але збільшення міцності не супроводжується відповідним збільшенням опору втомі. Ще однією особливістю високоміцних сплавів є їх підвищена чутливість до концентраторів напружень та параметра шорсткості поверхні. Як правило, втомне руйнування починається з утворення поверхневих дефектів, що перетворюються на тріщини, і відповідно, стан поверхні відіграє важливу роль у поведінці виробу при втомі. Методи поверхневої пластичної деформації дозволяють підвищити рівень властивостей та якості поверхні, серед яких варто виділити безабразивну ультразвукову фінішну обробку (БУФО) - імпульсно-зміцнювальне оброблення з використанням ультразвукових коливань. Аналіз поверхневих залишкових напружень показує, що після БУФО у вибраному режимі на поверхні утворюються переважно стискаючі залишкові напруження, що досягають 245 МПа. Випробування на втому показали, що обробка технічно чистого титану в ультрадрібнозернистому стані методом БУФО призводить до збільшення межі втоми до 20%. Так, на вибраній випробувальній базі межа витривалості зразків, отриманих методом ультразвукового оздоблення (діаметр 10 мм, канавка глибиною 2,5 мм з R=2 мм та кутом 80°) з БУФО досягає  $\sigma_{-1} = 490$  МПа, а без обробки  $\sigma_{-1} = 400$  МПа.

Таким чином, на підставі вище проведених досліджень літературних джерел слід відмітити, що для підвищення надійності і довговічності ЗВ масляного ущільнення ВК потрібно сформувати на ній поверхневий шар, який буда складатися з наноструктурування методом ЕІЛ з подальшою поверхневою безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою (БУФО). В якості основи потрібно використовувати нержавіючу ерозійностійку сталь 12Х18Н10Т, яка пластична і по своїм механічним властивостям не уступає монель-металу.

### 2.3. Методи і результати досліджень. Порівняльні дослідження

Під час виготовлення спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС), що містить нано частинки, в якості зв'язки середовища часто вживають полімери, а в якості наноаповнювача матриці вживають вуглецеві нанотрубки, які рівномірно розподіляються в об'ємі полімеру методом диспергування, як правил використовуючи ультразвук (УЗ).

Процес нанесення наноматеріалів методом ЕІЛ відбувається за три етапи:

1. На поверхню зразка з Армко заліза і сталі 12Х18Н10Т, розміром 15х15х8 мм методом ЕІЛ електродом-інструментом (ЕІ) з молібдену наносять покриття:

2. На отриману поверхню наносять попередньо підготоване СТНС в вигляді одностінних вуглецевих нанотрубок Tuball Ocsial (0,01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху510 без затверджувача.

3. Не чекаючи висихання СТНС, поверхню обробляють методом ЕІЛ, використовуючи ЕІ з молібдену при тій самій енергії розряду.

В якості ЕІ використовують молібденовий дріт Ø3,5 мм і довжиною 30-35 мм.

Покриття молібденовим ЕІ наносили на установці моделі «Елітрон-22А» при енергії розряду,  $W_p = 0,13$  Дж.

Після нанесення покриття проводили обробку поверхні методом БУФО.

Після ЕІЛ визначали шорсткість поверхні за допомогою приладу профілографу - профілометру мод. 201 заводу «Калібр». Металографічні і дюрOMETричні дослідження проводили по стандартних методиках і на відповідному обладнанні.

Покриття, сформовані на зразках з Армко заліза і сталі 12Х18Н10Т, складаються з молібдену і полімеру, в якому розташовані наночастинки.

Під час дослідження неметалевих матеріалів за допомогою сканувального електронного мікроскопа виникають труднощі через низьку або відсутню відбивну здатність електронів. Для усунення цієї проблеми на поверхню зразка наносили тонкий (декілька ангстрем) шар золота за допомогою пристрою JFC-1100E (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Фотографія пристрою JFC-1100E

### *Зносостійкість зразків*

Для визначення впливу покриттів на величину зносу зразків з Армко заліза і сталі 12Х18Н10Т була виконана установка, яка розташовувалась на столі свердлильного верстата (рис. 2.3). Зразки закріплювали в пристрої, який забезпечував їх самоустановку (торець контртіла, виконаного з бронзової трубки, щільно прилягав до поверхні зразка). Бронзову трубку, розміром  $\varnothing 12 \times \varnothing 4$  мм і  $l = 60,0$  мм, закріплювали в шпинделі верстата.

