

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Савчук Віталій Сергійович

УДК 621.43.038:621.785

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ВИПУСКНИХ КЛАПАНІВ
ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Савчук В.С.

Керівник роботи

Міненко С.В.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Савчук Віталій Сергійович. Підвищення довговічності випускних клапанів газорозподільного механізму. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Магістерська робота присвячена підвищенню довговічності випускних клапанів газорозподільного механізму шляхом застосування зміцнюючих покриттів робочої фаски та експериментального обґрунтування їх ефективності. У роботі розроблено й обґрунтовано методику стендових випробувань, а також створено спеціалізований стенд для дослідження довговічності та термостійкості покриттів клапанів в умовах, наближених до експлуатаційних. Запропоновано методику підбору пружин, яка забезпечує необхідні зусилля притискання клапана до сидла під час випробувань.

У результаті експериментальних досліджень визначено коефіцієнт сухого тертя у парі «диск із покриттям – чавунна колодка», що становить $0,12 \pm 0,005$ за навантаження 300 Н, а також встановлено середнє значення інтенсивності зношування зразка на рівні $6,5 \cdot 10^{-7}$ г/м. Порівняльний аналіз зі сталевим зразком 40X10C2M показав підвищення зносостійкості зразка зі зміцнюючим покриттям на 34 %.

Проведено стендові випробування серійного випускного клапана та клапана зі зміцненим покриттям робочої фаски. Оцінку довговічності виконано за напрацюванням до моменту відмови, який визначався досягненням граничної ширини пояса припрацювання 2 мм. На основі аналізу апроксимованих експериментальних даних встановлено, що прогнозоване напрацювання стандартного клапана до виходу з ладу становить близько 240 тис. км, тоді як для клапана зі зміцненим покриттям — до 477 тис. км. Отримані результати свідчать про майже двократне підвищення довговічності зміцненого випускного клапана порівняно зі стандартним, що підтверджує доцільність застосування запропонованих технологічних рішень у практиці ремонту та виготовлення деталей двигунів внутрішнього згоряння.

Ключові слова: випускний клапан, газорозподільний механізм, зміцнююче покриття, стендові випробування.

ANNOTATION

Savchuk Vitalii Serhiiovych. Increasing the durability of exhaust valves of the valve timing mechanism. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The master's thesis is devoted to increasing the durability of exhaust valves of the valve timing mechanism through the application of strengthening coatings on the working face and the experimental substantiation of their effectiveness. The study develops and substantiates a methodology for bench testing and designs a specialized test stand for investigating the durability and thermal resistance of valve coatings under conditions close to real operating ones. A method for selecting springs that ensures the required valve-to-seat contact forces during testing is proposed.

As a result of experimental investigations, the coefficient of dry friction in the “coated disk – cast iron pad” pair was determined to be 0.12 ± 0.005 under a load of 300 N, and the average wear rate of the specimen was established at 6.5×10^{-7} g/m. Comparative analysis with a 40Kh10S2M steel specimen showed that the use of a strengthening coating increases wear resistance by 34%.

Bench tests were carried out on a standard exhaust valve and on a valve with a strengthened coating on the working face. Durability was evaluated based on the operating life up to failure, which was defined by reaching a limiting running-in band width of 2 mm. Analysis of the approximated experimental data showed that the predicted service life of a standard valve until failure is about 240 thousand km, whereas for a valve with a strengthened working face coating it reaches 477 thousand km. The obtained results indicate an almost twofold increase in the durability of the strengthened exhaust valve compared to the standard one, confirming the feasibility of applying the proposed technological solutions in the practice of repair and manufacturing of internal combustion engine components.

Keywords: *exhaust valve, valve timing mechanism, wear resistance, strengthening.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	29
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Підвищення довговічності випускних клапанів газорозподільного механізму є актуальною науково-прикладною задачею, оскільки саме випускні клапани працюють у найбільш жорстких теплових і силових умовах серед деталей ГРМ. У процесі роботи двигуна вони зазнають дії високих температур відпрацьованих газів, циклічних термічних навантажень, ударних контактів у парі «клапан–сідло», а також корозійно-окиснювального впливу продуктів згоряння. Це призводить до прискореного зношування робочих фасок, прогару крайки, втрати герметичності та погіршення газообміну, що безпосередньо знижує потужність, економічність і ресурс двигуна.

Актуальність дослідження посилюється сучасними тенденціями розвитку двигунів: підвищенням літрової потужності, температур у випускному тракті, використанням турбонаддуву та жорсткішими екологічними вимогами. У таких умовах навіть незначне погіршення тепловідведення через контактні поверхні клапана і сідла або погіршення властивостей матеріалу після тривалої роботи може спричиняти різке зростання дефектів і витрат на ремонт. Для сільськогосподарської та автомобільної техніки це особливо важливо, адже відмова клапанного механізму призводить до простоїв, підвищення експлуатаційних витрат і втрати надійності машин у періоди пікових навантажень.

Окремої уваги потребує те, що традиційні підходи до забезпечення ресурсу випускних клапанів (вибір теплостійких сталей, стандартні термообробки, типові конструкції) не завжди забезпечують потрібну довговічність в умовах реальної експлуатації, де присутні коливання якості палива, запиленість, порушення режимів теплового навантаження та інтервалів технічного обслуговування. Тому наукове обґрунтування ефективних способів підвищення довговічності — через удосконалення матеріалів, конструкції, технологій зміцнення/відновлення та

оптимізацію умов контакту клапана із сідлом – є важливим завданням для підвищення ресурсу двигунів і зменшення витрат на ремонт.

Таким чином, дослідження, спрямоване на підвищення довговічності випускних клапанів, має практичну значущість для підвищення надійності ДВЗ, зменшення простоїв техніки, економії паливно-енергетичних ресурсів і забезпечення стабільності показників двигуна протягом усього строку експлуатації.

Метою магістерської роботи є підвищення довговічності випускних клапанів газорозподільного механізму шляхом розроблення та експериментального обґрунтування методики стендових випробувань і застосування зміцнюючого покриття робочої фаски клапана.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі **завдання:**

- проаналізувати умови роботи випускних клапанів газорозподільного механізму та основні механізми їх зношування і відмов;
- розробити та обґрунтувати методику проведення стендових випробувань випускних клапанів на довговічність і термостійкість робочої фаски;
- створити спеціалізований стенд для дослідження трибологічних та експлуатаційних характеристик клапанів у контрольованих умовах навантаження;
- виконати стендові випробування серійного випускного клапана і клапана зі зміцненим покриттям робочої фаски;
- оцінити напрацювання клапанів до моменту відмови за критерієм досягнення граничної ширини пояса припрацювання.

Об'єктом дослідження: процес зношування та руйнування випускних клапанів газорозподільного механізму двигунів внутрішнього згоряння в умовах підвищених термічних і контактних навантажень.

Предмет дослідження: закономірності впливу зміцнюючих покриттів робочої фаски випускних клапанів на їх зносостійкість, термостійкість і довговічність, а також трибологічні характеристики контактної пари «клапан – сідло» в умовах стендових випробувань.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та розв’язання завдань магістерської роботи застосовано комплекс експериментальних і розрахунково-аналітичних методів дослідження. Експериментальні дослідження проводилися з використанням розробленого спеціалізованого стенда, що забезпечує відтворення контактних і теплових навантажень, характерних для роботи випускних клапанів у реальних умовах експлуатації. Для дослідження трибологічних властивостей застосовано метод сухого тертя у парі «зразок із покриттям – чавунна колодка», за яким визначали коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування за заданого навантаження. Зусилля притискання клапана до сідла формувалися шляхом підбору пружин відповідно до розрахункових значень.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Борах К.В., Міненко С.В., Савчук В.С., Буката Д.О. Перспективні напрямки підвищення надійності дизельних автотракторних двигунів. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 74-77.

2. Міненко С.В., Савчук В.С. Способи наплавлення тонких покриттів на поверхню робочої фаски клапана. Міжнародна науково-практична конференція до Дня автомобіліста та дорожника. “Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура ‘2025” (MAITRI 2025). 30-31 жовтня 2025 року. Харків 2025. С.

2. Савчук В.С. Стенд для випробовування випускних клапанів. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 80-82.

Практичну значимість Практична значимість магістерської роботи полягає в можливості використання отриманих результатів для підвищення надійності та ресурсу випускних клапанів газорозподільного механізму двигунів внутрішнього згоряння, що експлуатуються в автомобільній та сільськогосподарській техніці.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 49 сторінок комп'ютерного тексту, містить 24 рисунки.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Перспективні напрямки підвищення надійності дизельних автотракторних двигунів

Надійність дизельних автотракторних двигунів залишається одним із визначальних критеріїв їх ефективності та довговічності. Сучасні дизелі широко застосовуються у транспортних засобах і сільськогосподарській техніці завдяки поєднанню високої економічності з міцністю і ресурсом роботи. Проте посилення експлуатаційних навантажень, екологічні вимоги та конкуренція з альтернативними силовими установками змушують конструкторів і технологів шукати нові шляхи підвищення надійності таких двигунів [1].

Одним із ключових напрямків підвищення надійності є застосування матеріалів з покращеними властивостями для виготовлення найнавантажених деталей. Яскравий приклад – перехід від алюмінієвих до сталевих поршнів у важконавантажених дизелях. Сталевий поршень витримує вищі температури та тиски, демонструє більшу міцність і зносостійкість. На відміну від алюмінію, сталь має близький до матеріалу циліндра коефіцієнт термічного розширення, що усуває проблему спрацювання верхніх канавок під поршневі кільця. Практика показала, що одnodетальні сталеві поршні з спеціальними покриттями (фосфатування, графітні та інші захисні шари) здатні забезпечити ресурс роботи дизеля порядку «мільйона миль» пробігу без капітального ремонту (понад 1,5 млн км). Високоміцні чавуни з вермикулярним графітом (CGI) набувають поширення для виготовлення блоків циліндрів і головок: цей матеріал поєднує відносну легкість з підвищеною міцністю, жорсткістю та втомною витривалістю у порівнянні із сірим чавуном і алюмінієм. Застосування компактного графітового чавуну дозволяє знизити вагу двигуна та рівень шуму без втрати

надійності, що особливо важливо для сучасних дизелів, орієнтованих на високі навантаження та екологічні стандарти [1].

Традиційні схеми ГРМ із механічними штовхачами і необхідністю регулювання теплових зазорів поступово еволюціонують у бік безштовхачевих (lashless) систем. Сучасні гідравлічні штовхачі автоматично компенсують зазори, усуваючи потребу регулярного регулювання клапанів і таким чином знижуючи ризик відмов через людський фактор або знос деталей. Компанія Cummins у 2021 році впровадила таку систему в офф-гайвейних двигунах, а станом на 2025 рік розробила нове покоління безштовхачевого ГРМ, сумісного з гальмом двигуна, що демонструє підвищення надійності та скорочення обсягів сервісного обслуговування. Гідравлічні штовхачі не лише спрощують технічне обслуговування, але й забезпечують оптимальні фази газорозподілу за різних режимів, що покращує згоряння та знижує навантаження на клапанний механізм. Перспективним напрямом є відмова від розподільного вала взагалі – «безкулачкові» електромагнітні або електро-гідравлічні приводи клапанів, які досліджуються останні десятиріччя. Повністю електронно-керований ГРМ теоретично може покращити керованість процесів в циліндрі та усунути ряд обмежень традиційних механізмів, однак питання його довговічності й надійності потребують додаткових досліджень (існуючі прототипи поступаються класичним рішенням за ресурсом роботи) [1].

