

Тема: «Удосконалення технології підвищення працездатності поршневіх компресорів, задіяних на сільськогосподарських підприємствах»

Виконав: Ворушило В.С.

Керівник: Тарельник В. Б.

ВСТУП

Сільське господарство є життєво важливою частиною людського існування і за століття стало набагато розвиненішим. Багато того, що колись робилося вручну або потребувало інструментів, що працюють від людської енергії, було замінено складними машинами, які забезпечують вищі врожаї та покращують спосіб збирання врожаю для більшої ефективності.

У сільському господарстві системи стиснення повітря є новаторськими новими та ефективними методами вирощування сільськогосподарських культур, транспортування та загального обслуговування ферм.

Одним із ключових вузлів сучасної сільськогосподарської техніки є повітряний компресор. Повітряні компресори - це пристрої, які перетворюють енергію в повітря під тиском, яке потім можна використовувати для різних цілей, таких як живлення пневматичних інструментів, пневматичної сівалки, обприскування посівів, сільськогосподарських культур, розподіл продовольства, зберігання зерна, система вентиляції теплиць, трактори і багато іншого. Це робить надійний повітряний компресор життєво важливим компонентом успішної ферми.

Повітряні компресори для надання стисненого повітря за потребою, як для періодичного, так і для постійного використання. Вони ідеально підходять для важких вимог, необхідних у повсякденній роботі сільськогосподарської промисловості. Таким чином тема дипломної магістерської роботи:

«Удосконалення технології підвищення працездатності поршневих компресорів, задіяних на сільськогосподарських підприємствах» є актуальною та своєчасною.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ І ПЕРЕВАГИ ПОВ'ЯЗАНІ З ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРІВ НА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

1.1. Переваги повітряних компресорів на фермі

Промислові компресори використовуються в багатьох галузях, від лабораторій і хімічного виробництва до заводських робіт і респіраторів. Але в сільськогосподарській галузі системи стиснення повітря є піонерами нових ефективних методів вирощування сільськогосподарських культур, транспортування та загального обслуговування ферм.

Повітряний компресор - це в основному двигун для переміщення стисненого повітря. Використання цієї сили зводиться до використання «кінцевих точок» для досягнення бажаного результату.

Звичайний домашній або невеликий компресор на фермі живитиметься безпосередньо від домашньої електромережі. Повітряні компресори промислового рівня потребують трифазного живлення.

Робочий цикл - це співвідношення між тим, як довго повітряний компресор повинен залишатися включеним і вимкненим. Робочий цикл 50% означає, що

повітряний компресор повинен мати 30 хвилин «вимкнення» на кожні 30 хвилин «ввімкнення» протягом години. Робота повітряного компресора більше, ніж його час роботи, може вплинути на підйомну силу пристрою. Для невеликих компресорів, таких як поршневі повітряні компресори, робочий цикл вимірюється з інтервалами в 10 хвилин. Отже, якщо робочий цикл поршнів становить 50%, як у наведеному вище прикладі, він повинен працювати лише 5 хвилин кожні 10 хвилин і відпочивати протягом 5 хвилин. Тут стає в нагоді повітряний ресивер, щоб можна було досягти рівномірного потоку, поки повітряний компресор «відпочиває», за умови, що його розмір було правильно підібрано.

Повітряні компресори використовуються на фермі десятиліттями. Деякі з цих методів перевірені та вірні, інші є більш передовими, що дозволяють зазирнути в майбутнє сільського господарства.

Такі транспортні засоби, як трактори та квадроцикли, є невід'ємною частиною підтримки бізнесу ферми. Спущене колесо може означати різницю між годинною роботою та зусиллями цілого дня. На щастя, повітряні компресори можуть швидко підвищити тиск у шинах більшості сільськогосподарських транспортних засобів. Також корисний для регулярного технічного обслуговування, тиск у шинах є одним із найпопулярніших застосувань повітряних компресорів на фермі.

Наприкінці важкого дня сортування та упакування продуктів немає нічого більшого задоволення, ніж швидке та легке прибирання. Системи очищення на основі повітряного компресора — це високоефективний спосіб потужного очищення виробничих приміщень з мінімумом суєти. Повітряні компресори економніші, ніж більшість інших рішень, оскільки вони не потребують дорогих витратних матеріалів і натомість покладаються на потужність стисненого повітря.

Пневматичні степлери та пістолети для цвяхів, які дуже зручно для роботи своїми руками вдома та в сараї, можуть швидко виконати такі сільськогосподарські роботи, як:

- Встановлення нових конструкцій.
- Технічне обслуговування існуючих конструкцій.
- Протягування дротяної сітки від стовпа до стовпа.
- Ремонт оббивка.

Коли прийде час фарбувати сарай, відмовтеся від малярного валика й скористайтеся пістолетом-розпилювачем, який працює від повітряного компресора. Хороший пістолет-розпилювач забезпечує рівномірний потік фарби, він швидший і ефективніший, ніж валик або пензлик, не кажучи вже про те, що він легший для рук. Подумайте про час, необхідний для фарбування кількох сотень метрів стовпів огорожі, і легко зрозуміти, як повітряний компресор із кінцевою точкою фарбувального пістолета може полегшити ваше життя.

Встановіть повітряний компресор на задню частину вантажівки-пікапа, і з правильними навісними пристроями тепер ви матимете професійний пристрій для обприскування навіть найвищих яблунь. Коли прийде час обприскувати ваш фруктовий сад, повітряний компресор стане зручним рішенням, щоб захистити фруктові дерева від шкідників і комах.

Стиснене повітря приводить у дію пневматичні конвеєрні системи, які використовуються для транспортування зерна, порошоків і гранул у силоси для зберігання. Використання вакууму під тиском у закритому трубопроводі є безпечним способом переміщення сухих вантажів без ризику забруднення чи пошкодження.

Ще однією істотною перевагою є роль повітряних компресорів у системах поливу. Стиснене повітря можна використовувати для живлення водяних насосів, забезпечуючи послідовне та ефективне водопостачання посівів. Це

зменшує залежність від ручної праці та допомагає підтримувати оптимальний рівень вологості ґрунту.

Нарешті, повітряні компресори мають неоціненне значення для управління відходами тваринництва. Вони можуть жити системи аерації в лагунах для гною, покращуючи процес розкладання та зменшуючи запахи. Це не тільки покращує екологічну стійкість ферми, але й скорочує експлуатаційні витрати, пов'язані з утилізацією відходів.

Занурювальні водяні насоси можуть працювати на стисненому повітрі, пропонуючи альтернативу електричним насосам, які можуть вийти з ладу під час шторму. Повітряні компресори можуть працювати від портативного генератора, що робить їх дуже корисним резервним варіантом. Водяні насоси можна використовувати для транспортування води від греблі до присадибної ділянки або підтримки вологості посівів.

Промислові компресори є одними з основних інструментів для будь-якої самоокупної ферми, незалежно від того, чи йдеться про надання основних послуг для вашої сільськогосподарської практики чи полегшення виконання легких завдань.

Повітряні компресори — це потужні інструменти, які розвинули сучасні методи ведення сільського господарства, що робить їх незамінними для фермерів, які прагнуть оптимізувати свою роботу.

Вибір відповідного повітряного компресора для ферми може бути складним, враховуючи різноманітність доступних варіантів. Однак розуміння різних типів може допомогти прийняти це рішення легше. Поршневі компресори є популярним вибором для невеликих ферм завдяки їх доступності та ефективності. Вони ідеально підходять для електроінструментів і невеликих систем поливу.

Попри те, що повітряні компресори пропонують численні переваги, їх обслуговування має вирішальне значення для тривалої функціональності та безпеки. Регулярне технічне обслуговування забезпечує ефективну роботу системи та знижує ризик поломок. Важливо регулярно перевіряти рівень масла, чистити повітряні фільтри та перевіряти шланги та з'єднання.

Безпека є ще одним важливим аспектом. Завжди потрібно переконатись, що компресор розміщено на стійкій поверхні та подалі від легкозаймистих матеріалів. Під час роботи з системою важливо використовувати відповідне захисне спорядження, таке як рукавички та захисні окуляри. Крім того, небезпечно перевищувати рекомендовані рівні тиску, щоб уникнути нещасних випадків.

Дотримуючись цих інструкцій з технічного обслуговування та техніки безпеки, ви можете переконатися, що ваша повітряна компресорна система залишається ефективною та безпечною для використання на вашій фермі.

Майбутні тенденції та інновації в технології повітряних компресорів для сільського господарства

Майбутнє технології повітряних компресорів у сільському господарстві виглядає багатообіцяючим, з кількома захоплюючими тенденціями та інноваціями на горизонті. Однією з помітних тенденцій є зосередження на стійкості та енергоефективності. Виробники розробляють компресори, які споживають менше енергії та мають менший вплив на навколишнє середовище. Повітряні компресори на сонячних батареях є чудовим прикладом цієї інновації, пропонуючи стійке рішення для ферм.

Ще одна захоплююча подія – інтеграція інтелектуальних технологій. Сучасні повітряні компресори оснащені датчиками та можливостями Інтернету речей, які дозволяють фермерам контролювати та контролювати систему

дистанційно. Це не тільки підвищує зручність, але й забезпечує оптимальну продуктивність.

Штучний інтелект також прокладає собі дорогу в технології повітряних компресорів. Системи на основі штучного інтелекту можуть аналізувати дані компресора та пропонувати графіки технічного обслуговування, прогнозувати можливі проблеми та оптимізувати продуктивність. Це скорочує час простою та продовжує термін служби обладнання.

Майбутнє технології повітряних компресорів виглядає яскравим, з інноваціями, зосередженими на стійкості та розумних технологіях. Перебуваючи в курсі та впроваджуючи ці досягнення, фермери можуть продовжувати вдосконалювати свою діяльність і досягати більших успіхів.

1.2. Загальні відомості про поршневі компресори

Поршковий газовий компресор - це компресор, який створює тиск і подає газ за допомогою зворотно-поступального руху поршня (рис. 1.1). В основному він складається з робочої камери, трансмісійної частини, фюзеляжу та допоміжних частин. Робоча камера безпосередньо стискає газ і включає циліндр, гільзу циліндра, клапан, сальник, поршень і поршковий шток. Поршень приводиться в рух штоком поршня до зворотно-поступального руху в циліндрі. Послідовно змінюються об'єми робочих камер з обох боків поршня. Завдяки підвищеному тиску газ зі сторони зі зменшеним об'ємом відводиться через повітряний клапан. Завдяки зниженому тиску повітря газ зі сторони збільшеного об'єму поглинається через повітряний клапан. Компоненти трансмісії здійснюють зворотно-поступальний рух, включаючи шатун колінчастого валу, ексцентричний повзун, перекидну пластину тощо. Він складається з хрестовини, шатуна та колінчастого валу

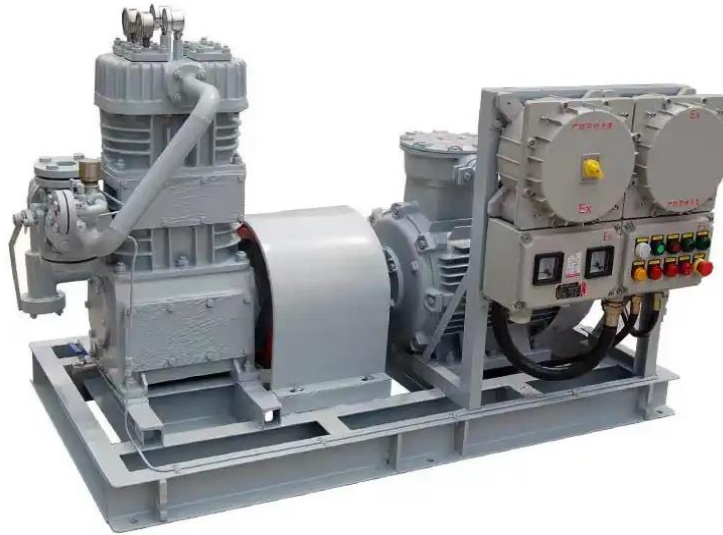


Рисунок 1.1 - Поршневий газовий компресор

У поршневих повітряних компресорах частини насоса компресора включають:

- **Циліндр:** камера, в якій рухається поршень для стиснення повітря.
- **Поршень:** компонент, який рухається вгору-вниз (або вперед-назад) усередині циліндра, створюючи зміну об'єму та таким чином стискаючи повітря.
- **Клапани:** це односторонні клапани. Впускний клапан пропускає навколишнє повітря в циліндр, коли поршень знаходиться в ході вниз, а випускний клапан пропускає стиснене повітря під час ходу вгору.
- **Шатун:** з'єднує поршень із колінчастим валом, перетворюючи обертовий рух колінчастого валу на зворотно-поступальний рух поршня.
- **Колінчастий вал:** колінчастий вал, що приводиться в дію двигуном, обертається, щоб забезпечити необхідний рух поршня через шатуни.