Зношування визначували за допомогою методу штучних баз по різниці глибини відбитків, які наносили на приладі Віккерса і виміряли перед і після проведення випробувань. Швидкість ковзання складала 1,0 м/с, а питомий тиск був 4,0 МПа. Величину зносу відмічували через кожні 64 хв, продовж 320,0 хв .

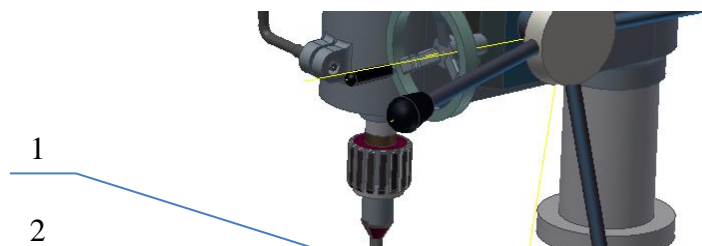


Рисунок 3 – Пристрій для порівняльних іспитів: 1 – бронзова втулка; 2 – досліджуваний зразок; 3 – прилад для забезпечення самоустановки зразка

### **Результати досліджень**

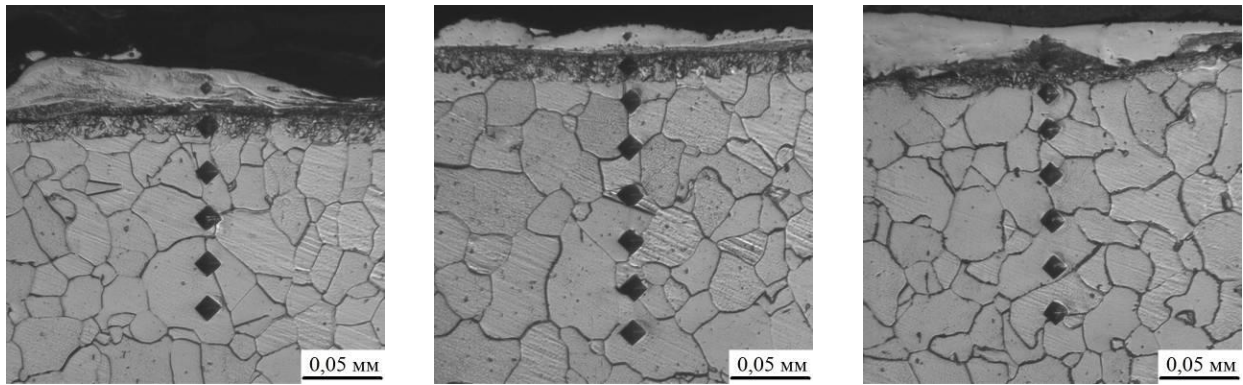
При аналізі особливостей формування структур покриття при ЕІЛ заліза Армко молібденовим ЕІ з СТНС, в яких одностінні рівномірно розташовані вуглецеві нанотрубки (РРВН) мають склад:

1 – Tuball Ocsial (0.01 %);

2 – Tuball Ocsial (0.6 %) в полікарбонаті,

встановлено, що покриття також складаються із «білого» шару, дифузійної (перехідної) зони та основи (рис. 2.4).

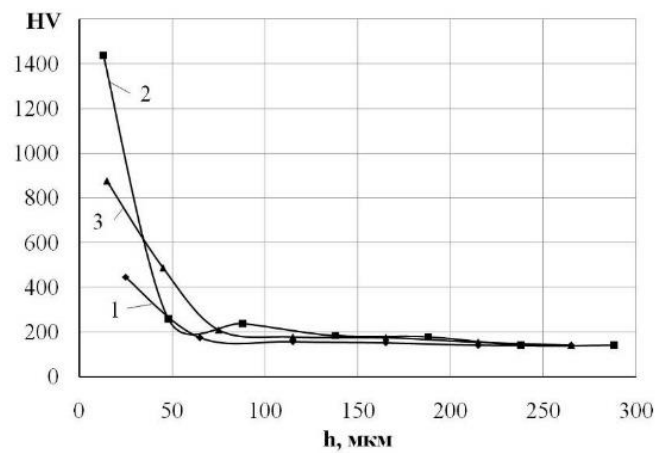
Завдяки нанотрубеам Tuball Ocsial у кількості 0.01 % в СТНС підвищується суцільність покриття, його товщина та твердість з 446 до 1438 НV, тобто у 3 рази. Подальше збільшення кількості наночастинок до 0,6% не призводить до підвищення твердості покриття (див. табл. 2.1).