Паливна система дизеля є критичною з точки зору надійності: понад 50% відмов двигунів спричинені несправностями саме паливної апаратури, часто через некондиційне пальне. Тому конструктивні заходи з підвищення ресурсу паливної системи мають прямий вплив на загальну надійність двигуна. Сучасні системи Common Rail забезпечують надвисокий тиск впорскування (до 2000–2500 бар і більше) з точним дозуванням палива. Використання прецизійних багатофункціональних форсунок із кількома отворами та електронним управлінням дозволяє досягти тонкого розпилення палива і рівномірного згоряння. Для продовження строку служби форсунок і паливних насосів високого

тиску застосовують високоякісні матеріали та покриття: зокрема, форсунки виготовляють із корозійностійкої сталі та використовують тверді покриття на деталях, що труться, аби зменшити знос від контактів з паливом недостатньої якості. За рахунок цього зменшуються навантаження на компоненти і подовжується строк їх служби. Додатково, інженери впроваджують нові рішення для підвищення надійності систем паливоподачі в складних умовах. Наприклад, окремі зарубіжні патенти пропонують вбудовані пристрої підігріву дизпалива для полегшення холодного пуску в умовах мінусових температур, запобігаючи кристалізації парафінів та втраті подачі палива. В цілому, конструктивний розвиток паливної системи спрямований на забезпечення стабільного впорскування палива за будь-яких умов безвідмовно протягом усього ресурсу двигуна [1].

Застосування нових матеріалів і конструктивних рішень суттєво підвищує витривалість вузлів дизельних двигунів. Використання сталевих поршнів, високоміцних чавунів та спеціальних покриттів забезпечує стійкість до зносу і високих навантажень, дозволяючи сучасним двигунам напрацювати рекордні пробіги без відмов. Вдосконалення систем газорозподілу (гідроштовхачі, безкулачкові приводи) та живлення (прецизійні форсунки, стійкі матеріали) сприяє стабільній роботі двигуна і зменшенню ризику раптових несправностей. Таким чином, конструктивні інновації закладають фундамент підвищеної надійності дизельних агрегатів нового покоління [1].

Сучасні технології виробництва дозволяють підвищити якість виготовлення деталей двигунів, що безпосередньо впливає на їх надійність. Запровадження верстатів з ЧПУ (числовим програмним управлінням) для обробки деталей забезпечує мікронну точність виготовлення посадкових поверхонь, геометрії циліндрів, шийок колінвалів тощо. Висока точність сприяє рівномірному розподілу навантажень і зменшує ризик концентрації напружень або дисбалансів, що можуть призводити до втомних тріщин. Наприклад, завдяки CNC-обробці та суворому контролю геометрії вдалося досягти ідеального вирівнювання осей

обертання колінчастого вала і валу розподільного, що підвищує плавність роботи двигуна та знижує знос підшипників. Поєднання точної обробки з оптимальними режимами термічної обробки (гартування, відпуск, хіміко-термічна обробка) значно покращує довговічність деталей. Зокрема, твердість і витривалість колінчастих валів та розподільчих валів підвищуються завдяки поверхневому зміцненню – індукційному гартуванню чи азотуванню. Відомо, що дифузійне азотування створює твердий зміцнений шар на поверхні сталі, який підвищує межу витривалості матеріалу і опір втомному руйнуванню [1]. Дослідження показують, що саме від якості зміцнення шийок валів та кулачків залежить їх ресурс роботи у важких режимах; жорсткі вимоги виробників зобов'язують забезпечувати оптимальну глибину та твердість зміцненого шару для досягнення заданого моторесурсу. У результаті комплексного застосування високоточної механічної обробки і ефективної термообробки вдається отримати максимальну точність взаємодії деталей і їх довговічність: сучасні процеси гарантують плавність роботи та збільшення ресурсу двигуна [1].

Інноваційним трендом виробництва є застосування адитивних методів, зокрема 3D-друку металів, для виготовлення складних деталей двигунів. Компанія Cummins однією з перших почала експериментувати з 3D-друком як для ремонту, так і для серійного виготовлення елементів дизельних моторів. Адитивні технології дозволяють реалізувати конструкції, неможливі або дуже складні для традиційного лиття чи мехобробки. Наприклад, метод локального спікання порошку дає змогу «вироснути» деталі з внутрішніми порожнинами складної форми – вдосконалені канали охолодження у голівках циліндрів або поршнях, оптимізовані системи подачі мастила тощо. Крім того, 3D-друк спрощує інтеграцію кількох деталей в один вузол: замість кількох окремих частин, з'єднаних кріпленнями або зварюванням, можна надрукувати єдину цільну деталь. Це усуває потенційні слабкі місця (стики, шви), знижує масу та підвищує міцність компоненту. За даними представників Cummins, об'єднання декількох частин у цільну друковану деталь дозволяє отримати легші, але

міцніші та більш надійні компоненти вузлів двигуна. У перспективі це сприятиме спрощенню конструкції, скороченню кількості точок відмов та полегшенню ремонту. Наразі адитивні методи застосовуються переважно для дрібносерійного виробництва або виготовлення прототипів і запасних частин, однак розвиток технології та здешевлення 3D-друку поступово розширюють його використання і в масовому двигунобудуванні [1].

Поряд із новими методами виготовлення, впроваджуються й сучасні системи контролю якості, що не допускають в виробі дефектів, здатних знизити надійність. На підприємствах активно застосовуються автоматизовані системи неруйнівного контролю (ультразвукова дефектоскопія, рентген-контроль литва, 3D-сканування геометрії деталей), які на ранніх етапах виявляють тріщини, усадочні раковини, відхилення форми та розмірів. Цифрові технології та моделювання (CAE-системи, цифрові двійники) дозволяють ще на стадії проектування передбачити критичні зони концентрації напружень і оптимізувати конструкцію під технологічні можливості. Все це зменшує розкид якості деталей і забезпечує стабільність характеристик двигунів у експлуатації. Варто зазначити, що в сучасному двигунобудуванні все ширше застосовується концепція Design for Reliability – проектування з урахуванням надійності, коли конструктори спільно з технологами закладають у виріб здатність протистояти деградації протягом заданого терміну служби. Це досягається добором відповідних матеріалів, технологій обробки та збірки. Зокрема, у технологічних процесах впроваджують суворий контроль чистоти складальних операцій (щоб запобігти потраплянню абразиву чи сторонніх часток у двигун), підтримку оптимальних монтажних зазорів, застосування точних динамометричних інструментів для затягування різьбових з'єднань тощо. Кінцевою метою є отримання кожного окремого двигуна, який точно відповідає проектним параметрам і не містить прихованих дефектів, здатних проявитися відмовою під час роботи [1].

Новітні виробничі технології зробили значний внесок у підвищення надійності дизельних двигунів. Високоточна механічна обробка та оптимальні

режими термічного зміцнення забезпечують високу якість критичних деталей (валів, шестерень, гільз циліндрів), знижуючи ймовірність передчасного зносу чи руйнування. Адитивні методи відкривають шлях до створення інтегрованих, полегшених і міцних компонентів, усуваючи слабкі місця традиційних конструкцій. Система всеохоплюючого контролю якості та орієнтація на надійність на всіх етапах життєвого циклу двигуна гарантують, що сучасні дизелі виходять з заводу з максимально можливим ресурсом і запасом міцності.

Правильний добір і своєчасна заміна моторної оливи – базовий чинник довговічності будь-якого двигуна. Якісне мастило виконує одразу кілька життєво важливих функцій: воно зменшує тертя між рухомими поверхнями, мінімізує їх знос, відводить тепло від поршнів, підшипників та інших гарячих деталей, а також змиває продукти зношування і нагару, утримуючи їх у масляному фільтрі. У дизельних моторах, де тиск згоряння і механічні навантаження дуже високі, формування надійної масляної плівки є критичним для запобігання задирав і задирання поверхонь. За відсутності належної мастильної плівки метал треться об метал, що прискорює появу мікропошкоджень і вироботки деталей. Достатнє та безперервне змащення особливо важливе для пар тертя, таких як кулачок – штовхач розподільного вала, поршневе кільце – стінка циліндра, вкладиш підшипника – шийка колінвала. Крім того, масло виконує роль додаткового охолоджувача: воно відводить частину тепла від днища поршнів, підшипників і розподільних шестерень до піддону або теплообмінника мастильної системи. Сучасні оливи для дизелів збагачені пакетом присадок, які нейтралізують кислотні продукти згоряння, запобігають корозії та не дають утворюватися відкладенням нагару. Таким чином, якісна олива підтримує двигун в чистоті і захищає його від внутрішнього абразиву (сажі, металевої стружки), відфільтровуючи його разом з маслом [1].

Перспективи підвищення надійності дизельних автотракторних двигунів пов'язані з інтелектуалізацією та цифровізацією їх експлуатації, використанням нових матеріалів і наукових підходів до проектування. Інтеграція штучного

інтелекту та систем датчиків дозволяє в реальному часі оптимізувати роботу двигуна і запобігати аварійним ситуаціям. Новітні матеріали і покриття, що наразі досліджуються, у перспективі зменшать зношування деталей практично до нуля. Розвинені методи аналізу надійності (FMECA, FTA) ще на стадії проекту допомагають закласти високий ресурс, а впровадження найкращих світових практик експлуатації гарантує реалізацію цього ресурсу на практиці. Зарубіжний досвід підтверджує, що комплексний підхід – від лабораторії до поля – здатен забезпечити безпрецедентну надійність сучасних дизельних двигунів. Курс на інновації та обмін технологіями між країнами дозволяє сподіватися, що дизельні силові агрегати ще довго залишатимуться еталоном витривалості та продуктивності у своїй галузі [1].

1.2 Способи наплавлення тонких покриттів на поверхню робочої фаски клапана

Захист робочої фаски випускного клапана від високотемпературних і високошвидкісних вихлопних газів переважно здійснюється шляхом наплавлення тонкого шару покриття з матеріалів, наведених у таблиці 2. Ця технологія дозволяє забезпечити вищі експлуатаційні характеристики оброблюваної поверхні порівняно з матеріалом основи. Покращуються показники міцності, корозійної стійкості, термостійкості, зносостійкості тощо. Наплавлення покриттів може здійснюватися різними способами, які дозволяють досягти необхідних параметрів [1].

Газополум'яне напилення з подальшим оплавленням широко застосовується в машинобудуванні та ремонтному виробництві. Згідно з роботами [1, 2], цей метод використовується для створення відновлювальних і зміцнювальних покриттів робочих поверхонь деталей машин [2].

Метод газополум'яного напилення використовує полум'я згоряння газової суміші ацетилену та кисню для оплавлення присадкового матеріалу. Схема

обладнання для напилення покриттів на деталі машин із використанням дроту або стрижня наведена на рис. 1 [1].

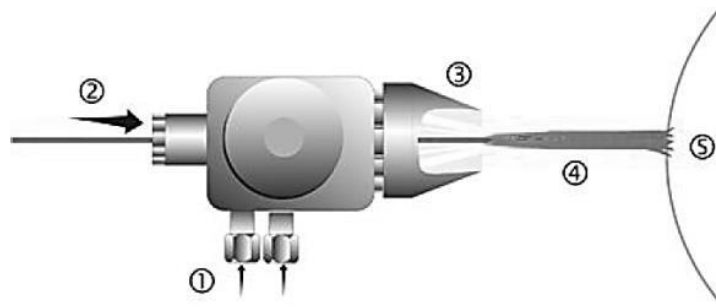


Рис. 1.1. Схема установки газополум'яного напилення дроту або стрижня: 1 – підведення ацетилену, кисню; 2 – подача дроту (стрижня); 3 – сопло; 4 – полум'я з напилюваним матеріалом; 5 – деталь [2].

Згідно з поданою схемою, у камеру згоряння установки через вхідні отвори 1 подається ацетилен (або пропан-бутан). Через калібрований отвір 2 подається дріт або стрижень, які оплавляються в камері згоряння. Завдяки згорянню газової суміші розплавлені частинки присадкового матеріалу виносяться полум'ям 4 через сопло 3 на поверхню деталі 5 [2].

При використанні порошкових присадкових матеріалів застосовується інша конструкція газового пальника, подана на рисунку 9. Пальник оснащений бункером 13, який заповнюється порошковим присадковим матеріалом; завдяки ежекційному ефекту відбувається забирання матеріалу з бункера та його переміщення трубкою 5. На виході з мундштука 1 порошок плавиться в ацетилен-кисневому полум'ї. Далі розплавлені частинки спрямовуються на підготовлену поверхню оброблюваної деталі.

Для зменшення площі впливу плями полум'я, збільшення концентрації енергії в заданій ділянці застосовують надзвукове газопламенне напилення порошків [2].

Схема реалізації цього методу наведена на рис. 3[1].