Інші поширені деталі повітряного компресора

Крім основних компонентів, які керують процесом стиснення, повітряний компресор має кілька інших важливих частин, які забезпечують його безпечну та ефективну роботу. Ці компоненти виконують важливі

функції підтримки, які часто залишаються непоміченими, але життєво важливі для оптимальної продуктивності.

Масляний насос/система змащення

Система змащування є критично важливим компонентом у більшості повітряних компресорів, у тому числі заповнених маслом гвинтових і поршневих компресорів із змащенням. Основна роль масляного насоса для компресорів, які його мають, полягає в циркуляції мастила компресорного масла до різних рухомих частин компресора, мінімізуючи тертя, знос і виділення тепла. Забезпечуючи постійне змащення, масляний насос допомагає продовжити термін служби компресора, запобігти перегріву та підтримувати оптимальну продуктивність. Підкомпоненти системи змащення включають:

- **Масляний фільтр:** коли масло циркулює, воно може накопичувати домішки та інше сміття. Масляний фільтр очищає масло перед тим, як воно подається до критичних компонентів, гарантуючи, що вони отримають незабруднене змащення.
- **Маслоохолоджувач:** Коли масло рухається через компресор, воно поглинає тепло. Масляний радіатор розсіює це тепло, підтримуючи оптимальну температуру масла та забезпечуючи ефективне змащення та охолодження деталей компресора. Перегрів може зменшити термін служби масла та пошкодити компресор.
- **Повітряний масловіддільник:** у системах, де мастило змішується зі стисненим повітрям, повітряний масловіддільник має вирішальне значення. Він видаляє надлишок масла з повітря перед його випуском, забезпечуючи вихід чистого повітря та рециркуляцію масла назад у систему.
- **Масляний картер/резервуар:** це накопичувальний резервуар для мастила. Він зберігає мастило, коли воно не циркулює, і є місцем, звідки масляний насос забирає мастило для розподілу мастила по компресору.

- **Маслопроводи/труби:** це шляхи, якими рухається масло, з'єднуючи різні компоненти системи змащення та забезпечуючи постійний потік масла до частин, які цього потребують.

Манометри

Манометр повітряного компресора є важливим приладом, який відображає поточний рівень тиску в системі, зазвичай вимірюється у фунтах на квадратний дюйм (PSI) або барах. Цей манометр дозволяє операторам контролювати потужність компресора та гарантувати, що він працює в бажаному та безпечному діапазоні тиску.

Зворотний клапан

Зворотний клапан, розташований між компресором і резервуаром, гарантує, що стиснене повітря не повертається в компресор після того, як воно потрапило в резервуар. Цей односторонній клапан дозволяє повітрю надходити в резервуар, одночасно запобігаючи його течії назад, забезпечуючи постійний тиск і роботу.

Запобіжний клапан скидання тиску

Це важлива функція безпеки. Якщо тиск у системі перевищує безпечний рівень, запобіжний клапан автоматично відкривається, щоб скинути надлишковий тиск, гарантуючи, що система не зазнає небезпечної ситуації надлишкового тиску.

Розвантажувальні клапани

Розвантажувальний клапан випускає повітря, що потрапило між компресором і зворотним клапаном, дозволяючи двигуну розвантажуватися або перезапуститися без опору. Він забезпечує плавний запуск після того, як компресор досягне свого тиску відключення.

Реле тиску

Ці прилади контролюють тиск у повітряному резервуарі. Коли тиск падає нижче встановленого значення, реле тиску активує двигун, щоб почати стискати більше повітря. І навпаки, коли тиск у резервуарі досягне максимального значення, вимикач вимкне двигун або розвантажить компресор, забезпечуючи ефективність і безпеку.

Ремені

У моделях компресорів з ремінним приводом ремені передають потужність від двигуна до насоса компресора або повітряного блоку. Регулярний огляд і заміна є життєво важливими, оскільки зношені ремені можуть знизити ефективність або навіть зламатися, зупиняючи роботу компресора.

Повітряний фільтр

Вхідний повітряний фільтр очищає вхідне повітря перед його стисненням. Це запобігає потраплянню пилу, бруду та інших забруднень, які потенційно можуть пошкодити систему або забруднити стиснене повітря. Чисті фільтри забезпечують довший термін служби компресора та кращу якість повітря.

Зливні клапани

Необхідно регулярно зливати накопичену вологу і конденсат з повітряного бака. Зливний клапан, який може бути ручним або автоматичним, полегшує цей процес, гарантуючи, що вода не накопичується в резервуарі чи лініях.

Прокладки

Прокладки забезпечують ущільнення між різними компонентами компресора, запобігаючи витокам повітря та забезпечуючи ефективну роботу. З часом вони можуть зношуватися або деградувати, тому регулярні перевірки та заміни необхідні.

Вібраційні колодки

Щоб зменшити шум і запобігти зносу від постійних вібрацій, багато компресорів встановлюються на вібраційні прокладки. Ці накладки поглинають і гасять вібрацію, що забезпечує тихішу роботу та збільшує термін служби компонентів.

1.3. Проблеми експлуатації поршневих компресорів

Поршневі компресори неминуче будуть виходити з ладу під час роботи. У разі виникнення проблеми необхідно вжити заходів для її усунення та забезпечення нормальної роботи компресора. Поршневі компресори використовуються в багатьох сферах застосування, оскільки вони можуть стискати повітря або газ у широкому діапазоні коефіцієнтів тиску та витрат. Вони можуть запропонувати чудову операційну гнучкість для різних послуг. Однак, окрім багатьох переваг, є деякі недоліки та проблеми. Наприклад, пульсація є серйозною проблемою майже для будь-якого поршневого компресора. Це може спричинити багато проблем, у тому числі сильну вібрацію, несправності трубопроводів (через втому), зниження ефективності компресора та помилки у вимірюваннях витрати. Крім того, клапани циліндрів і розвантажувачі можуть бути джерелами робочих проблем і проблем з надійністю.

Нижче розглядаються кілька ключових сфер надійності, роботи та продуктивності поршневого компресора, включаючи роботу клапана циліндра, змащування та пульсацію.

Клапани балонів

Основною функцією клапанів циліндрів компресора є забезпечення потоку в потрібному напрямку та блокування потоку в протилежному (небажаному) напрямку. Набір впускних (всмоктувальних) клапанів пропускає потік в циліндр. Набір випускних клапанів використовується для видалення стисненого повітря/газу з балона.

Тип і розмір клапана зазвичай вказує виробник компресора. Завжди точилися дискусії щодо вибору клапанів, деталей клапанів циліндрів. Зазвичай існує кілька різновидів клапанів, іноді лише три-чотири виробники, які можуть запропонувати якісні циліндричні клапани з високою продуктивністю та тривалим терміном служби для кожного необхідного обслуговування та компресора.

Продуктивність, надійність і робота клапанів циліндрів є важливими темами для будь-якого поршневого компресора. Ефективність і продуктивність циліндрів безпосередньо пов'язані з роботою, надійністю та втратами клапанів циліндрів. Втрати на клапані циліндра пропорційні квадрату швидкості потоку через клапан. У високошвидкісних компресорах площа клапана та внутрішній поперечний переріз відносно менші порівняно з низькошвидкісними машинами, що призводить до вищих швидкостей через клапани циліндра (клапани всмоктування та нагнітання).

Багато факторів і параметрів впливають на втрати та роботу клапанів циліндрів, таких як швидкість поршня компресора, відношення площі клапана циліндра до отвору циліндра, ефективна площа потоку клапана, зчеплення, викликане рідиною (статичне тертя), і пульсація. Сучасні циліндрові клапани

підвищили ефективність компресора в середньому на 3-5 відсотків без втрати надійності порівняно з циліндровими клапанами, які використовувалися 20 років тому. Якщо така ж тенденція збережеться, то зазвичай рекомендується оцінювати та використовувати сучасні та перевірені в експлуатації клапани кожні сім-10 років.

Високошвидкісні поршневі компресори (понад 900 об/хв) стають все більш поширеними в різних службах. Як правило, втрати на клапані більші у високошвидкісних поршневих компресорах. Поведінка та динаміка клапанів і пов'язана з ними динаміка рідини також складніша у високошвидкісних поршневих компресорах. Фактично, сучасні технології та ноу-хау циліндричних клапанів на ринку були розроблені для низькошвидкісних поршневих компресів. Як результат, низькошвидкісні компресори (менше 450 об/хв) мають кращу загальну ефективність компресора та кращий термін служби клапана циліндра порівняно з високошвидкісними компресорами за аналогічних умов співвідношення тиску.

Звичайно, є циліндрові клапани, виготовлені перевіреними постачальниками, які можуть запропонувати довгий термін служби та продуктивність. Однак деякі клапани циліндрів показали погану продуктивність і низьку надійність у високошвидкісних машинах. Слід приділяти особливу увагу вибору клапанів циліндрів та їх роботі та надійності у високошвидкісних поршневих компресорах.

Змащення

Сухі поршневі компресори. Багато поршневих компресорів у повітряних і газових службах виготовляються з незмащеними (сухими) механізмами циліндр/поршень і шток (ущільнювач штока). Ці машини відомі як сухі поршневі компресори, і вони популярні для обслуговування приладів повітрям і для застосування сухого газу, де масло в стисненому газі може спричинити

проблеми. У цих машинах поршневі кільця та ущільнення штока є сухими (незмащеними), що запобігає контакту масла та стисненого повітря/газу. Незважаючи на те, що ці машини не потребують масла для циліндра/поршня та ущільнення штока, вони все одно потребують системи змащення рами/картера.

Змащення рами/картера. Для змащених (мокрого типу) поршневих компресорів необхідна мастило для циліндра та сальника штока. Ця мастильна олива, як правило, відрізняється від мастила, що використовується для змащування рами (картера), оскільки в ідеалі система змащення рами (картера) повністю відокремлена від системи змащення циліндра компресора та системи змащування штока.

В'язкість мастила, що використовується в корпусі поршневого компресора (картер), як правило, становить ISO VG 100 або ISO VG 150. Останнє є більш поширеним. Деякі присадки для захисту від іржі та окислення, а також присадки проти зношування також можуть бути використані в складеній мастилі. Традиційно один і той же тип мастила застосовувався вздовж механізму: машиніст, редуктор і приводне обладнання в механізмі. Хоча цей підхід не вважається найкращою практикою надійності, він все ще використовується на багатьох підприємствах.