а

б

в



Г

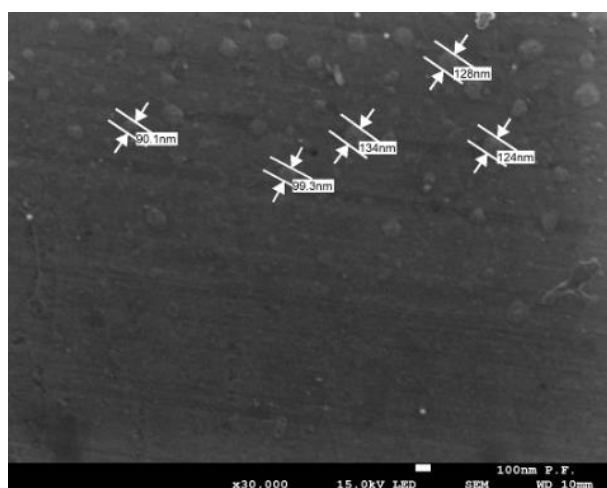
Рисунок 2.4 – Зображення структур (а-в) і розташування мікротвердості в залежності від глибини (г) зразків з Армко заліза: а – без СТНС; б – при використанні однострінних РРВН типу Tuball Ocsial (0.01 %); при використанні однострінних РРВН типу Tuball Ocsial (0.6 %) в полікарбонаті; (г): 1 – без СТНС; 2 – Tuball Ocsial (0.01 %); 3 – Tuball Ocsial (0.6 % )

При введенні в СТНС РРВН типу Tuball Ocsial (0,6%) в структурі покриття з'являються включення 90-130 нм (рис. 2.5).

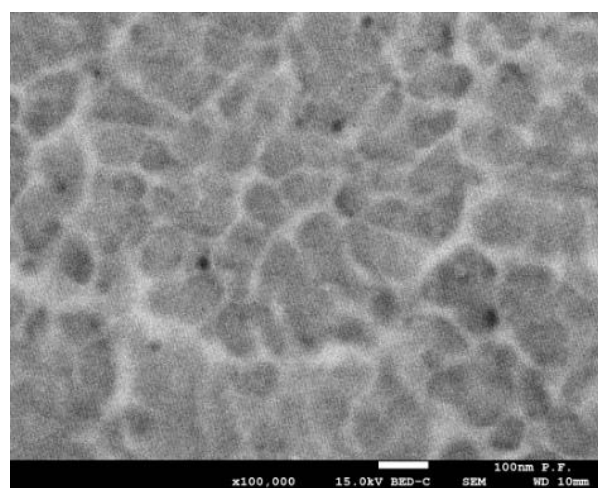
Аналіз зображення поверхонь зразків після легування ЕІ з молібдену і з використанням СТНС показав, що при збільшенні  $W_p$  формуються покриття з збільшеною суцільністю, хоча і з підвищеною шорсткістю поверхневого шару. В покриттях присутні включення нанорозміру, які рівномірно розподілені в поверхневому шарі.