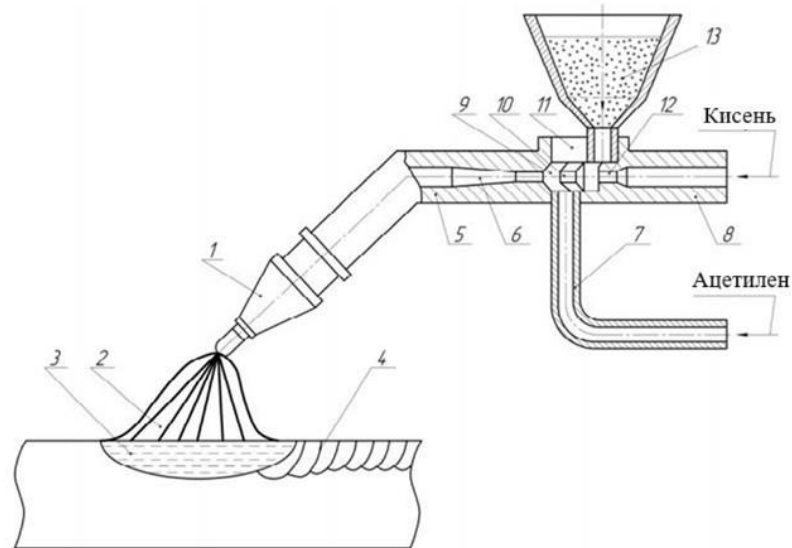


Рис. 1.2. Схема газопорошкового наплення порошку: 1 – мундштук; 2 – полум'я; 3 – зварювальна ванна; 4 – наплавлений шар; 5 – трубка; 6 – канал; 7 – ацетиленова трубка; 8 – киснева трубка; 9 – камера змішування; 10, 12 – ейектори; 11 – змішувальна камера; 13 – порошок [2].

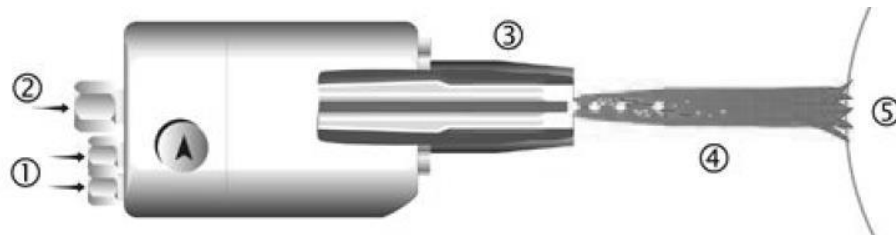


Рис. 1.3. Схема надзвукового газополуменевого наплення порошків: 1 – пальне, кисень; 2 – порошок; 3 – профільоване сопло; 4 – полум'я з напилюваними частинками; 5 – деталь [2].

Надзвукове газополуменеве наплавлення ґрунтується на згорянні пального газу в суміші з киснем під великим тиском у камері згоряння. Процес горіння газової суміші дозволяє отримати високі значення тиску в камері, що забезпечує надвисоку швидкість витікання полум'я та розплавлених частинок порошкового присадочного матеріалу (до 9 М) через профільоване сопло [2].

Газополуменевим методом наплення можна створювати покриття товщиною від 100 мкм до 10 мм. Товщина зони сплавлення підкладки з покриттям становить 100–120 мкм. Витрата стрижнів або дроту становить 6–8 кг/год, а порошкового присадочного матеріалу – до 2,7 кг/год. Рекомендована

дисперсність частинок для газопорошкового методу становить 40–100 мкм. Швидкість витікання розплавленого матеріалу сягає 200 м/с. Температура ацетилено-кисневого полум'я дорівнює 2900 °С [1]. Для оброблення великогабаритних деталей потрібне попереднє нагрівання оброблюваних зон до 500–700 °С. Рекомендований припуск на подальшу механічну обробку становить близько 0,5...0,7 мм. Міцність зчеплення покриття з підкладкою досягає 300...400 МПа [1].

Перевагами цих методів є: висока міцність зчеплення; невисока вартість обладнання та матеріалів; висока продуктивність; універсальність застосування.

Недоліками цих методів є: значна товщина мінімального шару; велика величина необхідних припусків на обробку; неможливість оброблення дрібних деталей; нагрівання великого об'єму оброблюваної деталі [2].

Метод детонаційного напилення покриттів заснований на тому ж принципі, що й газопламне напилення — нанесення покриття відбувається за рахунок перенесення присадкового матеріалу на поверхню оброблюваної деталі високотемпературним газовим потоком. За джерелами [2], ця технологія використовується для створення упрочнювальних покриттів, покриттів, що застосовуються в електротехніці та електроніці, а також відновлювальних покриттів деталей машин [2].

Схема пристрою для детонаційного напилення порошкових матеріалів наведена на рис. 1.4 [1].

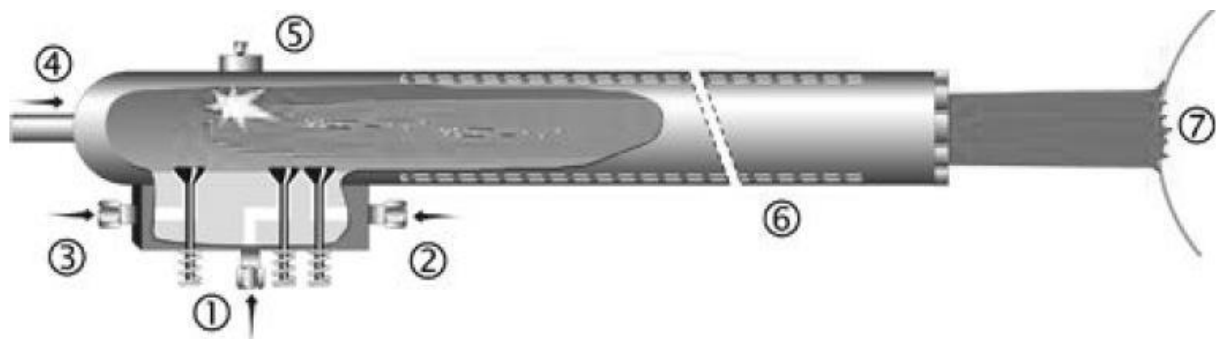


Рис. 1.4. Схема детонаційного напилення покриття: 1 – ацетилен; 2 – кисень; 3 – азот; 4 – напилюваний порошок; 5 – запалювальний пристрій; 6 – охолоджувана вихідна труба; 7 – деталь [2].

Відмінною рисою методу детонаційного напилення є циклічність подачі розплавлених частинок порошкового присадкового матеріалу на поверхню деталі. Такий характер роботи забезпечується конструкцією детонаційної гармати. У блок змішування газів подаються ацетилен 1, кисень 2 і азот 3, які потім надходять у стовбур пристрою 6. Через патрубок 4 подається порошковий матеріал. При досягненні певного стану газових компонентів і подачі порошку спрацьовує запалювальний пристрій 5, який підпалює горючу газову суміш. За рахунок високої швидкості зростання температури й тиску відбувається просування ударної хвилі, що складається з продуктів згоряння газів та частинок присадкового матеріалу. Вибухова хвиля переносить присадковий матеріал і сплавляє його з поверхнею деталі 7 зі швидкістю, яка визначається геометрією стовбура [2].

Детонаційне напилення дає змогу отримувати покриття товщиною від 10 мкм до 2 мм. Швидкість потоку перебуває в діапазоні 400...1000 м/с. При ударі частинок присадкового матеріалу об поверхню деталі відбувається їх пластична деформація, що призводить до підвищення температури сплавлення приблизно на 100 °С. Максимальне значення температури в зоні контакту вибухової хвилі з оброблюваною деталлю сягає 4000 °С. Швидкострільність установки може досягати 10 циклів за секунду. Діаметр плями одного пострілу становить близько 20 мкм. Адгезійна міцність покриття знаходиться в межах 80...250 МПа. Витрата присадкового матеріалу становить приблизно 6 кг/год [1].

Перевагами детонаційного напилення покриттів є: мінімальна товщина покриття; висока продуктивність; добра адгезійна міцність.

Недоліками детонаційного напилення покриттів є: висока вартість обладнання; складність технологічного процесу; підвищена шорсткість поверхні.

Плазмове наплавлення покриттів із порошкових присадкових матеріалів має широке застосування в машинобудуванні, ремонтному виробництві та інших галузях [2, 6].

Сутність цього методу полягає у перенесенні теплової енергії та порошкового присадкового матеріалу за допомогою потоку плазми, який утворюється між електродом плазмотрона та оброблюваною деталлю [1]. Схема плазово-порошкового наплавлення наведена на рис. 1.5. Головка плазмотрона з неплавким вольфрамовим електродом 1 містить канали для подачі транспортуючого газу 4 та канали для подачі гранульованого порошку присадкового матеріалу 5. Для охолодження пристрою використовуються канали 8, через які подається вода. Неплавкий електрод (катод) пристрою з'єднаний із «-» полюсом джерела живлення 3, а деталь 2 (анод) – із «+». Використання такої схеми можливе з різними механізованими пристроями або автоматами. Існує також можливість переобладнання наявних зварювальних автоматів [2].

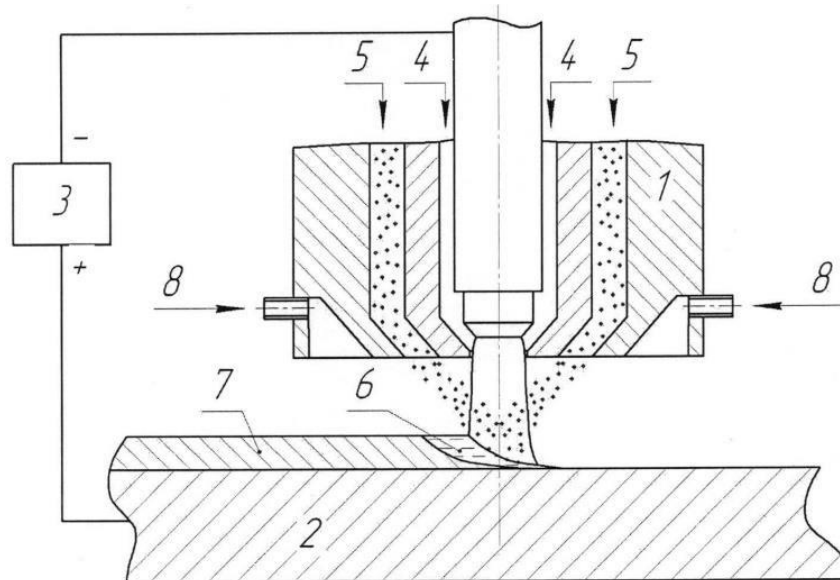


Рис. 1.5. Схема плазово-порошкового наплавлення: 1 – плазмотрон; 2 – деталь; 3 – джерело живлення; 4 – канал для транспортуючого газу; 5 – канал для подачі порошку; 6 – зона оплавлення; 7 – наплавлений шар; 8 – канал для подачі охолоджувальної рідини [2].

Температура потоку плазми сягає 10000...15000 °С. Таке значення зумовлене високою концентрацією енергії в плазовому потоці, який обмежений кільцевим газовим струменем. Витрата присадкового матеріалу може досягати 30 кг/год. Товщина покриттів перебуває в діапазоні від 50 мкм до 6,5 мм. Діаметр оброблюваної поверхні за один прохід становить 1,2...45 мм. Рекомендовані

припуски на механічну обробку знаходяться в межах 0,4...0,9 мм. Глибина проплавленого шару становить 0,3...2,5 мм. Міцність зчеплення покриття з основою становить 40...50 МПа [1].

Переваги плазово-порошкового наплавлення: висока продуктивність; доступність обладнання; добра міцність зчеплення покриття.

Недоліки плазово-порошкового наплавлення: неможливість створення тонких покриттів; велика величина припуску на механічну обробку; значна глибина проплавленого шару [2].

Згідно з даними, наведеними в [1, 2], електроіскрове наплавлення дає змогу не лише відновлювати зношені деталі, але й зміцнювати їх за відносно невеликих витрат [2].

Електроіскрове наплавлення є різновидом електроерозійних методів оброблення деталей. Цей спосіб створення покриттів ґрунтується на електроіскровій ерозії металів та інших струмопровідних матеріалів. Схема електроіскрового наплавлення наведена на рис. 1.6 [2].