Зокрема, невеликі поршневі компресори можуть використовувати ту саму мастильну оливу, що й їхні приводи, якщо вони приводяться в рух двигуном. Наприклад, масло для двигуна, що працює на природному газі, зазвичай використовується в приводному поршневому компресорі, оскільки воно є легкодоступним. Таким же чином масло для приводу дизельного двигуна можна використовувати в компресорі, якщо драйвер є дизельним двигуном. Така загальність мастила може бути небажаною або рекомендованою, але іноді вона зменшує капітальні та експлуатаційні витрати, а також полегшує роботу з технічного обслуговування завдяки використанню єдиного блоку мастила та одного типу мастила для водія та приводного обладнання.

Низькотемпературні властивості вибраного мастила також важливі, оскільки масло повинно текти під дією сили тяжіння з (зазвичай піднятого) масляного бака до масляного насоса (насосів) на компресорі за температури навколишнього середовища взимку, коли температура може бути нижче 0°C.

Мастило для рам, циліндрів і систем ущільнення штоків. Для роботи з низьким тиском у некритичних компресорах те саме мастило може використовуватися в рамі та системах ущільнення циліндра та штока, щоб стратегія змащування була максимально простою. Однак слід зазначити, що така надто спрощена стратегія часто призводить до порушення роботи систем циліндра та стрижня. Ця стратегія рекомендована для невеликих компресорів, низького тиску та менш критичних послуг, де менший термін служби деяких компонентів машини вважається прийнятним порівняно з вартістю та складністю використання двох різних мастильних матеріалів і двох різних підходів до змащування. Як приблизна оцінка, така спрощена конфігурація може бути дозволена для тиску нижче 25 бар(г) і компресорів менше 250 кВт.

Загалом для систем циліндра (циліндр/поршень) і ущільнення штока потрібна спеціально підібрана мастило порівняно з мастилом, що використовується для рами/картера. Як правило, масло, що використовується для циліндра/набивки, має вищу в'язкість.

На тип і деталі масла також впливають деталі обслуговування, такі як склад самого стисненого газу, а також його тиск і температура. Якщо газ, що стискається, вологий або кислий, або має особливий склад, то слід використовувати спеціально підібране мастило для циліндрів. Для деяких поршневих компресорів мастило для циліндра/набивки містить базове масло високої в'язкості та набір присадок, щоб запобігти змиванню масла зі стінок циліндра під дією газу, подібного до розчинника.

В'язкість мастила, необхідного для циліндрів і сальника, в основному залежить від конкретних газів, що стискаються, а також від найвищого тиску і температури нагнітання. Деякі поршневі компресори обробляють два або три різних газу в різних циліндрах. Циліндр із найсуворішим обслуговуванням компресора визначає мастило для циліндра, яке буде використовуватися, оскільки більшість компресорів мають лише одну систему впорскування масла для обслуговування всіх циліндрів і ущільнень штока.

Недостатнє та надмірне змащування. Слід уникати як недостатнього, так і надмірного змащування. Недостатнє змащення призведе до нагрівання, зносу або потенційного заїдання та проблем з роботою. Надмірне змащування може призвести до утворення відкладень на клапані циліндра, проблем з поломкою, забруднення нижньої частини компресора та передчасного виходу з ладу сальника.

Визначення швидкості подачі масла в кожен циліндр і набір сальникових штоків є важливим і часто складним завданням. Існують різні методи розрахунку або визначення швидкості подачі масла в кожен циліндр і кожен упаковку. Більшість є приблизними розрахунками, призначеними лише для того, щоб забезпечити початкову точку для встановлення швидкості впорскування масла. Оптимальні значення підтверджуються правильною експлуатацією.

Ранні формули, що використовувалися для кількісного визначення швидкості подачі масла, базувалися на кількості мастила, необхідного для створення масляної плівки, достатньої для покриття площі контакту циліндр-поршневе кільце. Традиційно швидкість подачі масла в ущільнення основного штока розраховується за тією ж формулою, що й для циліндрів, за винятком того, що замість отвору циліндра використовується діаметр штока. Як дуже приблизний приклад, типова норма споживання циліндра та упаковки для всього середнього поршневого компресора середнього тиску може складати від трьох до 20 літрів на день. Під час періоду обкатки об'єм масла слід збільшити або за

допомогою формули, що підходить для періодів обкатки, або шляхом впорскування в 1,5-2,5 рази від нормального робочого розрахункового значення.

Контроль пульсації

Рівень пульсації в системі поршневого компресора може бути високим, якщо його не контролювати. Сили пульсації можуть досягати значних величин і, якщо їх не ослабити, призведуть до шуму, пошкодження механічного обладнання, поломок трубопроводів або високої вібрації. Для кожного поршневого компресора слід розробити рішення для контролю пульсації, щоб мінімізувати проблеми, пов'язані з пульсацією (наприклад, вібрація, сили струсу тощо), зберігаючи при цьому максимальну робочу продуктивність і ефективність.

Проблеми з пульсацією можна очікувати для всіх розмірів і діапазонів потужності поршневих компресорів. Звичайно, сили тряски можуть бути більшими та більш руйнівними у високому тиску та потужніших машинах. Однак пульсація все ще може бути серйозною проблемою в так званих маленьких машинах.

Поведінка стисненого газу, трубопроводів і механічних систем під час пульсації є нелінійною, тому для отримання точних прогнозів акустичних характеристик, що змінюються в часі в системі, динамічного падіння тиску та найбільш ефективного контролю пульсації, зазвичай потрібно нелінійне моделювання, що залежить від часу. рішення.

Забезпечення надійності систем стисненого повітря вимагає цілісного підходу, який включає регулярне технічне обслуговування, моніторинг, належне проектування та навчання.

Надійність має вирішальне значення в системах стисненого повітря, щоб забезпечити безперервну роботу та уникнути дорогих простоїв. Надійна система забезпечує постійний тиск і якість повітря, підтримуючи ефективні виробничі

процеси та мінімізуючи ризик пошкодження або виходу з ладу обладнання. Однак підтримувати їхню надійність може бути складно, оскільки вони чутливі до таких проблем, як витіки, забруднення та неефективність.

Нижче підсумовуються найкращі практики та стратегії забезпечення надійності систем стисненого повітря, що допомагає оптимізувати продуктивність, зменшити час простою та знизити експлуатаційні витрати.

1. Регулярне обслуговування

Регулярне обслуговування має важливе значення для підтримки надійності системи стисненого повітря. Основні завдання технічного обслуговування включають:

- **Перевірка на наявність витоків:** регулярно перевіряйте наявність витоків у системі, оскільки вони можуть витрачати енергію та знижувати ефективність системи.
- **Заміна фільтрів:** замініть фільтри відповідно до рекомендацій виробника, щоб забезпечити чисте повітря високої якості.
- **Перевірка рівня масла:** якщо в системі використовується компресор, що змащується маслом, регулярно перевіряйте та підтримуйте рівень масла.
- **Очищення систем охолодження:** тримайте системи охолодження в чистоті, щоб запобігти перегріву та забезпечити ефективну роботу.

2. Моніторинг і вимірювання

Методи моніторингу та вимірювання для відстеження продуктивності системи стисненого повітря можуть включати:

- **Моніторинг тиску:** регулярно перевіряйте рівень тиску повітря, щоб переконатися, що він знаходиться в межах рекомендованого діапазону.
- **Вимірювання потоку:** виміряйте потік повітря, щоб визначити будь-які зміни, які можуть вказувати на проблеми з системою.

- **Перевірка якості повітря:** періодично перевіряйте якість стисненого повітря, щоб переконатися, що воно відповідає необхідним стандартам.

3. Дизайн і компонування системи

Правильна конструкція та компонування системи мають вирішальне значення для оптимізації надійності. Зверніть увагу на такі фактори:

- **Розмір труб:** Переконайтеся, що розміри труб належні, щоб мінімізувати падіння тиску та підтримувати ефективний потік повітря.

- **Обладнання для обробки повітря:** установіть відповідне обладнання для обробки повітря, таке як фільтри, осушувачі та сепаратори, щоб забезпечити чисте сухе повітря.

- **Належна вентиляція:** Забезпечте належну вентиляцію, щоб запобігти перегріванню компресорів та інших компонентів.

4. Навчання та обізнаність

Персонал повинен бути навченим правильній експлуатації та обслуговуванню систем стисненого повітря. Це включає:

- **Практики безпечної експлуатації:** навчіть операторів правилам безпеки, щоб запобігти нещасним випадкам і травмам.

- **Процедури технічного обслуговування:** Переконайтеся, що персонал з технічного обслуговування навчений виконувати регулярні завдання з технічного обслуговування правильно та безпечно.

- **Енергоефективність:** підвищуйте обізнаність про важливість енергоефективності та заохочуйте практики, які зменшують споживання енергії.

5. Енергоефективність та управління витратами

Ефективне використання стисненого повітря може підвищити надійність і знизити експлуатаційні витрати. Розглянемо:

- **Виявлення та усунення витоку повітря:** регулярно перевіряйте та усувайте витоки повітря, щоб запобігти марнотратній енергії.

- **Оптимальне використання:** використовуйте стиснене повітря лише за необхідності та розгляньте альтернативні методи для завдань, які не потребують стисненого повітря.

- **Рекуперация енергії:** досліджуйте варіанти рекуперації та повторного використання енергії систем стисненого повітря, щоб зменшити загальні витрати на енергію.

Таким чином, забезпечення надійності систем стисненого повітря вимагає цілісного підходу, який включає регулярне технічне обслуговування, моніторинг, належне проектування та навчання. Впроваджуючи ці найкращі практики та стратегії, можна підвищити надійність системи стисненого повітря, підвищити ефективність і зменшити експлуатаційні витрати. Надійна система стисненого повітря не тільки підтримує безперебійну роботу, але й сприяє створенню безпечнішого та стійкішого робочого середовища.

1.4. Технологічні рішення підвищення експлуатаційних властивостей деталей поршневих компресорів

В [1] розглядається проблема, пов'язана з забезпеченням потрібних функціональних властивостей відповідальних вузлів поршневих компресорів - прямоточних клапанів. Проблема вирішується шляхом покращення якості поверхні деталей, з метою підвищення енергоефективності, за рахунок зниження температури стисненого газу та підвищення продуктивності компресора. Авторами досліджено вплив нітроцементування в пастах на підвищення продуктивності та ресурсу клапанів.

Прямоточні клапани призначені для керування всмоктуванням і нагнітанням поршневих компресорів, що працюють в неагресивному середовищі, з частотою обертання колінчастого валу не більше 1000 об/хв [2]. Клапани складаються з обмежувачів і сідел, з'єднаних різними кільцями [3].

Досвід експлуатації поршневих компресорів показує, що прямоточні клапани, в порівнянні з іншими, більш випробувані і різняться зносостійкістю в експлуатації. Вони працюють практично безшумно, енергоефективність збільшена до 40% порівняно з іншими конструкціями. При їх застосуванні витрати електроенергії знижуються до 12 %, а продуктивність компресора піднімається до 10 % [4].

Клапани, в залежності від застосування, виготовляють з латуні, алюмінію або сталі [5]. Пластини виконані з добротної пружинної або нержавіючої сталі.

Хіміко-термічна обробка (ХТО) збільшує зносостійкість деталей за рахунок підвищення твердості поверхні [6]. Проте обробка поверхневого шару викликає зміну властивостей і механізми руйнування, ніж необроблена сталь, включаючи підвищені характеристики втоми [7].

Високоєфективним способом насичення поверхневих шарів сталі вуглецем і азотом є нітроцементування. Недоліком нітроцементування є нестабільність процесу. Цей факт зумовлений неможливістю забезпечення точного складу нітроцементуючого середовища.

Замість газового нітроцементування доцільно використовувати низькотемпературне нітроцементування в пастах. Паста наноситься безпосередньо на армуючі поверхні, що максимально наближає реакцію генерації активних атомів азоту та вуглецю до поверхні сталі, де вони негайно адсорбуються та дифундують у глибину виробу [8, 9].