Таблиця 2.1 – Зведені параметри якості покриттів, сформованих при енергії розряду,  $W_p = 0,13$  Дж

Матеріали ЕІ, і деталі	Склад СТНС	Глибина шару, мкм	Мікротвердість шару, HV	Суцільність покриття, %	Шорсткість, Ra, мкм
катод – Армко залізо, анод – молибден	без СТНС	25	446,0	50	0,98
Катод – сталь 12Х18Н10Т, анод – Мо	без СТНС	30	715	65	1.1
катод – Армко залізо, анод – молибден (етап I – ЕІЛ молибден, етап II – нанесення СТНС, етап III – ЕІЛ молибден)	одностінні рівномірно розташовані вуглецеві нанотрубки типу Tuball Ocsial (0.01 %)	35,0	1438,0	80	1,72
	одностінні РРВН типу Tuball Ocsial (0.6 %)	45,0	949,0	40	1,85
Катод – сталь 12Х18Н10Т, анод – молибден (етап I – ЕІЛ молибден, етап II – нанесення СТНС, етап III – ЕІЛ молибден)	одностінні рівномірно розташовані вуглецеві нанотрубки типу Tuball Ocsial (0.01 %)	40	1632	75	1.60



а



б

Рисунок 2.5 – Мікроструктури покриттів на зразках з Армко заліза після ЕІЛ, з РРВН типу Tuball Ocsial (0.6 %) в полікарбонаті: збільшення: а – 30 000 крат, б – 100 000 крат

Результати проведення порівняльних іспитів представлені на рисунку 2.6 і зведені в таблиці 2.2.

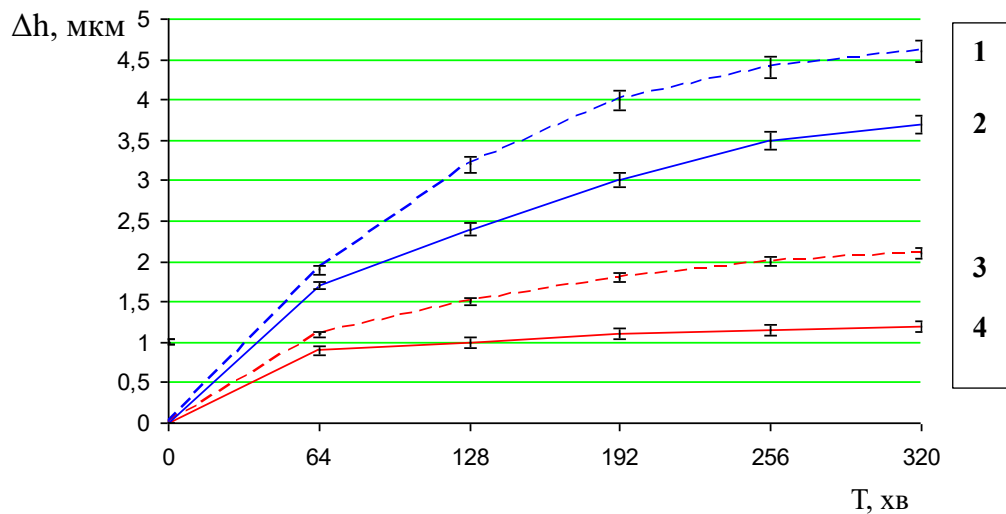


Рисунок 2.6 – Лінійне зношення зразків: з заліза Армко: 1- без покриття, 3 – з покриттям молібден – СТНС – молібден, 2 - сталь 12X18Н10Т: без покриття, 4 - з покриттям молібден – СТНС – молібден

Таблиця 2.2 – Знос зразків заліза Армко і сталі 12X18Н10Т

Матеріал зразка	Склад покриття	Твердість	Величина зносу, мкм
Залізо Армко	Молібден	446	3,6
Залізо Армко	Молібден + нанотрубки типу Tuball Ocsial (0.01 %) + молібден	1438	1,7
Сталь 12X18Н10Т	Молібден	715	2,3
Сталь 12X18Н10Т	Молібден + нанотрубки типу Tuball Ocsial (0.01 %) + молібден	1632	0,6

В результаті аналізу рисунка 2.6 і таблиці 2.2 можна відмітити, що кращі результати показали зразки зі сталі 12X18Н10Т з покриттям з молібдену і рівномірно розташованими вуглецевими нанотрубками типу Tuball Ocsial (0.01 %) в полікарбонаті. Їх знос після 320 хв іспитів складає 0,6 мкм, що в 2,8 рази

менш чим у зразків з заліза Армко з таким самим покриттям і який складає 1,7 мкм. Він також, відповідно в 6,0 і 3.8 раз менше чим у зразків з заліза Армко і сталі 12X18H10T з покриттями нанесеними молібденовим електродом інструментом. Слід відмітити, що спочатку процесу зношування фіксується найбільший знос, який поступово зменшується. Характер кривих в першому наближенні нагадує експоненційну залежність.