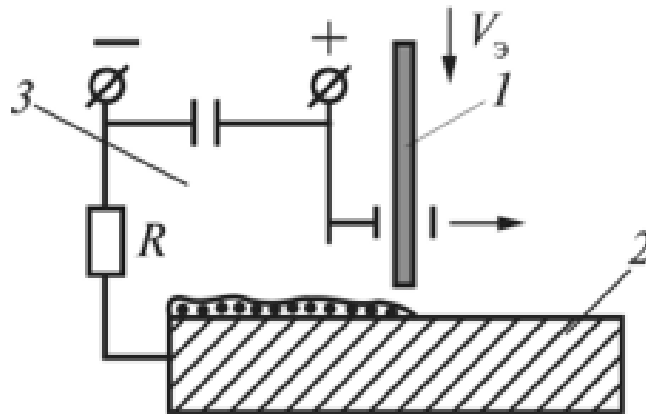


Рис. 1.6. Схема електроіскрового наплавлення: 1 – електрод; 2 – деталь; 3 – електрична схема обладнання [2].

В установці для електроіскрового наплавлення використовується рухомий електрод (анод) 1, який переміщується вздовж вертикальних напрямних. Деталь 2 виконує роль катода. Цей метод оброблення є імпульсним. Для утворення іскри між електродом і деталлю застосовують джерело постійного струму. У момент зближення катода з оброблюваною деталлю між ними проскакує іскра, що

спричиняє ерозію матеріалу анода та перенесення його розплавлених частинок на поверхню деталі з подальшим сплавленням. Для запобігання утворенню дуги використовується конденсатор [1, 2].

Можлива також інша схема реалізації електроіскрового наплавлення, у якій електрод є нерухомим. Для утворення іскри між електродом і деталлю застосовують присадковий порошковий матеріал, який імпульсно подається в зону оброблення [2].

Температура потоку розплавлених частинок електрода варіюється в межах 10000...15000 °С, що відповідає показникам плазмового наплавлення. Це пояснюється тим, що в момент проскакування іскри навколо неї відбувається іонізація повітря, яке перетворюється на плазму. Продуктивність методу становить близько 0,5 кг/год. Товщина покриттів знаходиться в діапазоні від 0,25 до 1,5 мм. Глибина проплавленого шару основної деталі становить 0,05...0,3 мм. Правильна підготовка оброблюваної поверхні дає змогу досягти гарних показників шорсткості, що відповідають 5–6 класу. Міцність зчеплення з підкладкою є високою і становить 80...100 МПа [2].

Переваги електроіскрового наплавлення: високі показники чистоти обробленої поверхні; невелика глибина проплавленого шару; висока міцність зчеплення покриття з основою [2].

Недоліки електроіскрового наплавлення: низька продуктивність; малий діапазон товщини покриттів; нестабільність іскри внаслідок вібрації електрода.

Лазерне наплавлення є одним із найперспективніших методів створення тонких зміцнювальних покриттів. Існує велика кількість праць, у яких описано конструкцію обладнання, технологію лазерного наплавлення, параметри присадкових матеріалів та характеристики покриттів у різних галузях науки й техніки [2].

Лазерне наплавлення належить до термічних способів оброблення деталей. Сутність методу полягає в нагріванні невеликої ділянки оброблюваної деталі лазерним випромінюванням, що утворюється за допомогою оптичного

квантового генератора. У зоні дії лазерного променя відбувається розплавлення тонкого шару деталі та присадкового матеріалу, найчастіше порошку. Для наплавлення зазвичай застосовують імпульсні лазерні установки [4, 3]. Схема лазерного порошкового наплавлення наведена на рис. 1.7 [1].

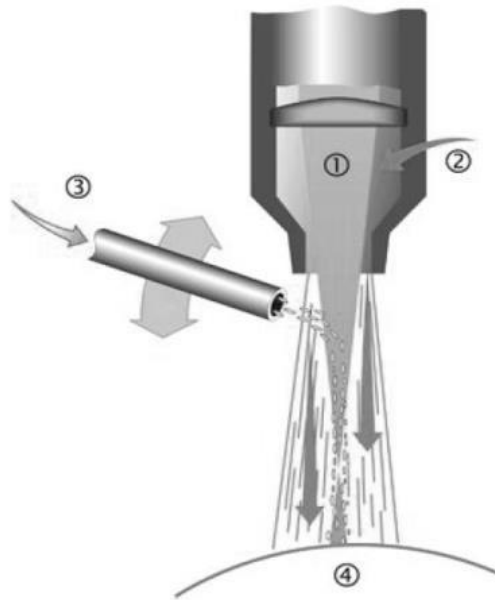


Рис. 1.7. Схема лазерного порошкового наплавлення: 1 – лазерний промінь; 2 – захисний газ; 3 – порошок; 4 – деталь [2].

Лазерна установка генерує висококонцентрований когерентний, монохроматичний і поляризований світловий потік (лазерний промінь) 1. Завдяки концентрації великої кількості енергії лазерного променя на невеликій площі деталі 4 відбувається її нагрівання та сплавлення з присадковим порошковим матеріалом 3, який подається спеціальним пристроєм. Для формування спрямованого потоку порошку та створення захисної хмари в зоні плавлення використовується захисний газ 2 [1, 2].

Температура в зоні контакту лазерного променя з деталлю може досягати 10^6 °С. Діаметр плями променя становить 0,2...0,3 мм. Глибина проплавленого шару дорівнює близько 10 мкм. Градієнт температур у зоні оброблення становить приблизно 10^8 К/см. Товщина створюваних покриттів знаходиться в діапазоні від кількох мікрметрів до 150 мкм. Витрата порошкового матеріалу не перевищує 2 кг/год. Шорсткість поверхні може перебувати в межах Ra 0,63...1,0. Міцність зчеплення покриття з основною деталлю становить близько 350 МПа [1, 2].

Переваги лазерного наплавлення: мінімальна товщина покриття; мінімальний термічний вплив на деталь; висока якість поверхні; висока міцність зчеплення покриття [2].

Недоліки лазерного наплавлення: низька продуктивність; висока вартість обладнання [2].

1.3 Короткоімпульсна лазерна наплавлення ультрадисперсних порошкових матеріалів як можливість зміцнення деталей

Як описувалося раніше, для наплавлення покриттів на поверхню оброблюваної деталі подається порошковий матеріал. Крім подачі матеріалу газовим потоком можливі інші види перенесення порошку: газополум'яне напилення, хімічне або гальванічне осадження, електроіскрове легування, механічне нанесення суспензії, нанесення фольги, стрічок, смуг тощо [4].

Перспективи використання даного методу для зміцнення деталей машин, в тому числі і робочої фаски клапанів, обґрунтовуються високими технічними і технологічними показниками.

Порівняння економічних і технічних показників різних методів дозволяє зробити висновок про доцільність застосування лазерного наплавлення для зміцнення поверхонь деталей машин. Найбільшою перевагою даний метод володіє для обробки малогабаритних деталей з необхідністю нанесення тонких покриттів, з огляду на малу продуктивність.

Негативний вплив на покриття, що формуються лазерним методом наплавлення, має висока швидкість нагрівання і подальшого охолодження оброблюваної зони 1010 К/с. Висока швидкість охолодження часто є причиною утворення мікротріщин в структурі покриття, призводить до крихкості покриття і прикордонного шару деталі. В результаті впливу стискаючих або розтягуючих напружень, при охолодженні обробленої деталі, існує ймовірність руйнування, відшарування наплавленого шару покриття. Додатковий негативний вплив в

даному процесі надають різні концентратори у вигляді оксидних плівок між наплавленими шарами, великих зерен карбідів, боридів, нітридів, пор. Також існують різні порошкові композиції, наприклад Ni-Cr-B-Si, які мають різну морфологію виділення фаз, при лазерній обробці [3, 2, 4]. Мінімізація описаного вище впливу можлива правильним підбором компонентів. Компоненти присадочного матеріалу варто вибирати з урахуванням їх коефіцієнтів лінійного теплового розширення, а також з урахуванням коефіцієнта теплового розширення оброблюваної деталі. Також можливі різні технологічні прийоми щодо зменшення залишкових термічних напружень, наприклад попередній підігрів оброблюваної деталі до заданої температури.

Принцип зміцнення робочих поверхонь деталей машин безпосередньо пов'язаний з використовуваними матеріалами деталей, умовами роботи, типами сполучень і т. д. В рамках зміцнення робочої фаски клапана розглядаються такі впливи, як ударні, термічні, контактні навантаження, сухе тертя, обдув високошвидкісними високотемпературними вихлопними газами. У даних умовах роботи особливу увагу варто приділяти пористості покриття. Пористість структури призводить до ерозійного зносу поверхні високошвидкісним потоком вихлопних газів. Також пористість негативно впливає на шорсткість поверхні, а згодом на коефіцієнт сухого тертя і зносостійкість. Для мінімізації негативного впливу на довговічність клапана пропонується застосування ультрадисперсних порошкових матеріалів, що дозволяють досягти щільної структури, яка має мінімальну пористість.

Ультрадисперсними порошками вважаються порошкові композиції, що складаються з нанорозмірних частинок. На відміну від повсюдно використовуваних порошків, де частинками виступають зерна в мікророзмірній або макророзмірній області, в ультрадисперсних порошках частинками виступають окремі молекули або молекулярні системи [5, 13]. Застосування нанорозмірних порошків дозволяє формувати «бездефектні» покриття. Це досягається за рахунок мінімізації пор між елементами шару. Покриття виходить

строго структурованим без дефектів кристалічної решітки. Даний стан є наслідком іншої природи деформації матеріалів, заснованих на нанорозмірних частинках. У нанометричних матеріалах деформації проходять по межах зерен, що пояснюється більшою концентрацією атомів матеріалу на межі зерен, що зміцнюють поверхню самого зерна [3, 5, 10].

На сьогоднішній день існує велика кількість покриттів, створених на основі нанорозмірних присадочних порошкових матеріалів. Наприклад, в роботі [8] наводиться приклад гідрофобного, зносостійкого покриття на основі діоксиду кремнію, отриманого методом поливу. Для отримання твердих зносостійких покриттів методом лазерного наплавлення в роботах [4, 9] застосовуються нанорозмірні модифікуючі добавки WC і $\text{TiN} + \text{Y}_2\text{O}_3$. Також для отримання надтвердих зносостійких покриттів ріжучих інструментів можуть використовувати нанорозмірні порошки нітриду TiN та ін. [6] На даний момент величезною популярністю користуються адитивні технології, засновані на об'ємному формуванні виробів шляхом лазерного спікання матеріалів, в тому числі порошкових металів і металокерамічних порошкових композицій.

Метод селективного лазерного плавлення заснований на скануючому випромінюванні поверхні оброблюваної деталі в поперечному напрямку. Для утворення покриття заданої товщини проводиться нанесення присадочного матеріалу у вигляді суспензії на поверхню деталі, що сплавляється під дією енергії лазерного променя. Описані дії повторюються для утворення наступного шару. Даний метод дозволяє нарощувати покриття без зміни характеристик попередніх шарів [1]. Другим варіантом адитивного методу, заснованого на лазерному плавленні, є метод прямого лазерного нанесення матеріалу. Головною відмінністю є створення покриття подачею порошкового присадочного матеріалу через сопло в зону дії лазерного променя [7].

Сплавлення присадочного матеріалу з оброблюваною деталлю методом селективного лазерного плавлення проходить у шість етапів [6]:

- утворення і зростання зв'язків між нанорозмірними частинками;

- поява шийок між частинками та їх збільшення;
- «заростання» поверхневої пористості;
- сфероїдизація пор;
- усадка покриття в місцях знаходження ізолюваних пор;
- укрупнення пор.

Утворення і зростання зв'язків з'являється безпосередньо з початком термічного впливу на обмазку з присадочного матеріалу. Даний процес носить дифузійний характер, який призводить до утворення і зростання меж між частинками присадочного матеріалу, які зміцнюють порошкове покриття.