Підвищення ступеня легування призводить до підвищення здатності сталі включати вуглець з карбюризатора. Цей вуглець міститься у твердих розчинах і карбідах, які у високохромистій сталі можуть займати 80–90% об'єму [9].

Карбідний шар на поверхні нітроцементованих хромистих сталей значно підвищує твердість і зносостійкість. Однак завдяки високій крихкості він знижує втомну міцність. Крім того, найкращі характеристики втоми досягаються для нітроцементованих шарів, вміст вуглецю в яких становить близько 0,7%. Збільшення вмісту вуглецю вище цього значення призводить до зниження

циклічної міцності нітроцементованої сталі. Це пов'язано зі збільшенням залишкового аустеніту в сплаві [9, 10].

При нітроцементуванні сталей утворюється багатофазна система з підвищеними механічними властивостями. Одночасно в шарі виникає напруга стиску [9]. Крім того, в [11, 12] висока втомна міцність науглерожених і нітроцементованих деталей пояснюється високою межею текучості поверхневого шару.

Основними методами дослідження в [1] були металографічні дослідження структури поверхонь сталі 60Si2Cr та нержавіючої сталі 09Cr15Ni8Al.

Для нітроцементування клапанних пластин можна рекомендувати пасту наступного складу: карбамід — 20–25 %; фероціанід калію—25—20%; сажа - 55%. Декстриновий клей також використовувався як рідкий компонент для отримання пастоподібної консистенції.

Використовували наступні режими нітроцементзації: температури — 550 °С, 650 °С; тривалість — 1, 3 і 5 год.

У піч було завантажено дві ємності: по-перше, ємність з пластинами зі сталі 09Cr15Ni8Al, по-друге, зі сталі 60Si2Cr. Відлік часу нітроцементзації починався після попереднього нагріву ємності з деталями.

Ємність із зразками нагрівали муфельною шахтною піччю «СШОЛ-12-МЗ-С4» (рис. 1.2).

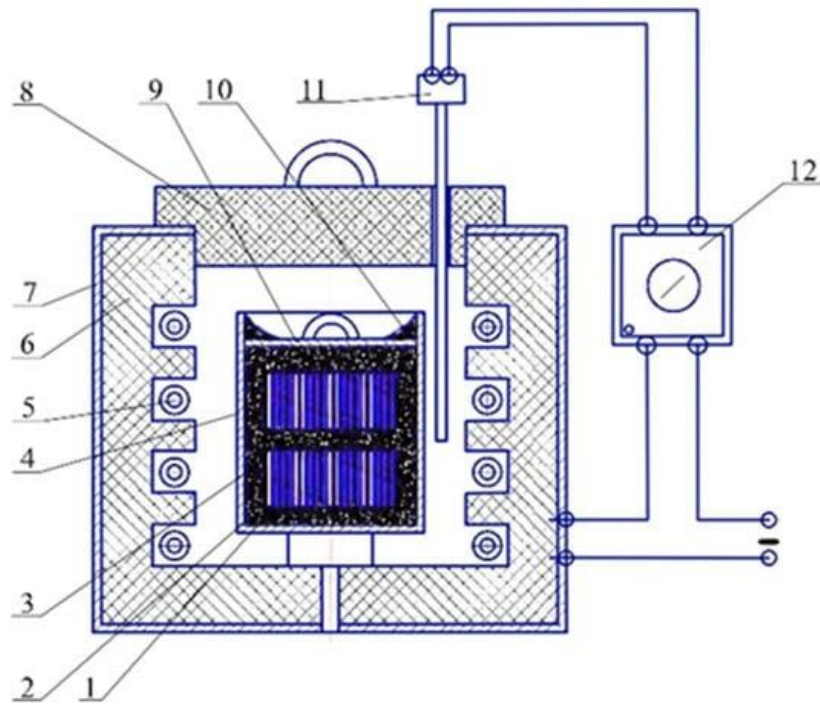


Рисунок [1] 1.2 - Конструктивна схема стану для нітроцементування арматурних тарілок: 1—пластина; 2—вуглецево-азотне покриття; 3—наповнювач (пісок з технічним вуглецем); 4—контейнер; 5—електронагрівач; 6—футеровка печі; 7—корпус топки; 8—кришка топки; 9—кришка контейнера; 10—піщано-глиниста плomba; 11—термопара; 12—регулятор температури

Після нітроцементації проводили охолодження зразків у воді, для чого використовували сепаратор (рис. 1.3).

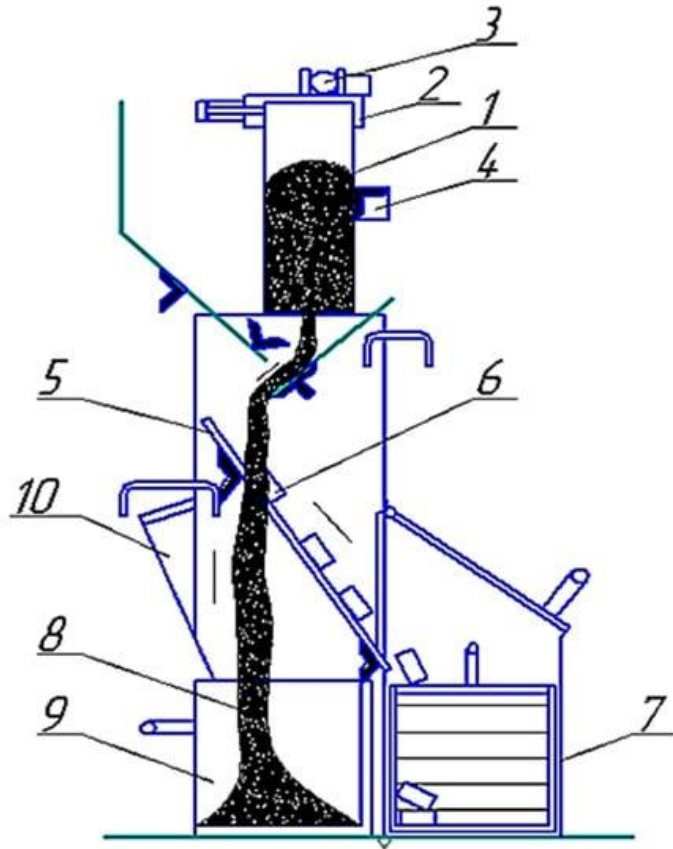


Рисунок [1] 1.3 - Конструктивна схема сепаратора: 1—ємність; 2—розетка; 3—вал; 4—обмежувач; 5—похила решітка; 6—частини; 7—гартівний бак; 8—карбюризатор; 9—металевий контейнер; 10—кришка

Після виймання з печі ємність з кришкою поміщали в гніздо сепаратора. Потім кришку знімали, а контейнер поміщали всередину сепаратора. Вміст ємності виливають на похилу решітку. Наповнювач і відходи покриття вилилися в металевий контейнер, а зразки зісковзнули і впали в резервуар з холодною водою. Зразки не встигли охолонути перед потраплянням у воду через малий час (менше хвилини) на розпакування.

На рис. 1.4 представлено криві розподілу мікротвердості по перерізу нітроцементованих зразків, отримані на косих шлифах за допомогою мікротвердомера «ПМТ-3».

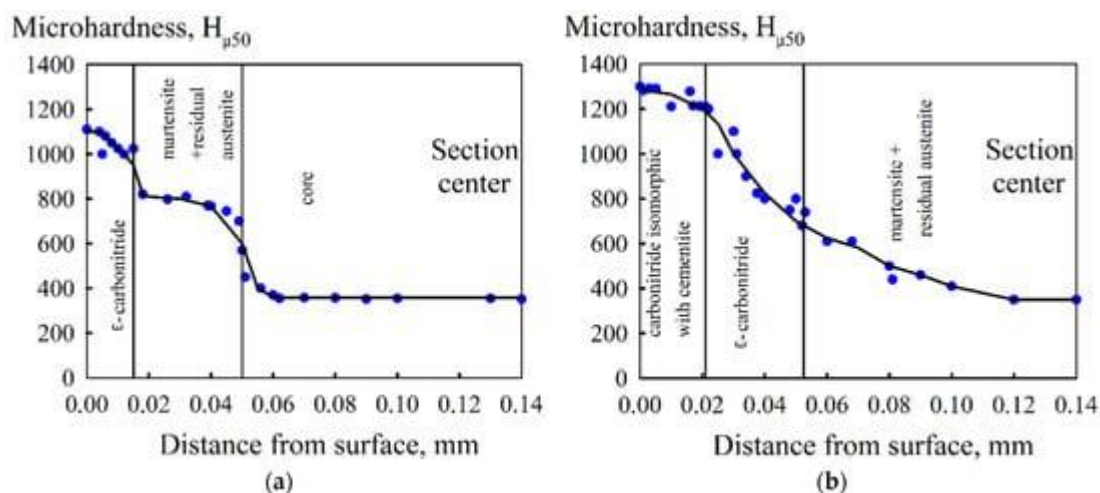


Рисунок [1] 1.4 - Розподіл мікротвердості по перерізу дифузійного шару для нітроцементованої сталі 60Si2Cr: **а** – температура – 550 °С, тривалість – 3 год; **(б)** температура — 650 °С, тривалість — 3 год

Аналіз рис. 1.4 показав що активність вуглецю зростає з підвищенням температури нітроцементування. В результаті на поверхні дифузійного шару утворюється цементит, а частина атомів вуглецю в кристалічній решітці заміщується азотом.

Таким чином, встановлено, що на поверхні пластин утворюються тонкі дифузійні шари (20–40 мкм). Ці шари мають відносно високу твердість і залишкові напруги стиску. У результаті нітроцементация сталі 60Si2Cr при температурах 550 °С і 650 °С підвищує межу втомної міцності від вихідного значення до 1,3 рази. Однак при більш високій температурі нітроцементування призводить до неприпустимого зниження втомної міцності (навіть нижче початкового значення).

В результаті установлено, що нітроцементация сталі 60Si2Cr забезпечує більшу глибину дифузійного шару, ніж сталі 09Cr15Ni8Al. При цьому підвищення межі витривалості сталі 60Si2Cr приблизно в 1,3 рази більше порівняно з необробленою. а термін служби нітроцементованих клапанів збільшується в 5,7 рази порівняно з необробленими.

1.5. Висновки:

1. В результаті проведеного аналізу повітряних компресорів оцінені переваги та недоліки поршневих компресорів.
2. Доведена необхідність використання поршневих компресорів в фермерських господарствах.
3. Розглянуті проблеми експлуатації поршневих компресорів та методи їх усунення.
4. Проаналізований метод нітроцементзації клапанів поршневих компресорів [1] показав, що незважаючи на те, що термін їх служби збільшується в 5,7 разів, порівняно з необробленими, товщина зміцненого шару 20-40 мкм недостатня для використання. При виникненні незначних поводок та жолоблення зміцнений шар буде видалений в процесі шліфування.

1.6. Мета та задачі досліджень

Метою роботи є підвищення довговічності поршневих компресорів за рахунок удосконалення технології нітроцементзації їх клапанів шляхом підвищення товщини шару підвищеної твердості комбінованими екологічно безпечними методами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати умови роботи клапанів поршневих компресорів;
- на підставі аналізу існуючих технологій покращення параметрів поверхневих шарів деталей машин, потрібно вибрати екологічно безпечні і більш раціональні стосовно використання для клапанів поршневих компресорів;
- провести порівняльні випробування.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ КЛАПАНІВ ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРІВ

2.1. Аналіз технологічних методів підвищення працездатності поршневих компресорів

2.1.1. Хіміко-термічні методи обробки деталей машин

Хіміко-термічна обробка (ХТО) набуває широкого застосування в різних галузях техніки завдяки тому, що велика кількість деталей машин і різних механізмів працюють в умовах різних видів зносу, при криогенних або високих температурах, підлягають максимальним напругам які виникають в поверхневих шарах металу.