На рисунку 2.7, а показані ЗВ масляних ущільнень, виготовлені зі сталі 12X18H10T і втулка напресована з натягом на вал ротора відцентрового компресора з комбінованим покриттям молібден – СТНС (з рівномірно розташованими вуглецевими нанотрубками типу Tuball Ocsial (0.01 % в полікарбонаті) – молібден з подальшою обробкою БУФО.



а



б

Рисунок 6.12 – а - ЗВ масляних ущільнень, б – ЗВ, напресована з натягом на вал ротора ВК з комбінованим покриттям: молібден – СТНС – молібден з подальшою обробкою БУФО

## 2.4. Висновки

1. В результаті проведеного аналіз умов роботи та видів зносу ЗВ, встановлено, що вона працює в важких умовах агресивного оточуючого середовища і її основними видами зносу є корозійне, кавітаційне та механічне зношування.

2. Найбільш перспективною технологією підвищення надійності і довговічності ЗВ масляного ущільнення ВК є наноструктурування методом ЕІЛ з подальшою поверхневою безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою (БУФО).

3. В якості основи потрібно використовувати нержавіючу сталь 12Х18Н10Т, яка пластична і по своїм механічним властивостям не уступає монель-металу.

4. Розроблена методика проведення досліджень дозволила удосконалити технологію підвищення надійності і довговічності поверхонь ЗВ масляних ущільнень відцентрових компресорів.

5. В результаті проведених порівняльних досліджень встановлено, що кращі результати показали зразки зі сталі 12Х18Н10Т з покриттям з молібдену і рівномірно розташованими вуглецевими нанотрубками типу Tuball Ocsial (0.01 %) в полікарбонаті. Їх знос після 320 хв іспитів складає 0,6 мкм, що в 2,8 рази менш чим у зразків з заліза Армко з таким самим покриттям і, відповідно в 6,0 і 3.8 раз менше чим у зразків з заліза Армко і сталі 12Х18Н10Т з покриттями нанесеними молібденовим електродом інструментом.

## РОЗДІЛ 3

### ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ХІМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

#### 3.1. Загальні положення

**Механічні ущільнення** є свідченням точної інженерії у вимогливому середовищі операцій що проводяться в АПК при хімічній обробці рослин, харчовій промисловості тощо. Ці компоненти служать охоронцями машин, маючи життєво важливе завдання утримувати рідини, запобігати витокам та підтримувати цілісність тиску.

У середовищах, де навіть найменші дефекти можуть призвести до значних небезпек, вибір ідеального ущільнення – це не просто вибір, а рішучий вчинок для оптимальної функціональності та захисту активів і персоналу. Галузь визнає, що нафтогазовий сектор, сповнений високого тиску, агресивних речовин і легких температур, потребує спеціалізованих рішень для ущільнення. Ці рішення повинні не лише враховувати такі суворі умови, але й процвітати в них, забезпечуючи безперервність та ефективність у пошуку енергетичних ресурсів.

Статистика стверджує, що несправності ущільнень призводять до 34% промислових аварій.

Хімічні переробні підприємства є складними середовищами з високим рівнем ризику. Належне обслуговування промислового обладнання та суворі заходи безпеки є надзвичайно важливими. Однак одна маловідома небезпека продовжує спричиняти серйозні інциденти: вихід з ладу ущільнень. Дані галузі показують, що 34% промислових аварій, пов'язаних з небезпечними хімічними речовинами, трапляються через несправні або зношені ущільнення. Ці несправності наражають на небезпеку здоров'я працівників, шкодять навколишньому середовищу та спричиняють дорогі простой в експлуатації.

### **3.2. Прихований ризик пошкодження ущільнень**

У процедурах безпеки на хімічних заводах ущільнення відіграють життєво важливу роль у стримуванні небезпечних матеріалів. Вони запобігають витокам з насосів, трубопроводів і клапанів. Вихід з ладу ущільнення може мати негайні та серйозні наслідки. Причини включають несумісність матеріалів, неналежне встановлення та тривале зношування. Наслідки можуть варіюватися від хімічних опіків та респіраторних проблем до забруднення навколишнього середовища.