Кінцевим результатом даного процесу є утворення шийок між частинками. Для утворення шийок повинна виконуватися умова перенесення речовини в контактну область частинок, обумовлена існуванням різних транспортних механізмів. Поява перемичок між частинками призводить до збільшення міцності покриття і його електропровідності. В даний момент структура покриття містить дві фази – речовина і порожнечі. Зростання шийок протікає в короткому проміжку часу, але при лазерній обробці даний процес може протікати до більш пізніх стадій, що пояснюється малим часом перекристалізації. Зникнення наскрізних пор відбувається за рахунок збільшення розмірів і кількості шийок між частинками. Цей процес призводить до утворення закритих ізолюваних пор. Але поряд з цим спостерігається повсюдне зменшення кількості пор в покритті і його усадка і ущільнення. Подальший розвиток шийки призводить до переміщення пор в міжчастинковий простір, де відбувається їх сфероїдизація. Усадка сферичних пор вимагає великих енергетичних і часових витрат, що при використанні скануючого лазерного плавлення практично не спостерігається.

Це призводить до укрупнення існуючих ізолюваних пор за рахунок зникнення інших. Але при цьому загальна щільність покриття залишається постійною, а число пор зменшується за рахунок збільшення розміру тих, що збереглися.

Виходом із ситуації, що склалася, є зменшення розмірів частинок присадочного матеріалу до нанорозмірних. Ультрадисперсні порошки за рахунок більшої вільної поверхневої енергії вимагають менших температур для утворення і розвитку зв'язків між частинками.

Висновки по розділу

Визначено та описано можливі методики створення тонких зміцнювальних покриттів на поверхні робочої фаски клапана. Аналіз методів дозволив виділити селективне лазерне плавлення як найбільш перспективне для створення тонких зміцнювальних покриттів із зносостійких термостійких керамічних матеріалів. Даний вибір заснований на високих енергетичних показниках методу: високій щільності енергії, яка досягає 10^{10} Вт/см²; високій температурі в зоні дії променя, що досягає 10^6 °С; високому градієнту температур, рівному 10^8 К/см; високій швидкості охолодження, що досягає 10^{10} К/с.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Опис обладнання для отримання покриття

Для наплавлення тонких керамічних покриттів на робочу фаску клапана використовувалася методика, заснована на технології селекційного лазерного плавлення. В якості основної установки, що використовується при напавленні покриття, застосовувався короткоімпульсний лазер на ітрієво-алюмінієвому гранаті КВАНТ-60, оснащений числовим програмним управлінням. Даний генератор лазерного випромінювання через спеціальну лінзу оплавляв нанесену на поверхню робочої фаски клапана суспензію з присадочного матеріалу. Установка для формування зміцнювального покриття, яка використовувалася в дослідженнях, наведена на малюнку 22 [13, 14].

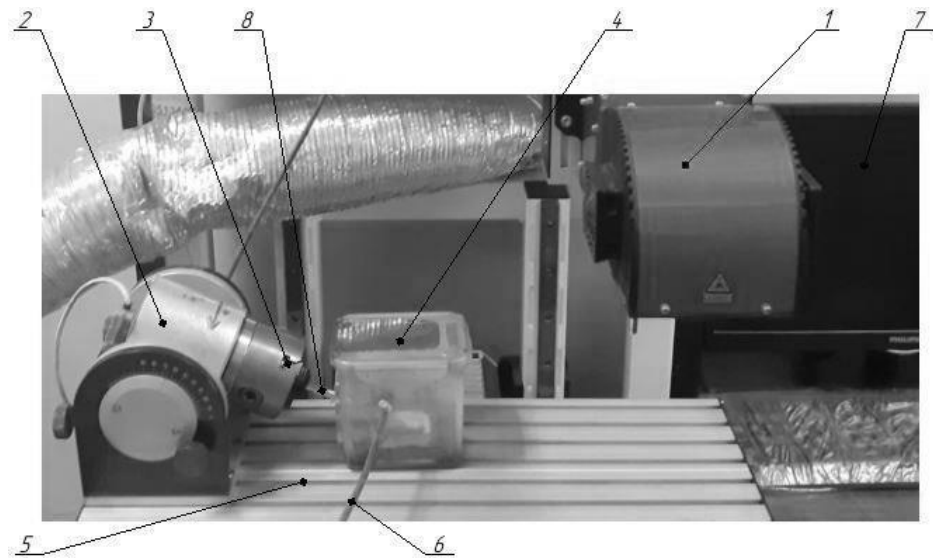


Рис. 2.1. Установка для наплавлення зміцнювального покриття на поверхню робочої фаски клапана: 1 – лазерна установка; 2 – привід клапана; 3 – трикулачковий патрон; 4 – камера для наплавлення; 5 – стіл установки; 6 – трубка для підведення аргону; 7 – персональний комп'ютер для управління установкою; 8 – оброблюваний клапан

З огляду на високу температуру (близько 10^6 °C) в зоні дії лазерного променя відбувається окислення матеріалів, що входять до складу покриття і підкладки, на повітрі під дією кисню. Для виключення шкідливого впливу компонентів навколишнього середовища і досягнення планованих результатів наплавлення була розроблена спеціальна герметична камера, що виключає доступ кисню та інших газів в зону плавлення. Схема герметичної камери для наплавлення покриття на поверхні робочої фаски клапана наведена на рис. 2.2.

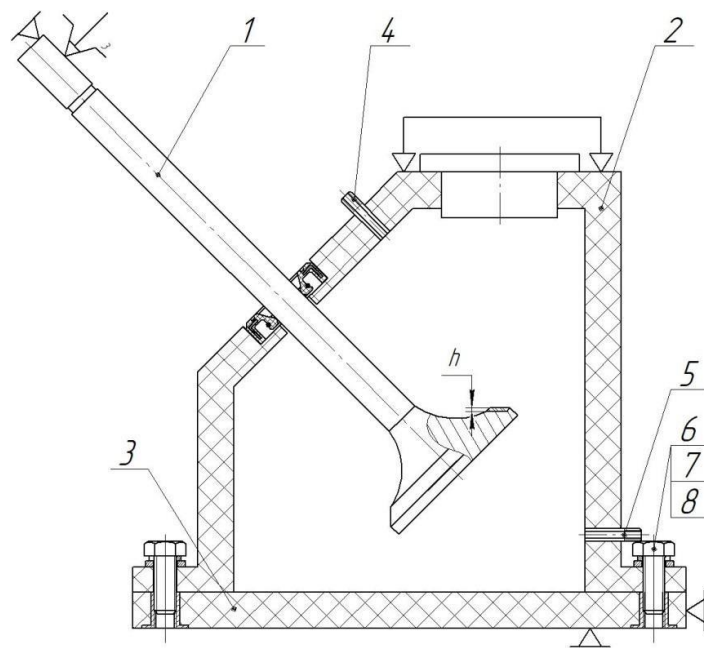


Рис. 2.2. Камера для наплавлення зміцнювального покриття: h – товщина покриття, мкм; 1 – клапан; 2 – камера; 3 – кришка; 4 – випускний патрубок для повітря; 5 – впускний патрубок для аргону; 6, 7, 8 – кріпильні елементи

У дану камеру встановлюється оброблюваний клапан 1, стрижень якого проходить через ущільнювальну манжету і кріпиться в трикулачковому патроні лазерної установки. Після монтажу клапана 1 кришка камери 3 закривається через ущільнювальну прокладку за допомогою кріпильних виробів 6, 7, 8.

Камера для наплавлення встановлюється на стіл обладнання для наплавлення і закріплюється. До вхідного патрубку 4 і вихідного патрубку 5 підключаються трубки для закачування інертного газу – аргону. Для здійснення наплавлення у верхній частині камери передбачено світлопроникне вікно.

2.2. Технологія отримання в го покриття

Робота по створенню покриття починалася з підготовчих операцій. Лазерна установка піддавалася контролю. Перевірялася працездатність всіх вузлів установки, цілісність ущільнювачів камери для наплавлення, стан штуцерів для підведення аргону і відведення повітря, працездатність зворотного клапана на відвідній трубці. Потім очищалося і знежирювалося скло камери для наплавлення. Проводилося налаштування установки, виставлявся фокус +12, напруга на лазерній трубці 330 В, час сканування лазерного променя 4 мс, швидкість сканування 80 мм/с, потужність лазерного променя 30 Дж, частота сканування лазерного променя 60 кГц. Задавався кут повороту трикулачкового патрона на 0,9 град. після кожного проходу лазерної головки.

Клапани до наплавлення зміцнювального покриття надходять у спеціальному консерваційному мастилі, яке потрібно видалити. Для цього використовуються склади, що дозволяють відокремити елементи мастила від поверхні деталі. У даній роботі застосовувався нефрас С2-80/120 ДСТУ.

Клапан занурювався в ємність з нефрасом С2-80/120, і за допомогою пензля видалялися консерваційне мастило і забруднюючі речовини з усіх поверхонь.

Потім клапан протирався ганчіркою і встановлювався на дно тарілки клапана на чисту суху поверхню.

Потім проводилося шліфування робочої фаски клапана на верстаті Р-108 з використанням шліфувального круга ПП 125х10х32 24 А 40ПС2-СТ19К5А ДСТУ. Дана операція необхідна для видалення стандартного захисного покриття, наплавленого на поверхню робочої фаски клапана. Товщина різання не перевищувала $0,05 \pm 0,01$ мм.

Наступним етапом проводилася підготовка порошкової суспензії. Дана суспензія наносилася спеціальним аплікатором на поверхню робочої фаски клапана з витримкою товщини (50 ± 5) мкм.

Прилипання суспензії до підготовленої поверхні робочої фаски клапана відбувається за рахунок хорошої змочуваності і, відповідно, достатньої адгезії для утримання присадочного матеріалу. Потім проводилася витримка клапана з нанесеною суспензією протягом 40 с. Проводився контроль, при якому перевірялася рівномірність розподілу обмазки, контролювалася відсутність тріщин, пор.

Наступним етапом було наплавлення зміцнювального покриття на робочу фаску клапана. Схема наплавлення наведена на рис. 2.3.

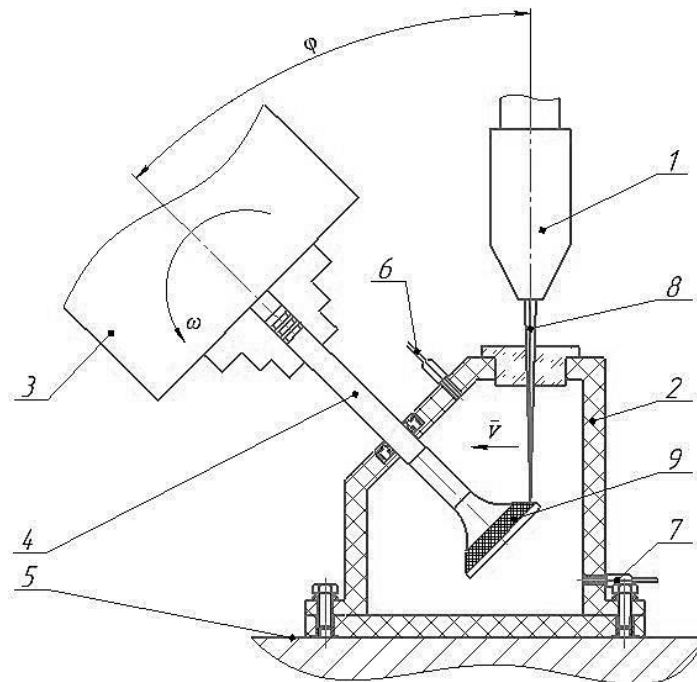


Рис. 2.3. Схема наплавлення зміцнювального покриття: V – вектор швидкості лазерної головки; ω – кутова швидкість обертання трикулачкового патрона; φ – кут нахилу трикулачкового патрона; 1 – лазерна головка; 2 – герметична камера; 3 – трикулачковий патрон; 4 – оброблюваний клапан; 5 – стіл лазерної установки; 6 – випускний патрубок; 7 – впускний патрубок; 8 – лазерний промінь; 9 – присадний порошковий матеріал у вигляді обмазки.

Для наплавлення проводився монтаж клапана 4 в камеру наплавлення 2.

Стрижень клапана 4 встановлювався і закріплювався в трикулачковому патроні 3. До наплавлювальної камери 2 підводився стіл 5, до якого проводилося

кріплення камери. Потім здійснювалося підключення відповідної трубки 6 і підвідної трубки 7. Через трубку 7 здійснювалося закачування аргону в камеру.