Після ХТО металів та їх сплавів відбувається поверхнєве зміцнення та захист від корозії підвищується надійність і довговічність деталей машин [13-17]. Такі деталі, як втулки, труби, шайби, гвинти, прокладки, осі, вали, шестерні, плунжери, штоки, колінчасті та розподільні вали, кільця, шпинделі, гвинти, оправки, рейки, зубчасті вінці, півосі, шестерні, гідравлічні циліндри, деталі верстатів і турбін, а також інструменти, штампування тощо потребують поверхневого зміцнення [18]. На сьогодні існує багато методів зміцнення поверхні, заснованих на нанесенні покриттів або зміні стану поверхні. Серед них широко поширена ХТО, яка застосовується для сплавів як чорних, так і кольорових металів.

Суть процесу ХТО полягає в насиченні поверхневих шарів виробу одним або декількома елементами відразу в поєднанні з певною термічною обробкою, яка в залежності від виду ХТО може проводитися перед і після насичення поверхні. Отже, при ХТО структура і властивості поверхні деталі зумовлені як зміною хімічного складу поверхні, так і термічною обробкою.

Метою ХТО є отримання твердої і зносостійкої поверхні деталі при збереженні достатньо пластичної і в'язкої матриці серцевини. Залежно від

елемента, який насичує поверхню виробу, розрізняють наступні види хіміко-термічної обробки:

- Цементация - це насичення вуглецем. Як показано в [19-21], цементация особливо доцільна для досягнення великої глибини науглерожування сталевих виробів. Недоліком способу є висока трудомісткість і погана варіативність умов науглерожування. Метою цементации є створення на поверхні металевого виробу стійкого захисного шару, що підвищує міцнісні характеристики (в тому числі твердість і зносостійкість). Основним недоліком цементации є висока трудомісткість процесу.

- Азотування – насичення азотом. Внаслідок збільшення питомого об'єму сталі в поверхневому шарі при азотуванні і поверхневому гарту виникають великі внутрішні стискаючі напруги. Вони сприяють зниженню розтягуючих напруг від зовнішнього навантаження в процесі експлуатації деталі. У результаті підвищується витривалість деталі, тобто здатність витримувати велику кількість повторних навантажень, як показано в [22-25]. Процес азотування також має деякі технологічні переваги перед науглерожуванням: після азотування не потрібно загартування. Температура процесу на 350–400 °С нижча, ніж під час науглерожування. В результаті викривлення деталей при азотуванні менше. Серйозним недоліком азотування є велика тривалість цього процесу. Цикл азотування триває до двох діб. Крім того, для азотування необхідно використовувати дорогі леговані сталі, тому азотовані деталі виходять в 2-3 рази дорожче звичайних.

- Нітроцементация (ціанування) — одночасне насичення вуглецем і азотом. Процес нітроцементування та ціанування, як зазначається в [26-28], здійснюється при відносно низьких температурах, що сприяє менш інтенсивному зношуванню використовуваного обладнання та не призводить до значних деформацій деталей, що обробляються. Водночас виконання технологічних операцій у таких режимах виключає необхідність охолодження оброблюваного продукту до низьких температур. Після ціанування аустенітна структура сталі стає більш стабільною, що покращує прогартуваність окремих

ділянок матеріалу, підданого такій обробці. Особливо завдяки ціанізованим властивостям матеріалу низьколеговані сталі можна гартувати в маслі. Найбільш істотним недоліком такого виду нітроцементациї, як ціанування, є висока токсичність компонентів виробництва. Для насичення азотом і вуглецем використовують ціаністі солі натрію і кальцію, які є надзвичайно токсичними речовинами.

2.1.2. Іонне азотування (ІА)

Іонне азотування відбувається в умовах плазмового розряду, тому його називають також плазмовим азотуванням (ПА). Переваги процесів газоподібного азотування можуть бути перевершені ПА. Особливо при застосуванні до високолегованих сталей ПА надає високу поверхневу твердість, що сприяє високому опору до зношування та задирів. Втомна міцність підвищується в основному за рахунок розвитку поверхневих стискаючих напруг.

ПА є розумним вибором, коли деталі повинні мати як азотовані, так і м'які ділянки. Можливість створення дифузійного шару без складного шару часто використовується в ПА перед нанесенням покриття PVD або CVD. Можна отримати індивідуальні шари та профілі твердості. Типові сфери застосування включають шестерні, колінчасті вали, розподільні вали, кулачкові слідки, деталі клапанів, гвинти екструдера, інструменти для лиття під тиском, штампи для кування, інструменти для холодного формування, інжектори та інструменти для пластикових форм, довгі вали, осі, зчеплення та деталі двигуна. ПА та плазмове нітроцементування часто надають перевагу відповідним газовим процесам. ПА підходить для всіх чорних матеріалів, навіть для спечених сталей з високою пористістю, чавуну та високолегованих інструментальних сталей, навіть із вмістом хрому вище 12%. Нержавіючі сталі та сплави на основі нікелю можуть піддаватися плазмовому азотуванню та зберігають більшу частину своєї корозійної стійкості при низьких температурах. Особливе застосування - ПА титанових і алюмінієвих сплавів. Для важких навантажень на великі деталі машин, такі як вали та шпинделі, використання спеціальних азотованих сталей,

легованих хромом і алюмінієм, дає величезну перевагу, оскільки ПА створює поверхневу твердість понад 1000 HV.

Плазмове азотування/іонне азотування – це сучасна термохімічна обробка, яка здійснюється в суміші азоту, водню та не обов’язково вуглецю, що витрачає газ. У цьому процесі низького тиску напруга прикладається між партією та стінкою печі. Навколо деталей утворюється тліючий розряд із високим рівнем іонізації (плазма). На поверхні, яка безпосередньо заряджена іонами, утворюються багаті азотом нітриди, які розкладаються, вивільняючи на поверхню активний азот. Завдяки цьому механізму легко зробити екранування, накривши відповідні ділянки металевою ковдрою. ПА дозволяє модифікувати поверхню відповідно до бажаних властивостей. Індивідуальні шари та профілі твердості можуть бути досягнуті шляхом адаптації газової суміші: від складної поверхні без шару з низьким вмістом азоту товщиною до 20 мікрон до складного шару з високим вмістом азоту та додаванням вуглекислого газу (плазми).

2.1.3. Електроіскрове легування (EIL)

Технологія електроіскрового осадження (ESD), теж що і EIL — це новий метод ремонту та зміцнення поверхні металевих матеріалів. Цей метод має переваги простого обладнання, зручності експлуатації та широкого спектру застосування. Леговане покриття має більш високу зносостійкість, хорошу стійкість до корозії, чудові характеристики тертя та інші особливі властивості, тому воно має кращу практичну цінність і широку перспективу застосування. Ця стаття представляє характеристики та принцип технології електроіскрового осадження, аналізує статус досліджень цієї технології та вказує на майбутній напрямок розвитку цієї технології [29].

До основних особливостей електроіскрового легування відносяться: локальна обробка поверхні, коли легування можна проводити в строго заданих місцях без захисту решти поверхні заготовки; висока адгезія нанесеного матеріалу до основи; відсутність перегріву деталей під час обробки; можливість використання як обробних матеріалів як чистих, так і їх сплавів, сполук

тугоплавких металів тощо; дифузійне насичення поверхні катода складовими елементами анода без зміни розмірів катода, тобто деталі. Технологія електроіскрового легування дуже проста, а необхідне обладнання може бути малогабаритним, надійним і транспортабельним. Важливо також відзначити дуже низьке енергоспоживання процесу порівняно з традиційними методами обробки, такими як електронаплавлення, електродугова металізація, плазмове напилення тощо [30-32].

2.2. Методика проведення експериментальних досліджень

2.2.1. Методика ЕІЛ

Відомо, що завдяки ЕІЛ можливо виконувати методи, такі як і при ХТО, але набагато дешевшими затратами. Якщо при ЕІЛ в якості електроду інструменту (ЕІ) ми будемо використовувати графіт, то буде відбуватись процес цементації (ЦЕІЛ). При цьому, якщо легування графітовим електродом буде відбуватись в середовищі азоту, то це буде процес одночасного насичення поверхневого шару деталі вуглецем і азотом, тобто буде протікати процес нітроцементації (НЦЕІЛ). Слід відмітити, що як перший так і другий процеси є екологічно безпечними.

Процес цементації і нітроцементації методом ЕІЛ відбувався за допомогою установки «Елітрон-22А» (рис. 2.1). Матеріалом зразків була сталь 40Х.

При дослідженні використовували енергію розряду в діапазоні $W_p = 0,02-0,55$ Дж.

Енергія розряду і продуктивність зведені в табл. 2.1, а режими роботи установки «Елітрон-22А» в табл. 2.2.

З метою автоматизації процесу зразки закріплювали в супорті верстата, а ЕІ з графіту в утримувачі інструменту (рис. 2.2.)

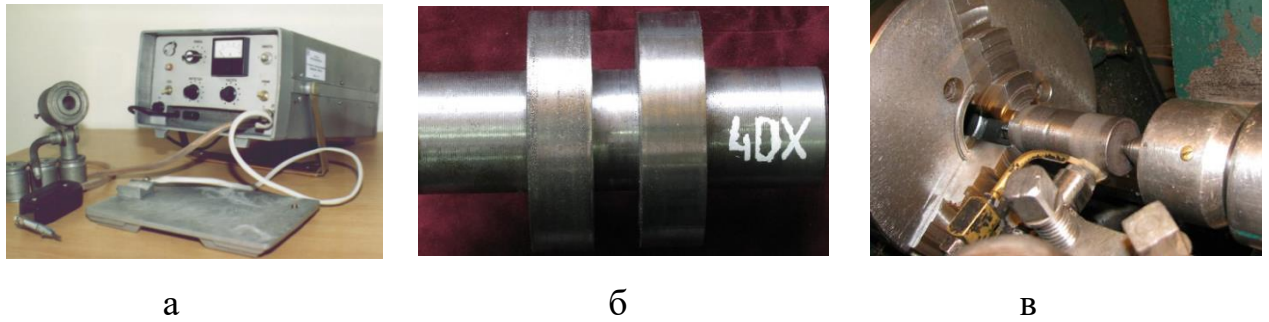


Рисунок 2.1 – Установка моделі «ЕІЛ-8А» (а) для проведення ЦЕІЛ і НЦЕІЛ зразків зі сталі 40Х (б) з подальшою обробкою БУФО (в)

Таблиця 2.1 - Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду

Енергія розряду, Дж	0,02	0,05	0,13	0,55
Продуктивність, см ² /хв	0,1-0,2	0,3-0,4	0,5-1,0	1,0-1,3

Таблиця 2.2 – Режими роботи установки моделі «ЕІЛ – 8А»

№ режиму	Напруга, В	Струм, А	W _p , Дж
		C = 300 мкФ	C = 300 мкФ
1	16,0	1,00-1,40	0,020
2	23,0	1,40-1,60	0,050
3	37,0	1,80-2,00	0,130
4	77,0	2,60-2,80	0,550