Раптовий витік може призвести до потрапляння небезпечних парів або рідин на робоче місце. Ризики від впливу включають:

- Ураження шкіри та очей від агресивних хімічних речовин.
- Ураження дихальних шляхів внаслідок вдихання токсичних парів.
- Тривалі захворювання, такі як захворювання легень або неврологічні проблеми.

Навіть дотримуючись обмежень щодо впливу хімічних речовин на робочому місці, серйозне пошкодження ущільнювачів може перевищити безпечний рівень за лічені секунди. Тому профілактика є пріоритетом.

Встановлення хімічно стійких ущільнень – найкращий спосіб зменшити ризики нещасних випадків. Ці ущільнення розроблені для роботи в умовах корозії, абразиву та високих температур на хімічних заводах.

Переваги корозійностійких герметизуючих рішень включають:

- Збереження цілісності при впливі агресивних хімічних речовин.
- Збільшення терміну служби, що зменшує час простою.
- Зниження витрат на технічне обслуговування при одночасному дотриманні стандартів управління безпекою процесів.

### **3.3. Основні протоколи безпеки**

Навіть найміцніші ущільнення потребують суворих заходів безпеки на робочому місці:

- Планові перевірки: Скористайтеся нашим посібником з графіка технічного обслуговування, щоб спланувати перевірки на наявність зносу, тріщин та хімічного руйнування.

- Системи виявлення витоків: Встановіть промислові рішення для моніторингу, щоб виявляти витіки до того, як вони погіршаться.

- ЗІЗ для роботи з хімічними речовинами : забезпечте працівників захисним спорядженням, таким як рукавички, респіратори та захисний одяг.

- Навчання працівників з техніки безпеки: пропонувати навчальні програми на місці з розпізнавання небезпек та реагування на надзвичайні ситуації.

- Звітування та аналіз інцидентів: Перевірте кожен витік або майже пропущену ситуацію, щоб запобігти майбутнім збоям.

Таким чином, в результаті слід відмітити.

Поломки ущільнень спричиняють понад третину аварій у хімічній обробці, але їх можна запобігти. Використовуючи хімічно стійкі ущільнення та дотримуючись стратегій безпеки, таких як регулярні перевірки, виявлення витоків та навчання співробітників, підприємства можуть зменшити ризики, захистити працівників та уникнути дороговартісних простоїв.

У світі хімічного виробництва, де ставки дуже високі, безпека є надзвичайно важливою. Вона є основою для успішної роботи та екологічної відповідальності.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ЗАХИСНОЇ ВТУЛКИ КОМПРЕСОРА

#### 4.1. Нормування технології зміцнення захисної втулки (ЗВ) компресора

Перелік необхідних матеріалів та обладнання потрібних для нанесення покриттів на ЗВ компресора (табл.4.1).

Таблиця 4.1 – Матеріали та обладнання для нанесення покриттів на ЗВ  
компресора

Обладнання	Вартість, грн
Установка «УІЛВ-7А»	15000
Інше	
Електроенергія, кВт/год	40
Молібден	10
Σ	15050

Поверхня ЗВ на яку наносять покриття = 500 см<sup>2</sup>

#### 4.2 Розрахунок собівартості зміцнення поверхні ЗВ

Собівартість виготовлення 1,0 незміцненої ЗВ

$$C_{\text{баз}} = 50,0 \text{ грн.}$$

Термін роботи незміцненої 1,0 ЗВ складає

$$T_{\text{баз}} = 0,3 \text{ рок.}$$

Собівартість витрат для зміцнення 1,0 ЗВ складе:

$$C_{\text{мат}} = 10,0 \text{ грн.}$$

Загальна собівартість ЗВ буде:

$$C_{\text{нов}} = C_{\text{баз}} + C_{\text{мат}} = 50,0 + 10 = 60,0 \text{ грн} \quad (4.1)$$