Через трубку 6, оснащену зворотним клапаном, здійснювалося витіснення повітря, що залишилося. Потім здійснювалося налаштування режимів лазерної установки і фокусу лазерної головки 1. Після запуску установки лазерний промінь 8, проходячи через світлопроникне скло камери 2, здійснював скануючу обробку робочої фаски клапана.

Після завершення одного проходу лазерного променя в напрямку вектора $\vec{V}$, здійснювався поворот трикулачкового патрона 3 на заданий кут. Потім лазерна головка 1 переміщалася в зворотному напрямку.

Після лазерної обробки робочої фаски клапана здійснювався демонтаж клапана з наплавочної камери. Для поліпшення якості зміцнювального покриття виконувалося алмазне вигладжування. Схема процесу пластичної деформації покриття без зняття матеріалу представлена на рис. 2.4.

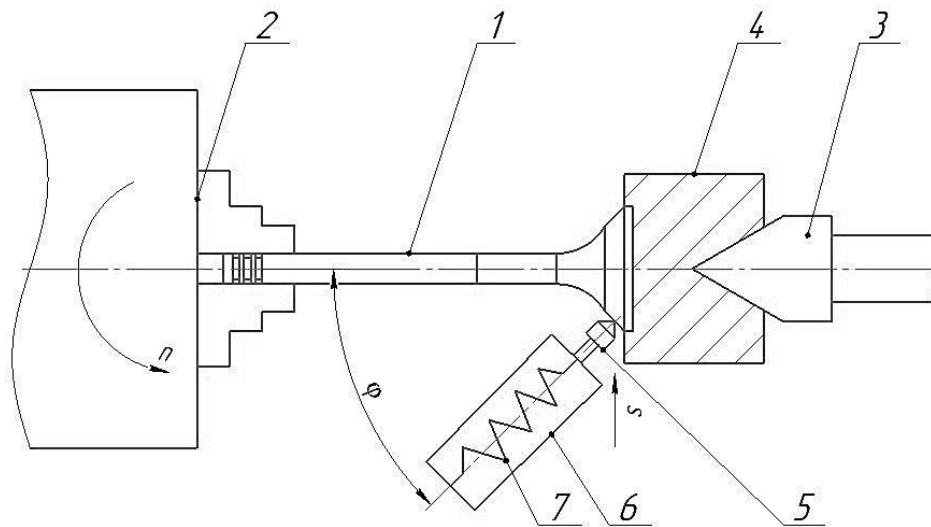


Рис. 2.4. Схема алмазного вигладжування: 1 – оброблюваний клапан; 2 – трикулачковий патрон; 3 – центр обертання; 4 – оправка центруюча; 5 – алмазний вигладжувач; 6 – корпус; 7 – пружина з регулюванням підтискання.

Для виконання операції вигладжування в трикулачковий патрон 2 токарно-гвинторізного верстата підвищеної точності встановлювався оброблюваний клапан 1. На головку клапана 1 встановлювалася спеціальна оправка 4 для виключення биття виробу під час обробки. Оправка і клапан підтискалися

обертовим центром 3 задньої бабки. У корпус 6 з регульованою пружиною 7 встановлювався алмазний вирівнювач 5 з радіусом при вершині 2 мм. Корпус 6 встановлений в різцетримачі верстата під кутом φ . Перед запуском верстата виставлялися оберти шпинделя n , що забезпечують окружну швидкість обробки 100 м/хв, поперечна подача різцетримача $s = 0,08$ мм/об, зусилля притиску пружини 110...130 Н. Верстат запускався, і вмикався привід поперечної подачі. Після проходження алмазного вигладжувача вздовж всієї робочої фаски клапана подача відключалася, інструмент відводився у вихідне положення, верстат відключався. Потім проводився демонтаж і контроль обробленого клапана [27].

Описана технологія наплавлення зміцнювального покриття на робочу фаску клапана може використовуватися в ремонтній промисловості. Для прийняття рішення про відновлення робочої фаски клапана проводиться огляд стану клапана на предмет відсутності прогарів, тріщин, глибоких пошкоджень, наявність яких унеможлиблює наплавлення даним методом. Невеликі відхилення форми робочої фаски, викликані абразивним зносом, ерозією, розмір яких не перевищує 0,1 мм, можуть бути відновлені до вихідних розмірів і форм із застосуванням описаної технології.

2.3. Методика трибологічних експериментів і досліджень

Трибологічні дослідження проводилися з метою визначення зносостійкості та коефіцієнта сухого тертя зміцнювального покриття в парі з чавунною колодкою. Випробування проводилися в умовах сухого тертя на лабораторній машині тертя СМТ-2070. У роботі використовувалася схема навантаження «диск з покриттям – колодка», показана на рис. 2.5.

В якості зразків використовувався диск з каліброваним центральним отвором під посадку на оправку машини тертя. Матеріалом диска була сталь 40Х10С2М, яка використовується для виготовлення клапанів ГРМ.

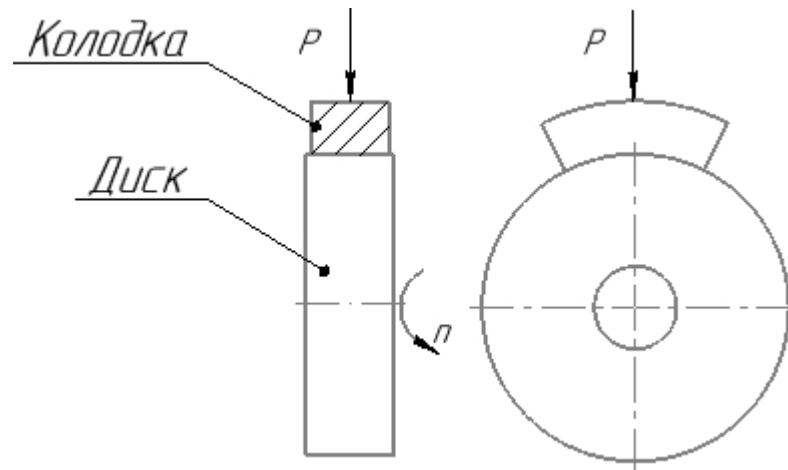


Рис. 2.5. Схема випробувань сполучення: P – навантаження на з'єднання, Н; n – частота обертання диска, с-1 ; 1 – колодка; 2 – диск.

Загартування диска проводилося нагріванням до 800...820 °С, витримка при даній температурі становила 15 хв, охолодження в маслі. Для усунення накопичених напружень проводився високий відпуск при температурі 500...550 °С. В результаті диски мали твердість 28...33 HRC, що відповідала твердості головки клапана. Відповідною деталлю виступала чавунна колодка з відповідним радіусом кривизни. Матеріалом колодки виступав сірий чавун марки СЧ 24-48, що відповідає матеріалу сідел деяких двигунів внутрішнього згоряння.

2.4. Опис стенда для випробувань випускних клапанів

Стендові випробування необхідні для моделювання роботи клапанів в умовах високих температур згоряння газового палива [3].

У межах даної роботи було розроблено стенд для дослідження параметрів прироблення робочої фаски клапана до сідла. Лабораторна установка зображена на рис. 2.6 [3].

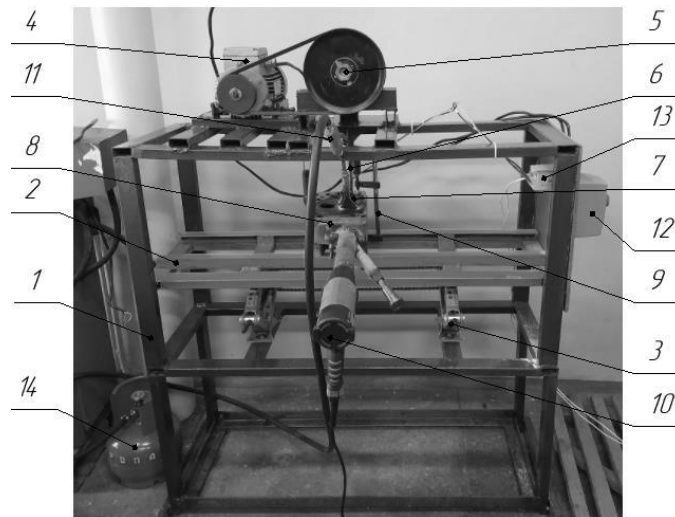


Рис. 2.6. Схема лабораторної установки: 1 – рама; 2 – регульований стіл; 3 – підйомний механізм стола; 4 – асинхронний електродвигун; 5 – кулачковий привід; 6 – шток; 7 – пружинний механізм; 8 – головка блока циліндрів; 9 – трубки; 10 – промисловий фен; 11 – пальник; 12 – магнітний пускач; 13 – терморегулятор; 14 – газовий балон [3].

Стенд для лабораторних випробувань клапанів двигунів внутрішнього згоряння має у якості основи зварену просторову раму 1. На рамі 1 закріплено два ромбічних домкрати, синхронізовані за допомогою ланцюгової передачі. Разом ці домкрати утворюють підйомний механізм 3. До підйомного механізму 3 кріпиться стіл 2. До стола 2 за допомогою трубок 9 кріпиться головка блока циліндрів 8, що відповідає випробуваному випускному клапану. Відкриття клапана забезпечується зворотною пружиною (рис. 2.7). Закриття клапана здійснюється штоком 6, з'єднаним із кулачковим приводом 5. На кінці штока 6 встановлено пружинний механізм 7 (рис. 2.8), який задає зусилля закриття клапана. Обертання кулачковому механізму передається від асинхронного електродвигуна 4 через клинопасову передачу. Пуск і зупинка двигуна забезпечуються магнітним пускачем 12. Для створення заданої робочої температури, яка імітує роботу двигуна на газовому паливі, використовується пальник 11, що живиться від газового балона 14. Забезпечення потоку повітря здійснюється промисловим феном 10. Відстеження температури проводилося за

допомогою терморегулятора 13, який отримує дані від термопари, розташованої безпосередньо біля місця контакту «клапан – сідло» [3].

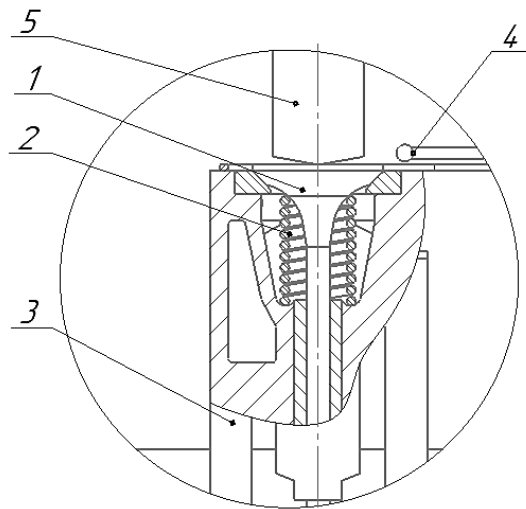


Рис. 2.7. Розташування елементів системи у ГБЦ: 1 – випускний клапан; 2 – зворотна пружина; 3 – головка блока циліндрів; 4 – термопара; 5 – пружинний механізм [3].

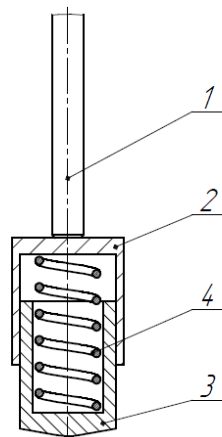


Рис. 2.8. Пружинний механізм: 1 – шток; 2 – верхній стакан; 3 – нижній стакан; 4 – пружина [3].

Розроблений стенд призначений для відтворення температурних умов роботи випускних клапанів автотракторних двигунів, що експлуатуються на газовому паливі. Дана лабораторна установка дає можливість забезпечувати робочу температуру в зоні контакту «клапан – сідло» до 900 ± 30 °C. Потік газів створюється за допомогою промислового фена Black&Decker KX2001-QS. Температура повітря на виході з фена досягає 500 °C, витрата становить 650 л/хв. Поступальний рух клапана реалізовано за допомогою штока, який приводиться в

дію кулачковим механізмом, пружинного механізму, що задає зусилля притискання, та зворотної пружини, яка відкриває клапан. Кулачковий привід працює від асинхронного трифазного електродвигуна AIP71B4 потужністю 750 Вт, синхронною частотою обертання 1500 об/хв. Зв'язка електродвигуна з кулачковим приводом забезпечує 1500 подвійних ходів штока за хвилину, що відповідає роботі чотиритактного двигуна при частоті обертання колінчастого вала 3000 об/хв [3].