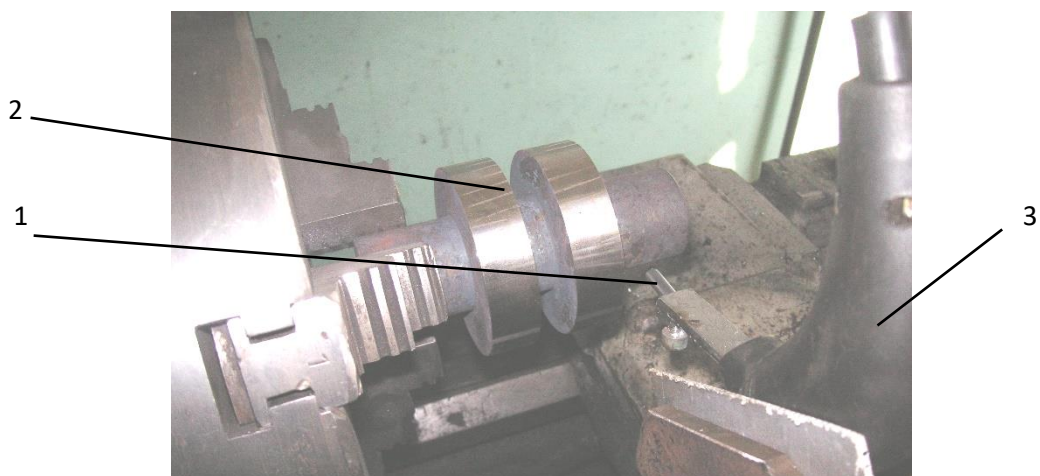


Рисунок 2.2 – Автоматизація процесу ЦЕІЛ:
1 – графітовий ЕІ; 2 – зразок зі сталі 40Х; 3 – вібратор

Враховуючи, що після ЕІЛ відбувається підвищення шорсткості поверхневого шару для її зменшення використовували безабразивну ультразвукову фінішну обробку (БУФО) (рис. 2.1, в)

2.2.2. Методика нітроцементациї

При зміцненні зразків зі сталі 40Х використовували новий спосіб НЦЕІЛ поверхневих шарів після термічної обробки, який включає в себе ЦЕІЛ з одночасною подачею в зону легування азоту за рахунок застосування спеціального пристрою, що знаходиться на вібраторі (рис. 2.3). Таким чином одночасно відбуваються два процеси азотування і цементациї за допомогою методу ЕІЛ, тобто НЦЕІЛ [133].

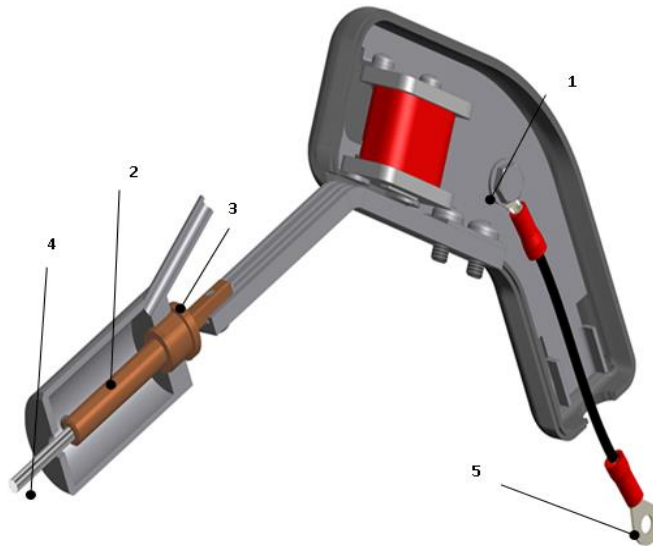


Рисунок 2.3 [34] – Пристрій для проведення НЦЕІЛ:

1 - вібратор, 2 – трубка для подачі азоту, 3 – з'єднання трубки з вібратором,
4 – графітовий ЕІ, 5 - клемма

Технологія НЦЕІЛ відбувалась у три етапи: 1-й етап – ЦЕІЛ за допомогою ЕІ з графіту при енергії розряду, $W_p = 0,550$ Дж; 2-й етап – на цементовану поверхню наносили суспензію з графітового порошку та вазеліну; 3-й етап – згідно 1-го етапу.

2.2.3. Методика проведення порівняльних випробувань

З метою вибору найбільш раціонального методу зміцнення від абразивного зносу відбувались лабораторні іспити на зразках розміром 100,0 x 50,0 x 6,0 мм, вирізаних з листової сталі 40Х, які встановлювали в піскоструминних камерах, які діють під тиском 600 кН/м² від повітряної магістралі. В якості абразиву використовували пісок з Ø часток 0,20 мм. Зразки розташовували під різним кутом дії абразиву, відносно сопла апарату (90 і 45⁰). В якості видів зміцнення використовували: ЦЕІЛ; НЦЕІЛ традиційним способом; НЦЕІЛ новим способом.

Для зіставлення пробували зміцнений зразок (3 на серію) і зразок зі сталі 40Х без зміцнення. Різницю зносостійкості зразків визначали шляхом виміру втрати ваги. Іспити проводилися протягом 60 хв., а зразки зважували кожні 10 хв.

2.3. Результати проведених досліджень

В табл. 2.3 показані результати розподілу твердості по глибині поверхневих шарів зразків зі сталі 40Х, після термічної обробки на твердість 3950-4050 МПа та зміцнених ЦЕІЛ, і нітроцементациєю методом ЕІЛ без проміжного шару з порошку графіту і з шаром суспензії (суміш вазеліну з порошком графіту). Крім цього в таблиці приведені результати шорсткості поверхні після кожного з методів.

Таблиця 2.3 – Розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару після ЦЕІЛ і НЦЕІЛ традиційним і новим способом і шорсткість сформованих поверхонь

Метод	Мікротвердість, МПа по міру поглиблення з кроком ~ 30 мкм						Ra, мкм
	1	2	3	4	5	6	
*ЦЕІЛ	7015	3850	4320	4140	3910	3950	0,8
*НЦЕІЛ	10520	6230	5330	4350	4030	3950	0,7
НЦЕІЛ (новий спосіб)	10650	6330	5530	4520	4220	4000	0,6

* - данні взяті з [34].

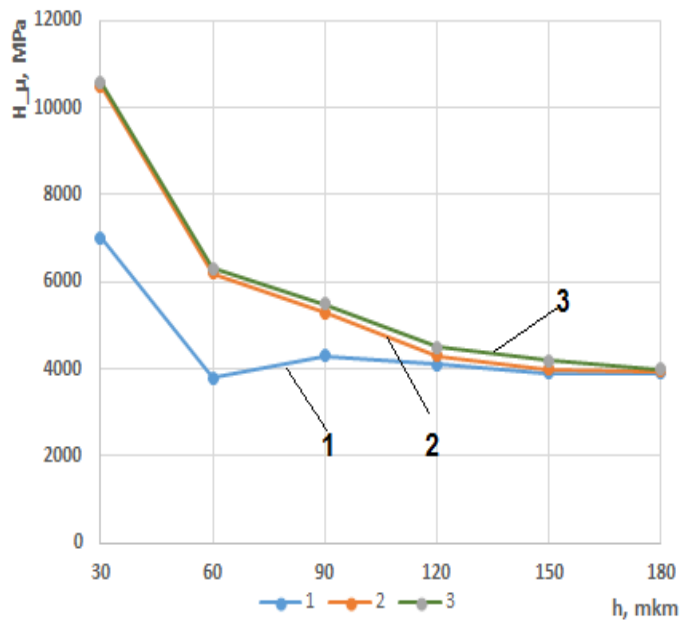
На рис. 2.4 показані мікроструктури поверхонь шарів сталі 40Х, сформованих різними методами і параметри зниження мікротвердості по мірі поглиблення.



а

б

в



г

Рисунок 2.4 – Мікроструктури поверхонь (а, б, в) зразків зі сталі 40Х після, відповідно: ЦЕІЛ; НЦЕІЛ традиційним і новим способом, а також розподіл мікротвердості (г) по глибині шару: 1-ЦЕІЛ; 2-НЦЕІЛ традиційним способом; 3-НЦЕІЛ новим способом

Аналіз таблиці 2.3 і рисунка 2.4 показав переваги нового способу, при використанні якого усувається «провал» величини мікротвердості, який є при ЕІЛ термооброблених сталей (1), так і збільшення мікротвердості з 10520 до 10650 МПа. Крім цього слід відмітити, що при використанні нового способу мікротвердість характеризується плавним зниженням її по мірі поглиблення.

При цьому глибина зони підвищеної мікротвердості збільшується з 120 до 150 мкм, а шорсткість поверхні, Ra зменшується з 0,7 до 0,6 мкм.

Наслідки проведених іспитів зведені в табл. 2.4 та показані на рис. 2.5.

Таблиця 2.4 - Результати іспитів на абразивний знос зразків зі сталі 40Х

Від зміцнення	Час, хв.						Розташування зразків
	10	20	30	40	50	60	
	Втрата ваги, г						
Без покриття	4	10	16	23	33	51	45 ⁰
Без покриття	3	8	12	18	26	38	90 ⁰
ЦЕІЛ	3	6,5	11	16	22	29	45 ⁰
ЦЕІЛ	2	4	8	11	15	21	90 ⁰
НЦЕІЛ традиційним способом	2	4,7	8,2	12,4	18	27	45 ⁰
НЦЕІЛ традиційним способом	2	4	6	9	13	20	90 ⁰
НЦЕІЛ новим способом	1	2	3,5	6,8	11	16	45 ⁰
НЦЕІЛ новим способом	0.5	1	4	6	9	11	90 ⁰

Згідно табл. 2.4 будовані залежності зносу зразків з різним покриттям від часу іспитів та кута обробки абразивом (90⁰ и 45⁰), відповідно рисунки 2.5, а і 2.5, б).