Враховуючи, що 1 ЗВ буде працювати в п'ять разів довше, то

$$T_{\text{нов}} = T_{\text{баз}} \times 5 = 0,30 \times 5,0 = 1,50 \text{ роки.} \quad (4.2)$$

### 4.3. Розрахунок економічної ефективності

$$E = C_{\text{баз}} : T_{\text{баз}} - C_{\text{нов}} : T_{\text{нов}} = 50 : 0,3 - 60 : 1,5 = 127,0 \text{ грн} \quad (4.3)$$

$$\text{Фок} = C_{\text{об}} : E = 15050 : 127 = \sim 119 \text{ шт.}, \quad (4.4)$$

де  $C_{\text{об}} = 15050$  грн (згідно табл. 4.1)

Згідно того, що працівник за добу зміцнює приблизно 15,0 ЗВ, то добова окупність складе:

$$T_{\text{доб}} = \text{Фок} : 10 = 119 : 15 = \sim 8 \text{ діб.}$$

Таким чином. Економічна ефективність технології зміцнення буде 127,0 грн при виготовлені ЗВ, а окупність задіяного обладнання  $\sim 8,0$  діб.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Проведений аналіз різних конструкцій і призначення різновидів ущільнень валів відцентрових компресорів показав, що захисні втулки (ЗВ) масляних ущільнень працюють в найбільш важких умовах, технологія їх виготовлення складна, а матеріали мають високу вартість.

2. В результаті проведеного аналізу умов роботи та видів зносу ЗВ, встановлено, що вони працюють в важких умовах агресивного оточуючого середовища і їх основними видами зносу є корозійне, кавітаційне та механічне зношування.

3. Найбільш перспективною технологією підвищення надійності і довговічності ЗВ є наноструктурування методом ЕІЛ з подальшою поверхневою безабразивною ультразвуковою фінішною обробкою (БУФО).

4. В якості основи ЗВ потрібно використовувати нержавіючу сталь 12Х18Н10Т, яка пластична і по своїм механічним властивостям не уступає монель-металу.

5. Розроблена методика проведення досліджень дозволила удосконалити технологію підвищення надійності і довговічності поверхонь ЗВ масляних ущільнень відцентрових компресорів.

6. В результаті проведених порівняльних досліджень встановлено, що кращі результати показали зразки зі сталі 12Х18Н10Т з покриттям з молібдену і рівномірно розташованими вуглецевими нанотрубками. Їх знос після 320 хв іспитів складає 0,6 мкм, що в 2,8 рази менш чим у зразків з заліза Армко з таким самим покриттям і, відповідно, в 6,0 і 3.8 раз менше чим у зразків з заліза Армко і сталі 12Х18Н10Т з покриттями, нанесеними молібденовим електродом інструментом.

7. По результатам проведених досліджень опубліковані дві наукові роботи.

## ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. API Standard 614, "Systems for thickening, strengthening shafts and level control systems and related devices"
2. API 692, "Dry enhanced compressor systems"
3. Asnaghi, Abolfazl; Bensow, Rickard E. (2020). "Impact of Leading Edge Roughness in Cavitation Simulations around a Twisted Foil". *Fluids*. 5 (4): 243. Bibcode:2020Fluid...5..243A. doi:10.3390/fluids5040243.
4. Gevari, Moein Talebian; Abbasasl, Taher; Niazi, Soroush; Ghorbani, Morteza; Koşar, Ali (May 5, 2020). "Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review". *Applied Thermal Engineering*. 171 115065. Bibcode:2020AppTE.171115065G. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115065. ISSN 1359-4311. S2CID 214446752  
 Gevari, Moein Talebian; Abbasasl, Taher; Niazi, Soroush; Ghorbani, Morteza; Koşar, Ali (May 5, 2020). "Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review". *Applied Thermal Engineering*. 171 115065. Bibcode:2020AppTE.171115065G. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115065. ISSN 1359-4311. S2CID 214446752.
5. Gevari, Moein Talebian; Shafaghi, Ali Hosseinpour; Villanueva, Luis Guillermo; Ghorbani, Morteza; Koşar, Ali (January 2020). *Engineered Lateral Roughness Element Implementation and Working Fluid Alteration to Intensify Hydrodynamic Cavitating Flows on a Chip for Energy Harvesting*. *Micromachines*. 11 (1):  
 49. doi:10.3390/mi11010049. PMC 7019874. PMID 31906037.
6. STOPAR, DAVID. "HYDRODYNAMIC CAVITATION". Retrieved 2020-01-17.
7. Лю Л., Юй К., Ван З., Елл Дж., Хуан М. Х. та Річі Р. О. 2020 Збільшення міцності надміцної сталі шляхом розшарування по межах зерен *Science* 368 1347–