Використання пальника в зоні контакту «клапан – сідло» дозволяє перевірити стан покриття клапана під час роботи при підвищених температурах, що відповідають температурі вихлопних газів двигуна на газовому паливі. Будівельний фен забезпечує гарячий повітряний потік, який дає змогу провести перевірку покриття клапана на стійкість до ерозійного руйнування [3].

Висновки по розділу

Розроблено методику стендових випробувань. Розроблено стенд для випробувань клапанів на довговічність і термостійкість покриття робочої фаски клапана. Описано методику підбору пружин для забезпечення необхідних зусиль притискання клапана.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати трибологічних досліджень

Після визначення оптимального співвідношення компонентів порошкової композиції, оптимізації режимів наплавлення були виготовлені зразки для випробувань на машині тертя з зміцнюючим покриттям. Зміцнювальне покриття складалося з 85% Ni, 10% SiC, 5% ZrO₂.

Для визначення коефіцієнта тертя були отримані графіки моменту тертя на міліметровому папері. Розшифровка графіків дозволила визначити середні значення моменту тертя при кожному рівні навантаження на сполучення. Графік усереднених значень моменту тертя $M_{тр}$ наведено на рис. 3.1.

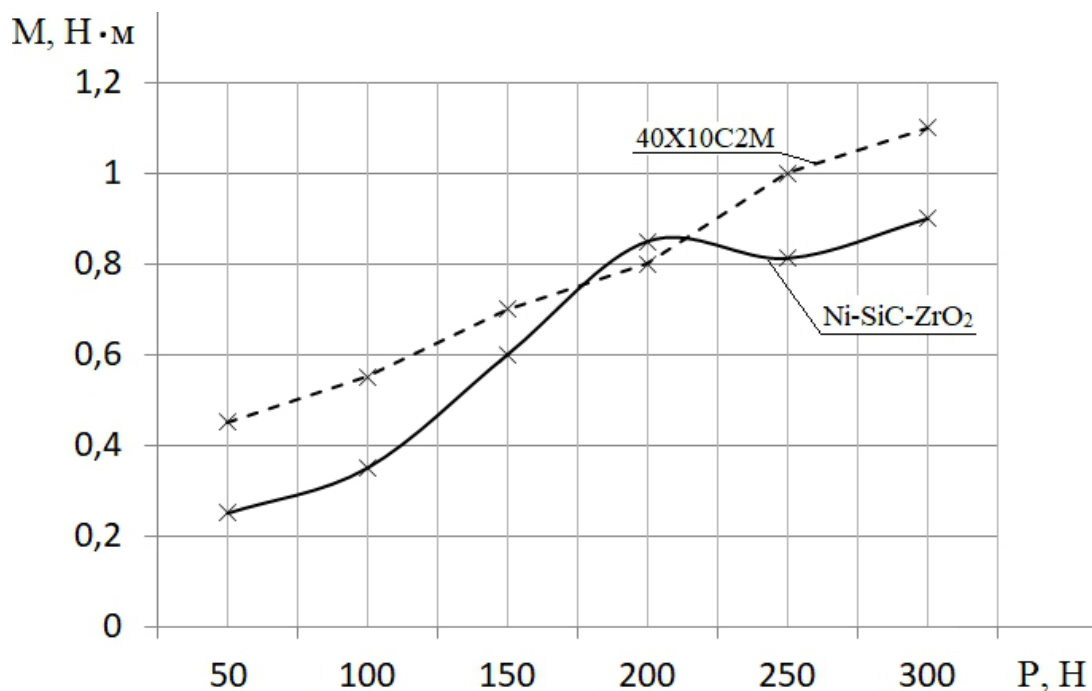


Рис. 3.1. Момент тертя в залежності від навантаження в сполученні зміцнювального покриття і сталі 40X10C2M

За результатами даного графіка проведено розрахунок коефіцієнта сухого тертя в сполученні «диск – колодка».

Результати розрахунків коефіцієнта тертя представлені на рисунку 3.2.

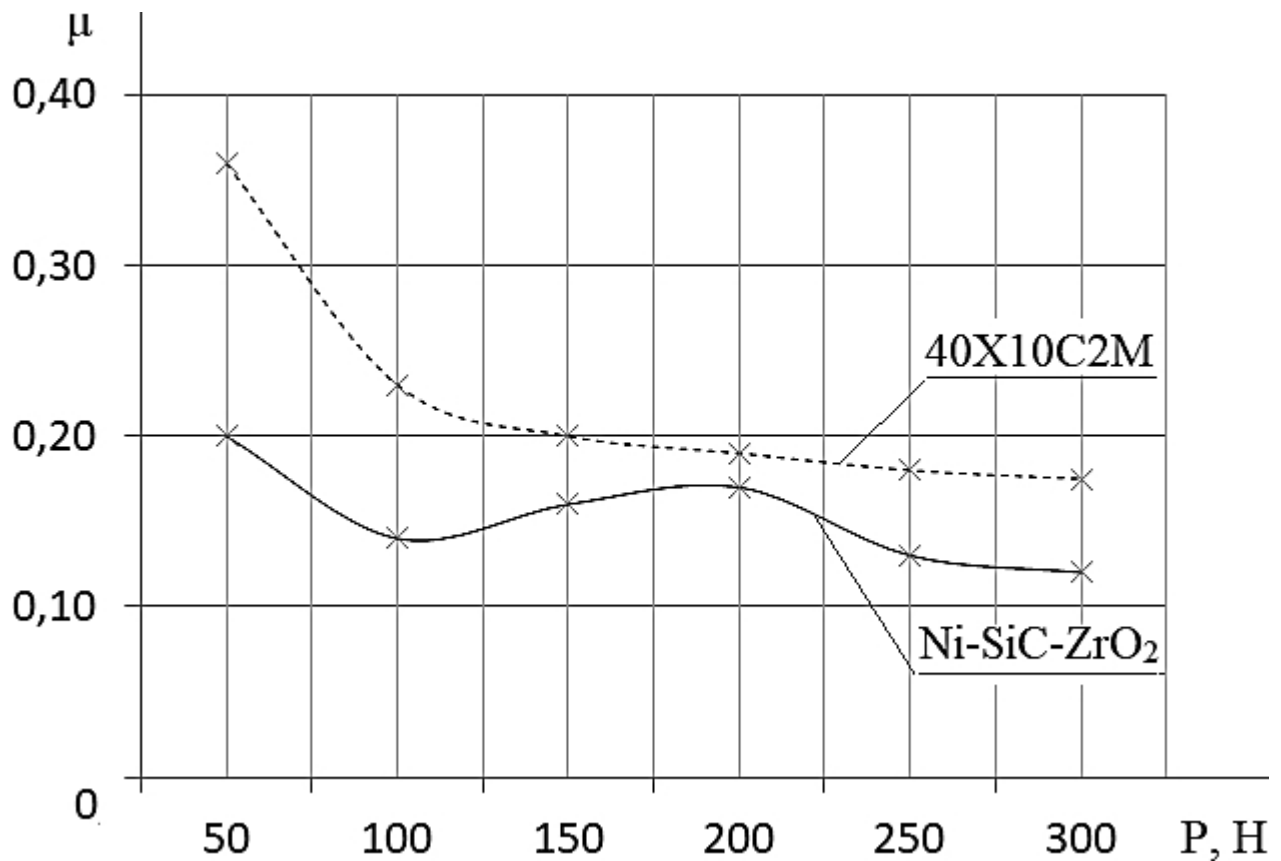


Рис. 3.2. Коефіцієнт тертя зміцнювального покриття і сталі.

Для порівняння результатів був обраний зразок зі сталі 40X10C2M без зміцнення поверхні. Коефіцієнт сухого тертя сталі в парі з чавуном відомий і дорівнює 0,18. В результаті експерименту коефіцієнт сухого тертя пари «сталь 40X10C2M – сірий чавун» виявився рівним $0,175 \pm 0,005$ при навантаженні 300 Н, що підтверджує правильність методики трибологічних випробувань. Для випробуваного зразка з зміцнюючим покриттям Ni-SiC-ZrO₂ в парі з сірим чавуном коефіцієнт сухого тертя дорівнює $0,12 \pm 0,005$ при 300 Н, що на $31 \pm 1\%$ нижче, ніж у сталі 40X10C2M. Відсутність значних стрибків графіка свідчить про хорошу припрацьовуваність покриття, відсутність зчеплень, задирок [5].

В рамках трибологічних досліджень визначалася зносостійкість покриття.

Для цього були проведені випробування зразків при кожному рівні навантажень в сполученні. Зразки проходили однаковий шлях тертя, при дотриманні постійності регульованих і реєстрованих факторів. Отримані результати порівнювалися з коефіцієнтом тертя в сполученні. Залежність

інтенсивності зношування від прикладеного навантаження до з'єднання представлена на рис. 3.3.

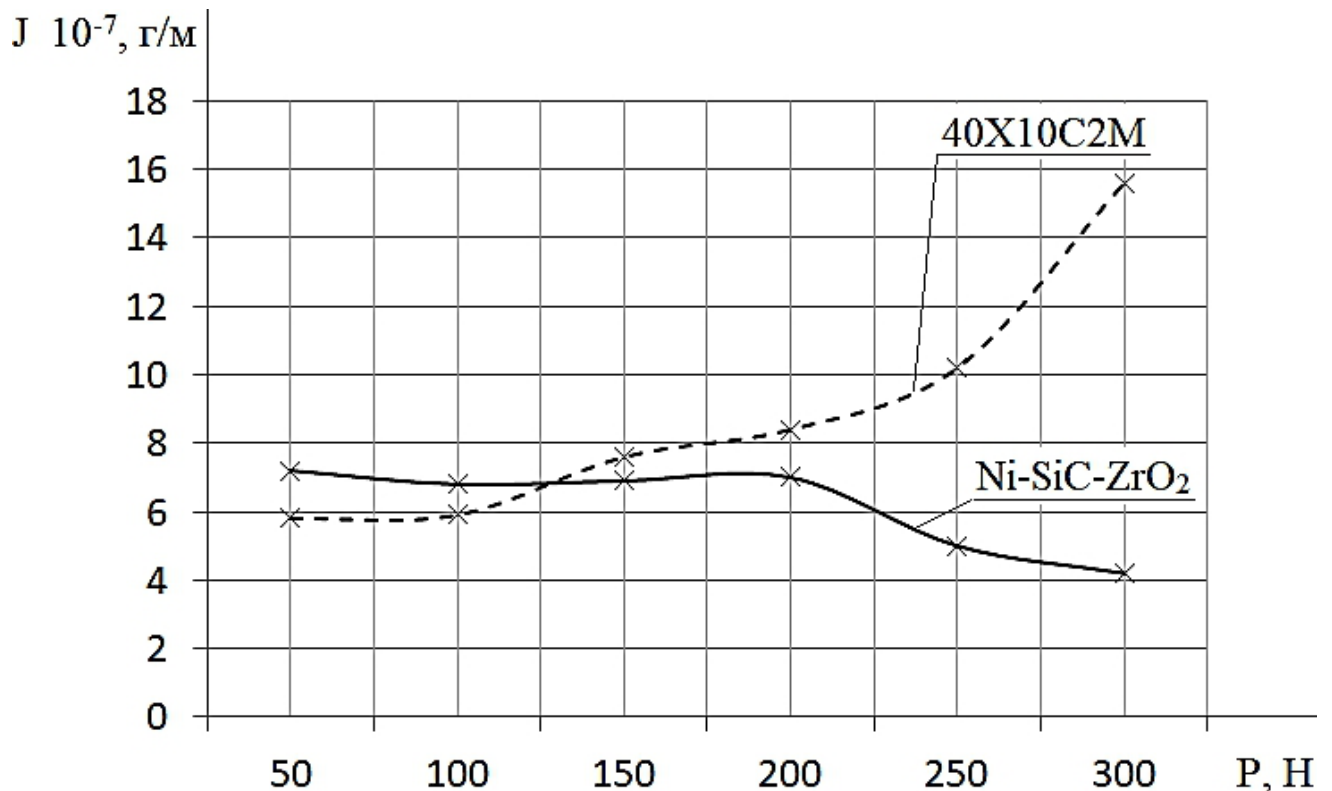


Рис. 3.3. Інтенсивність зношування зміцнювального покриття і сталі 40X10C2M

Згідно з отриманими залежностями, зміцнювальне покриття Ni-SiC-ZrO₂ в середньому має на 34% меншу інтенсивність зносу по відношенню до сталі 40X10C2M. З цього випливає, що випускний клапан з нанесеним на робочу поверхню зміцнювальним покриттям буде мати більшу зносостійкість на 34%.