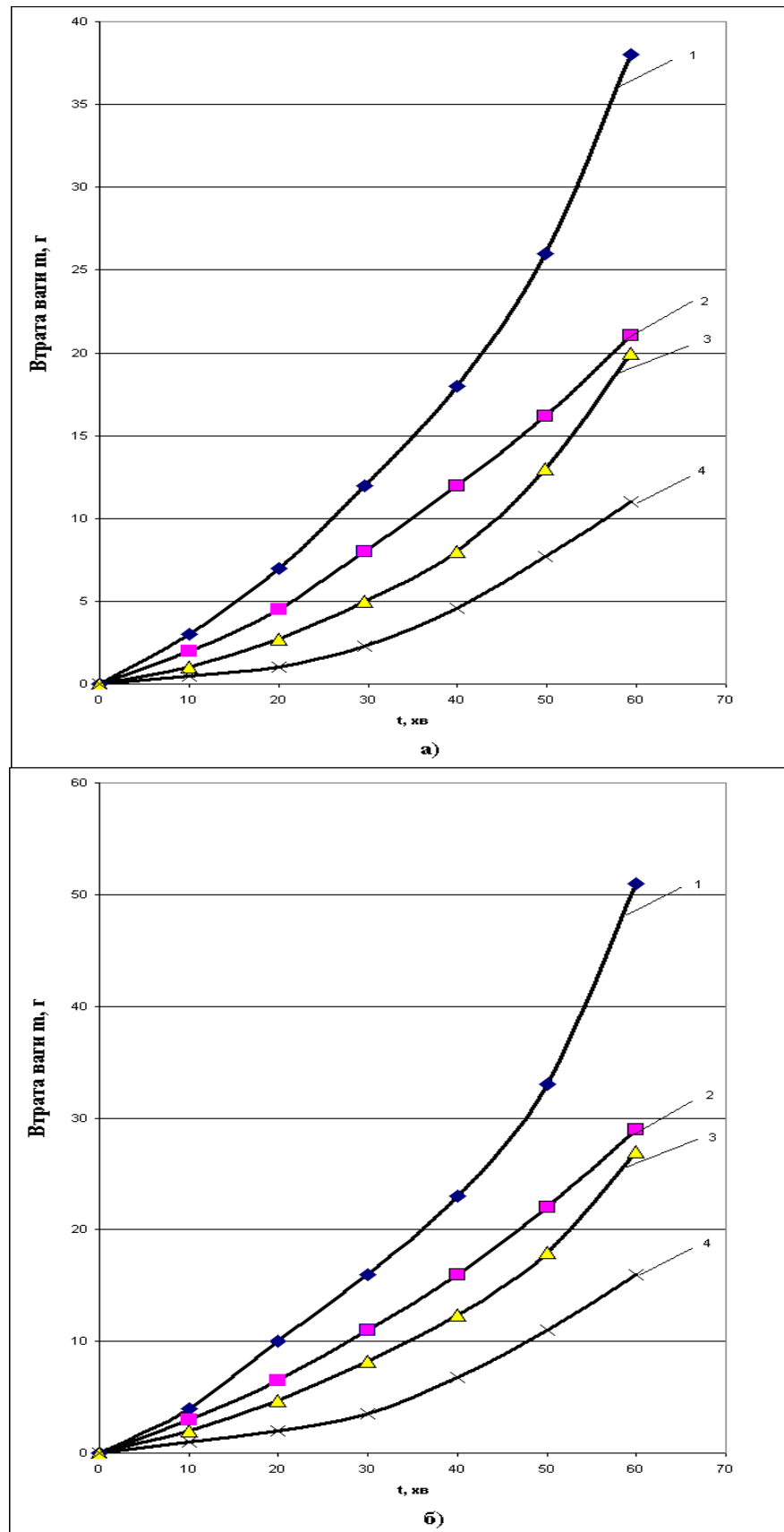


Рисунок 2.5 - Знос зразків сталі 40X, зміцнених згідно табл. 2.3

В результаті аналізу табл. 2.4 і рис. 2.5 встановлено, що зносостійкість проти абразивного зносу зразків з сталі 40Х зміцнених за новою технологією в 3,20 рази вище, ніж без зміцнення після термообробки й, відповідно, в 1,90; 1,70 разів, ніж у зразків, після ЦЕІЛ та НЦЕІЛ за традиційною технологією. Зносостійкість зразків, розміщених під кутом 90° , вище, ніж у зразках, встановлених під кутом 45° .

2.4. Висновки:

1. В результаті аналізу сучасних методів підвищення зносостійкості деталей машин найбільш перспективним може бути метод ЕІЛ.

2. Запропонований новий спосіб нітроцементації поверхневих шарів деталей машин методом ЕІЛ, який включає в себе ЦЕІЛ з одночасною подачею в зону легування азоту.

3. При використанні нового способу усувається «провал» величини мікротвердості, який є при ЕІЛ термооброблених сталей, збільшується мікротвердість з 10520 до 10650 МПа, а також глибина зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, а шорсткість поверхні, R_a зменшується з 0,7 до 0,6 мкм.

4. Порівняльними іспитами встановлено, що зносостійкість проти абразивного зносу зразків з сталі 40Х зміцнених за новою технологією в 3,20 рази вище, ніж без зміцнення після термообробки й, відповідно, в 1,90; 1,70 разів, ніж у зразків, після ЦЕІЛ та НЦЕІЛ за традиційною технологією, а зносостійкість зразків, розміщених під кутом 90° , вище, ніж у встановлених під кутом 45° .

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

КЕРІВНИЦТВО З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВОГО ПОВІТРЯНОГО КОМПРЕСОРА

3.1. Загальні положення

Промислові повітряні компресори є надійним джерелом стисненого повітря для живлення пневматичних інструментів, обладнання та процесів. Однак використання повітряних компресорів також створює потенційні ризики для безпеки, включаючи небезпеку високого тиску, небезпеку електричного струму та проблеми з якістю повітря. Щоб забезпечити безпечне робоче середовище та запобігти нещасним випадкам, для промислових підприємств вкрай важливо впроваджувати комплексні інструкції з безпеки повітряних компресорів і передовий досвід.

Перш ніж вивчати інструкції з безпеки повітряних компресорів, важливо мати базове розуміння того, як повітряні компресори працюють і потенційні ризики, пов'язані з їх використанням. У промисловості використовуються два основних типи повітряних компресорів: об'ємні та динамічні.

Об'ємні компресори

Ці компресори працюють, захоплюючи фіксований об'єм повітря та зменшуючи його об'єм для підвищення тиску. Існує два типи об'ємних компресорів – поршневі та гвинтові. У першому використовується поршень для стиснення повітря в циліндрі, подібно до роботи двигуна внутрішнього згорання, тоді як у другому використовуються два взаємодіючі ротори для безперервного стиснення повітря.

Динамічні компресори

У цих компресорах використовуються високошвидкісні робочі колеса або лопаті для надання швидкості повітрю, яке потім перетворюється на тиск. Два основних типи динамічних компресорів - це відцентрові та осьові компресори.

Відцентрові типи використовують обертове робоче колесо для прискорення повітря, яке потім сповільнюється в дифузорі для створення тиску. З іншого боку, осьові компресори використовують низку обертових лопатей для прискорення повітря, подібно до реактивного двигуна.

Незалежно від типу, усі повітряні компресори працюють за однаковим основним принципом: вони стискають повітря, зменшуючи його об'єм, що збільшує його тиск. Потім стиснене повітря зберігається в резервуарі або ресивері, поки воно не знадобиться. Коли тиск у резервуарі падає нижче заданого рівня, компресор автоматично починає поповнювати запас повітря.

3.2. Загальні небезпеки та ризики

- **Небезпека високого тиску:** Повітряні компресори генерують повітря під високим тиском, яке може спричинити серйозні травми, якщо з ними поводитись неправильно. Ризики включають розриви, вибухи та високошвидкісні снаряди від пошкоджених або під'єднаних компонентів.
- **Електричні небезпеки:** багато промислових повітряних компресорів працюють від електрики, що створює такі ризики, як ураження електричним струмом, спалах дуги та небезпека пожежі, особливо під час встановлення повітряного компресора, технічного обслуговування чи ремонту.
- **Небезпека для якості повітря:** стиснене повітря може містити забруднювачі, такі як пил, волога та мастильні матеріали, які можуть становити небезпеку для дихання при вдиханні. Стиснене повітря, яке використовується для дихання або очищення, також має відповідати суворим стандартам якості повітря, щоб запобігти проблемам зі здоров'ям.
- **Небезпека шуму:** Повітряні компресори можуть створювати високий рівень шуму, що потенційно може пошкодити слух операторів і персоналу, що знаходиться поблизу, якщо не використовувати належний захист органів слуху.

- Небезпека спіткнутися та впасти: погано керовані повітряні шланги та кабелі можуть створити небезпеку спіткнутися, тоді як слизькі поверхні через витік масла або вологи можуть збільшити ризик падінь.

Розуміння поширених небезпек безпеки повітряного компресора є першим кроком у розробці ефективних протоколів безпеки та навчальних програм для промислових об'єктів.

3.3. Заходи безпеки перед використанням повітряного компресора

Щоб звести до мінімуму ризику, пов'язані з використанням повітряного компресора, на промислових підприємствах перед початком експлуатації обладнання слід вжити ряд заходів безпеки:

- Навчання та освіта. Весь персонал, який бере участь в експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті повітряних компресорів, повинен пройти повну підготовку щодо інструкцій з техніки безпеки повітряних компресорів, включаючи визначення небезпек, належні робочі процедури та протоколи реагування на надзвичайні ситуації.

- Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Оператори та обслуговуючий персонал повинні бути забезпечені відповідними ЗІЗ, такими як захисні окуляри, засоби захисту органів слуху, черевики зі сталевими носками та рукавички, щоб захистити від потенційної небезпеки.

- Перевірка та технічне обслуговування: перед кожним використанням повітряні компресори слід візуально перевірити на наявність пошкоджень, витоків або зносу. Регулярне технічне обслуговування, наприклад заміна фільтрів, змащування рухомих частин і перевірка запобіжних пристроїв, слід виконувати відповідно до рекомендацій виробника.

- Правильне встановлення та заземлення: Компресори слід встановлювати в добре провітрюваному приміщенні, подалі від легкозаймистих матеріалів і джерел тепла. Електричні з'єднання повинні бути належним чином заземлені та

встановлені кваліфікованим електриком, щоб запобігти небезпеці ураження електричним струмом.

- Захист і маркування: усі компоненти повітряного компресора, включаючи шланги, муфти та запобіжні клапани, повинні бути надійно закріплені та марковані, щоб запобігти від'єднанню або неправильному використанню. Біля компресора повинні бути розміщені чіткі попереджувальні знаки та етикетки, щоб попередити персонал про потенційну небезпеку.

Дотримуючись цих заходів безпеки, промислові підприємства можуть значно знизити ризик нещасних випадків і травм, пов'язаних із використанням повітряного компресора.

3.4. Процедури експлуатації промислових повітряних компресорів

Оператори повинні дотримуватися стандартних процедур, щоб забезпечити безпечну та ефективну роботу промислових повітряних компресорів. Дотримання робочих процедур і інструкцій з безпеки повітряних компресорів може допомогти промисловим підприємствам забезпечити безпечне та ефективне використання повітряних компресорів, зменшуючи ризик нещасних випадків і простоїв.

Контрольний список перед запуском: перед запуском повітряного компресора оператори повинні заповнити контрольний список перед запуском, включаючи перевірку обладнання на наявність будь-яких видимих пошкоджень, перевірку рівнів рідини та переконання, що всі пристрої безпеки встановлені та функціонують належним чином.

Безпечний запуск і відключення: Оператори повинні дотримуватися рекомендованих виробником процедур запуску і відключення, дозволяючи компресору поступово досягати безпечної робочої температури і тиску. Різкі зміни тиску або температури можуть спричинити пошкодження обладнання та створити загрозу безпеці.

Моніторинг і налаштування: під час роботи оператори повинні постійно контролювати продуктивність повітряного компресора, включаючи рівні тиску, температуру та будь-які незвичайні шуми або вібрацію. Для забезпечення безпечної та ефективної роботи необхідно внести необхідні налаштування.

Безпечне поводження зі стисненим повітрям. Використовуючи стиснене повітря для чищення або інших завдань, оператори повинні переконатися, що тиск повітря знижено до безпечного рівня (зазвичай нижче 30 фунтів на квадратний дюйм) і що для запобігання травмування використовуються відповідні насадки та насадки. Стиснене повітря ніколи не можна спрямовувати на людей або використовувати для чищення одягу.

Аварійні процедури: Оператори повинні бути обізнані з процедурами аварійного відключення та розташуванням захисних пристроїв, таких як клапани скидання тиску та кнопки аварійної зупинки. У разі аварії або несправності обладнання оператори повинні дотримуватися встановлених протоколів реагування на надзвичайні ситуації, щоб мінімізувати ризик травм або пошкодження.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КЛАПАНІВ ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРІВ

4.1. Нормування робіт по нітроцементзації методом ЕІЛ сталевих поверхонь клапанів поршневиx компресорів (КПК)

Матеріали та обладнання для ЕІЛ сталевих поверхонь КПК зведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Оцінка потрібних матеріалів та обладнання

Обладнання та матеріали	Ціна, тис. грн
Пристрій «Елітрон – 22А»	50.000
Вуглець, 1кг	0,200
Азот	1,500

4.2. Розрахунок собівартості ЕІЛ

Собівартість виготовлення 1 комплекту кілець КПК без покриття

$$C_{\text{баз}} = 160 \text{ грн.}$$

Термін роботи 1 комплекту кілець КПК складає

$$T_{\text{баз}} = 2,0 \text{ р.}$$

Собівартість затрат для НЦЕІЛ на 1 комплект кілець КПК складає:

$$C_{\text{мат}} = 15,0 \text{ грн.}$$

Таким чином повна собівартість буде:

$$C_{\text{нов}} = C_{\text{баз}} + C_{\text{мат}} = 160 + 15 = 175 \text{ грн} \quad (4.1)$$

Враховуючи, що 1 комплект зміцнених кілець КПК буде працювати в 2,5 рази довше, то

$$T_{\text{нов}} = T_{\text{баз}} \times 2 = 2,0 \times 2,5 = 5,0 \text{ років.} \quad (4.2)$$

4.3. Розрахунок економічної ефективності розробки

$$E = C_{\text{баз}} : T_{\text{баз}} - C_{\text{нов}} : T_{\text{нов}} = 160 : 2,0 - 175 : 5 = 45,0 \text{ грн} \quad (4.3)$$

4.4 Розрахунок окупності капітальних затрат

Окупність капітальних вкладень (Фок) можна визнати наступним чином

$$\text{Фок} = C_{\text{об}} : E = 50\,000 : 45,0 = 1111 \text{ шт.,} \quad (4.4)$$

де $C_{\text{об}} = 50000$ грн (див. табл. 4.1)

Згідно того, що два працівника за добу роблять приблизно 50 комплектів кілець КПК, то добова (Тдоб) окупність буде:

$$T_{\text{доб}} = \text{Фок} : 50 = 1111 : 50 \sim 22 \text{ доби.}$$

Таким чином, економічна ефективність розробки складає 45,0 грн на 1 комплект кілець КПК, а добова окупність близько 22 діб.