8. Kong HJ, Jiao ZB, Lu J та Liu CT 2021 Низьковуглецеві вдосконалені наноструктуровані сталі: мікроструктура, механічні властивості та застосування *Sci. China Mater.* 64 1580–97
9. Курнштайнер П., Вільмс М.Б., Вайшайт А., Голт Б., Ягл Е.А. та Раабе Д. 2020 Високоміцна дамаська сталь методом адитивного виробництва *Nature* 582 515–9
10. Chen R, Kong HJ, Luan JH, Wang AD, Jiang P та Liu CT 2020 Вплив зовнішнього прикладеного магнітного поля на мікроструктури та механічні властивості лазерного зварювального з'єднання сталі з наноструктурованим середнім вмістом марганцю *Матер. наук. інженерія А* 792 139787
11. Kudryashova Elizaveta, Shamberov Ivan, Zadoroznyy Roman 2020/03/01 - Nanostructuring of the surface layer by the method of electric-spark alloying  
10.22314/2618-8287-2020-58-1-113-121
12. Спосіб модифікації поверхневих шарів деталей машин методом електроіскрового легування (ЕІЛ) металевим електродом інструментом у спеціальному технологічному середовищі (СТС) з рівномірно розподіленими вуглецевими нанотрубками : пат. UA № 155786 U Україна, МПК (2024.01) B23H 1/00 B23H 9/00 B82B 1/00 / О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, Н. В. Тарельник, П. Фурманчик, В. О. Охріменко, А. В. Ткаченко (UA). № u202301024 ; заявл. u202301024 ; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 15.
13. Yurchenko V. I., Yurchenko E. V., Dikusa A. I. Thick-Layer Nanostructured Electrospark Coatings of Aluminum and Its Alloys. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2020. Vol. 56. P. 656–664.
14. The Development of Nanostructuring Method Metal Surfaces by Electrospark Alloying / O. Gaponova et al. *Nanomaterials: Applications & Properties* : 13th International Conference (IEEE NAP-2023), Bratislava, Slovakia, 2023. P. 03mtfc-28.
15. S. Fintova, P. Dovgy, K. Mertova, Z. Khlup, M. Ducek, R. Prochazka, and P. Gutarzh, *J Mech Behav Biomed* 123, 104715 (2021).  
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104715>

16. Техногенна безпека АЕС: Навч. посібн.; Ч. II / Д. О. Чалий, А. Б. Тарнавський, Р. Ю. Сукач, Р. Б. Веселівський; Держ. служба України з надзвичайних ситуацій; Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. – Львів: Каменяр, 2020. – 340 с.
17. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: монографія/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник, та ін.; за ред. В. Б. Тарельника, Є.В. Коноплянченка. - Суми: Видавництво «ФЛП Литовченко Е.Б.», 2020.- 410 с.- Українською мовою.
18. Ремонт тракторів і автомобілів : навчальний посібник : у 2-х кн. – Кн.1 / [Д. П. Домуші , А. М. Яковенко, П. І. Осадчук та ін.] . – Одеса : ТЕС, 2020. – 191 с.
19. V. B. Tarellyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarellyk, and O. M. Myslyvchenko, Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying, Progress in Physics of Metals, 24, No. 2: 282–318 (2023) <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282>
20. V.B. Tarellyk, O.P. Gaponova, V.B. Loboda, E.V. Konoplyanchenko, V.S. Martsinkovskii, Yu.I. Semirnenko, N.V. Tarellyk, M.A. Mikulina, and B.A. Sarzhanov, Surf. Engin. Appl. 2 Electrochem, 57: 173 (2021); <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>

## ДОДАТКИ