Загальні висновки:

1. В результаті проведеного аналізу повітряних компресорів доведена необхідність використання поршневих компресорів в фермерських господарствах.
2. Проаналізований метод нітроцементзації клапанів поршневих компресорів показав, що незважаючи на те, що термін їх служби збільшується в 5,7 разів, порівняно з необробленими, товщина зміцненого шару 20-40 мкм недостатня для їх використання в виробництві. При виникненні незначних поводок та жолоблення зміцнений шар буде видалений в процесі шліфування.
3. В результаті аналізу сучасних методів підвищення зносостійкості деталей машин найбільш перспективним визначений метод ЕІЛ.
4. Запропонований новий спосіб нітроцементзації поверхневих шарів деталей машин методом ЕІЛ, який включає в себе цементацію методом ЕІЛ з одночасною подачею в зону легування азоту.
5. При використанні нового способу усувається «провал» (зниження) величини мікротвердості, який є при ЕІЛ термооброблених сталей, збільшується мікротвердість з 10520 до 10650 МПа, а також глибина зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, а шорсткість поверхні, R_a зменшується з 0,7 до 0,6 мкм.
6. Порівняльними іспитами встановлено, що зносостійкість проти абразивного зносу зразків з сталі 40Х зміцнених за новою технологією в 3,20 рази вище, ніж без зміцнення після термообробки й, відповідно, в 1,90; 1,70 разів, ніж у зразків, після ЦЕІЛ та НЦЕІЛ за традиційною технологією, а зносостійкість зразків, розміщених під кутом 90^0 , вище, ніж у встановлених під кутом 45^0 .
7. Економічна ефективність розробки складає 45,0 грн на 1 комплект кілець клапанів поршневих компресорів, а добова окупність обладнання близько 22 діб.
8. По матеріалам досліджень опублікована наукова робота (додаток Б).

Список літератури

1. Берладір, К.; Хатала, М.; Говорун Т.; Павленко, І.; Іванов, В.; Ботко, Ф.; Гусак О. Вплив нітроцементації на зміцнення клапанів поршневих компресорів. *Покриття* **2022** , 12 , 574. <https://doi.org/10.3390/coatings12050574>
2. Габібов І.А.; Сейдахмедов Н. С. Рівняння руху тарілок прямоточних клапанів поршневих компресорів, що працюють в системі експлуатації газліфтною нафтовою свердловини. *схід. євро J. Enterp. технол.* **2015** , 4 , 34–38. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
3. Чжао, Б.; Цзя, Х.; Сонце, С.; Вень, Дж.; Peng, X. Модель FSI руху клапана та пульсації тиску для дослідження термодинамічного процесу та внутрішнього потоку всередині поршневого компресора. *анл. Терм. інж.* **2018** , 131 , 998–1007. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
4. Компресорні клапани — сконструйовані для кращої ефективності та надійності. Доступно в Інтернеті: <https://www.hoerbiger.com> (дата доступу: 6 грудня 2021 р.).
5. Компресорні технології. Доступно онлайн: <https://klapan-pik.ru/en/> (дата звернення: 6 грудня 2021 р.).
6. Чжан, JW; Лу, Л.; Сіодзава, К.; Чжоу, WN; Zhang, WH Вплив нітроцементації та постокислення на втомну поведінку легованої сталі 35CrMo в режимі втоми за дуже високих циклів. *Міжн. Дж. Втома* **2011** , 33 , 880–886. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Вейга, А.; Луно-Більбао, С.; Сайнс, С.; Castro, F. Вплив науглерожування при низькому тиску та плазмового азотування на механічні властивості та межі втомної витривалості низьколегованих спечених сталей. *Металевий порошок.* **2020** , 63 , 75–79. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Czerwinski, F. *Термохімічна обробка металів*; IntechOpen: Лондон, Великобританія, 2012; С. 73–112. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]

9. Крмела, Дж.; Говорун Т.; Берладір, К.; Артюхов А.; Касьян С. Вплив нітроцементациї на підвищення ресурсу пружних елементів прямоточних клапанів. *Виробн. технол.* **2021**, *21*, 647–656. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Пантазопулос, Г.; Psyllaki, P. Огляд трибологічної поведінки нітроцементованих сталей для різних промислових застосувань. *Трибол. Інд.* **2015**, *37*, 299–308. [[Google Scholar](#)]
11. Grosch, J. 4—Стійкість до втоми цементованої та азотованої сталі. *Термохімічна інженерія поверхні сталей*; Eric, J., Mittemeijer, M., Somers, AJ, Eds.; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2015; С. 209–240. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. Нобукі, Т.; Хатате, М.; Ікута, А.; Кавасаки, Ю.; Хамасака, Н. Вплив азотування та нітроцементациї на втомні властивості ковкого чавуну. *Міжн. J. Met.* **2017**, *11*, 52–60. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
13. Stetsko, A.E.; Stetsko, Y.T. Formation of Composite Reinforced Coating by Chemical Deposition and Chemical-Thermal Treatment of Boron and Carbon. *Microstruct. Prop. Micro Nanoscale Mater. Film. Coat.* **2020**, *240*, 261–270. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Pashechko, M.; Józwiak, J.; Dziedzic, K.; Karolus, M.; Usydus, I. Surface hardening of HS6-5-2 quick-cutting steel in the course of chemical thermal treatment. *Mater. Sci.* **2017**, *52*, 834–840. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Mei, S.Q.; Guryev, A.M.; Ivanov, S.G.; Lygdenov, B.D.; Tsydypov, B.S.; He, X.Z.; Liang, Q.Y. Research on the chance of increasing the wear resistance of high-speed steel Using chemical thermal treatment methods. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, *479*. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Fedorova, L.V.; Fedorov, S.K.; Serzhant, A.A.; Golovin, V.V.; Systerov, S.V. Electromechanical surface hardening of tubing steels. *Met. Sci. Heat Treat.* **2017**, *59*, 173–175. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Ropyak, L.Y.; Shatskyi, I.P.; Makoviichuk, M.V. Analysis of interaction of thin coating with an abrasive using one-dimensional model. *Noveishie Tekhnol.* **2019**, *41*, 647–654. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]

18. Kostyk, K.; Hatala, M.; Kostyk, V.; Ivanov, V.; Pavlenko, I.; Duplakova, D. Simulation of Diffusion Processes in Chemical and Thermal Processing of Machine Parts. *Processes* **2021**, *9*, 698. <https://doi.org/10.3390/pr9040698>
19. Yang, Y.; Yan, M.F.; Zhang, S.D.; Guo, J.H.; Jiang, S.S.; Li, D.Y. Diffusion behavior of carbon and its hardening effect on plasma carburized M50NiL steel: Influences of treatment temperature and duration. *Surf. Coat. Technol.* **2018**, *333*, 96–103. [Google Scholar] [CrossRef]
20. Marinin, E.; Gavrillov, G.; Belashova, I. The laser-plasma cementation as a method of increasing the abrasive resistance of medium-alloy tool steels. *Mater. Sci. Eng.* **2020**, *09*. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Srivastava, S.; Snellings, R.; Meynen, V.; Cool, P. Utilising the principles of FeCO₃ scaling for cementation in H₂O-CO₂ (g)-Fe system. *Corros. Sci.* **2020**, *169*, 108613. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Che, H.L.; Tong, S.; Wang, K.S.; Lei, M.K.; Somers, M.A. Co-existence of γ' N phase and γ N phase on nitrated austenitic Fe–Cr–Ni alloys-I. experiment. *Acta Mater.* **2019**, *177*, 35–45. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Moskaliuviene, T.; Galdikas, A. Kinetic model of anisotropic stress assisted diffusion of nitrogen in nitrated austenitic stainless steel. *Surf. Coat. Technol.* **2019**, *366*, 277–285. [Google Scholar] [CrossRef]
24. Kusmanov, S.A.; Silkin, S.A.; Belkin, P.N. Effect of Plasma-Electrolytic Polishing on the Corrosion Resistance of Structural Steels after Their Anodic Saturation with Nitrogen, Boron, and Carbon. *Russ. J. Electrochem.* **2020**, *56*, 356–364. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Kostyk, V.O.; Kostyk, K.O.; Kovalov, V.D.; Turmanidze, R.; Dašić, P. Increase of operational properties of tools and machine parts nitriding the powder mixture. *Mater. Sci. Eng.* **2019**, *568*. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
26. Dong, J.; Liu, C.; Liu, Y.; Li, C.; Guo, Q.; Li, H. Effects of two different types of MX carbonitrides on austenite growth behavior of Nb-V-Ti microalloyed ultra-high strength steel. *Fusion Eng. Des.* **2017**, *125*, 415–422. [Google Scholar] [CrossRef]

27. Ivanov, I.V.; Mohylenets, M.V.; Dumenko, K.A.; Kryvchyk, L.; Khokhlova, T.S.; Pinchuk, V.L. Carbonitration of a tool for pressing stainless steel pipes. *J. Eng. Sci.* 2020, 7, 17–21. Available online: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/80836> (accessed on 12 March 2021).
28. Jain, N.; Singh, V.K.; Chauhan, S. Review on effect of chemical, thermal, additive treatment on mechanical properties of basalt fiber and their composites. *J. Mech. Behav. Mater.* 2017, 26, 205–211. [Google Scholar] [CrossRef]
29. Zhengchuan, Z., Guanjun, L., Konoplianchenko, I., Tarellyk, V. B., Zhiqin, G., & Xin, D. (2022). A REVIEW OF THE ELECTRO-SPARK DEPOSITION TECHNOLOGY. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (2 (44), 45-53. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.10>.
30. Михайлов, В.; Казак Н.; Івашку, С.; Овчинников Є.; Васиц, С.; Іаначевичі, А.; Рукуїза, Р.; Зунда А. Синтез багатокomпонентних покриттів електроіскровим легуванням порошковими матеріалами. *Покриття 2023*, 13, 651. <https://doi.org/10.3390/coatings13030651>
31. Іванов В.І.; Бурумкулов, Ф. К. Удосконалення і збільшення ресурсу об'єктів електроіскровим методом: Клаіфікація, особливості технології. *Електр. Серфінг. Пригощати. Методи 2010*, 46, 27–36. [Google Scholar]
32. Михайлюк А.І.; Гітлеціх А. Є. Застосування графіту в електроіскрових технологіях. *Електр. Серфінг. Пригощати. Методи 2010*, 5, 37–44. [Google Scholar]
33. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Павлов О.Г., Саржанов Б.О. Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей. пат. 117980 Україна. № а201703450; заявл. 10.04.2017; опубл. 25.10.2018, Бюл.№ 20.
34. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarellyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225.

Додатки