3.2. Результати стендових випробувань покриття

Стенові випробування покриттів спрямовані на визначення працездатності досліджуваних зразків при високих температурах згоряння газового палива. Для виконання випробувань на розробленому стенді були підготовлені клапани і головка блоку циліндрів. На один з клапанів було нанесено зміцнювальне покриття. Зображення клапанів і сідла клапана до випробувань представлено на рис. 3.4. і рис. 3.5.

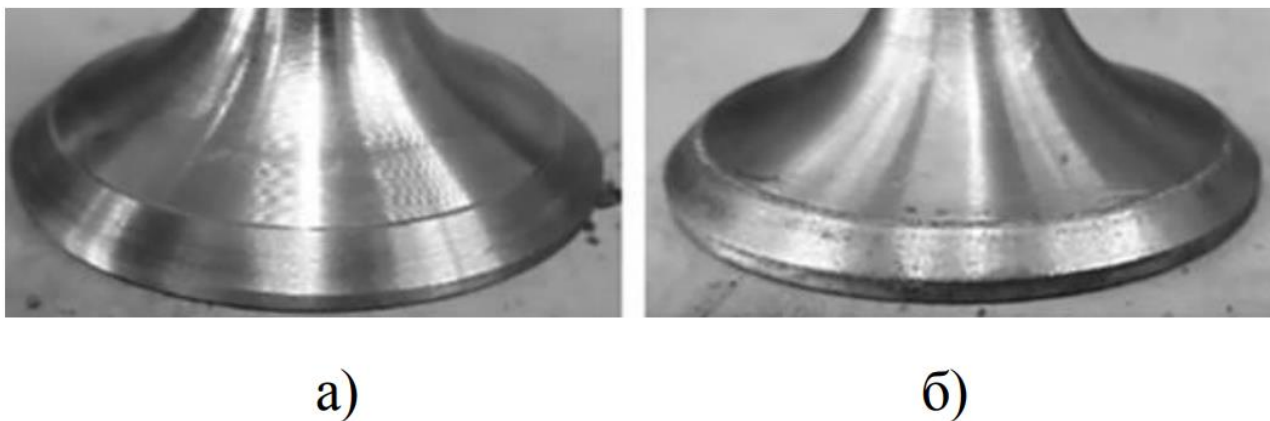


Рис. 3.4. Клапани до стендових випробувань: а) клапан зі стандартним покриттям; б) клапан з зміцнюючим покриттям.



Рис. 3.5. Сідло клапана до випробувань.

На рис. 3.5. видно, що сідло випускного клапана має злегка помітний пояс припрацювання шириною не більше 1 мм, отриманий після притиральної операції. У даному вигляді ГБЦ і клапани були встановлені на випробувальний стенд. Згідно з методикою експериментальних досліджень, кожен клапан піддавався 200 год випробувань. За цей період часу виконано 858 циклів випробувань, по 840 с кожен. По завершенню випробувань виконані знімки клапанів і ГБЦ, які представлені на малюнках 3.6 і 3.7.



Рис. 3.6. Клапани після випробувань: а) клапан зі стандартним покриттям; б) клапан з зміцнюючим покриттям.

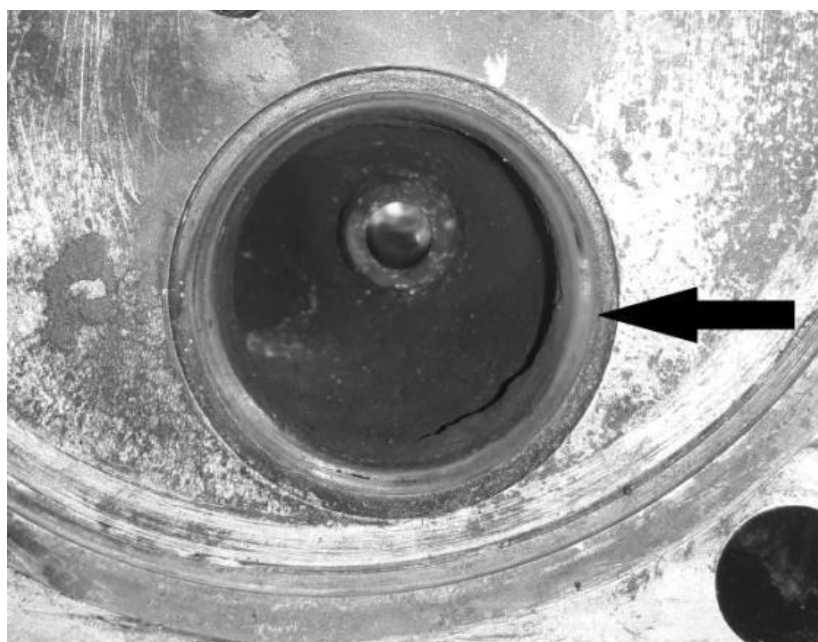


Рис. 3.7. Сідло випускного клапана після випробувань

Як видно з рис. 3.6 і 3.7, на робочій фасці клапанів і відповідній ділянці сідла утворилися чітко помітні сліди припрацювання по всьому контуру.

Для клапана зі стандартним покриттям слід припрацювання виявився більш вираженим, ніж у клапана з зміцнюючим покриттям. Модифікований клапан зазнав меншого зносу. При цьому робочі фаски обох клапанів не мають явних дефектів і руйнувань.

В рамках даних досліджень також було проведено вимірювання пояски припрацювання робочої фаски клапанів. Результати вимірювань представлені у вигляді графічних залежностей від часу напрацювання на рис. 3.8.

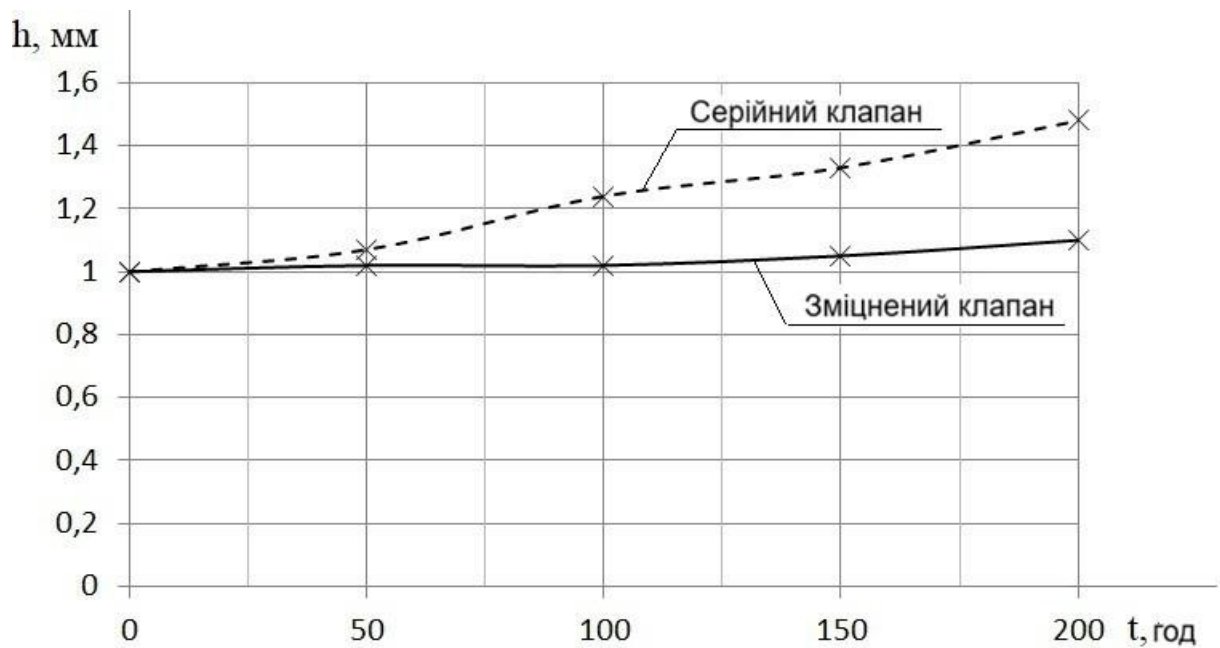


Рис. 3.8. Ширина пояса припрацювання.

На рис. 3.8 видно, що клапан зі стандартним покриттям має більшу інтенсивність припрацювання. При 200 год прискорених випробувань ширина пояса припрацювання стандартного клапана склала 1,48 мм, а ширина пояса припрацювання клапана з зміцнюючим покриттям – 1,25 мм. Отримані значення знаходяться в допустимих межах і не перевищують граничного значення 2 мм [1]. При цьому прогнозований напрацювання клапанів складе 2000 год при реальних умовах роботи.

Для оцінки довговічності стандартного клапана і клапана з зміцненою робочою фаскою було виконано екстраполяцію результатів стендових випробувань до досягнення граничного значення пояса припрацювання 2 мм. Отримані результати відображені на рис. 3.9.

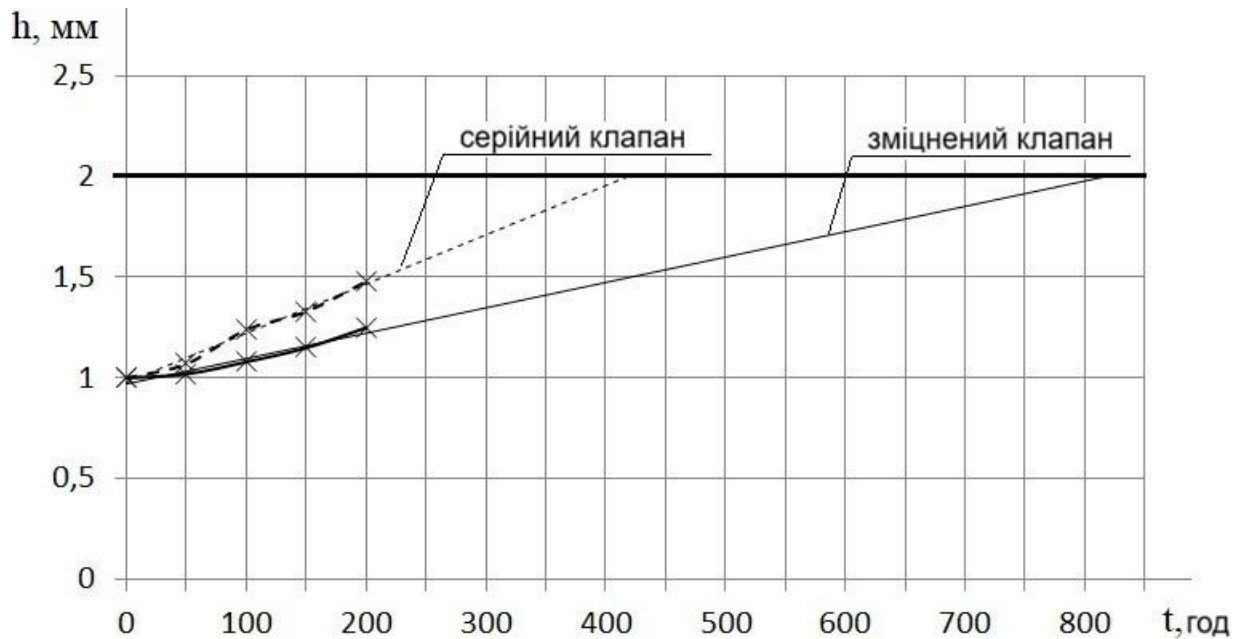


Рис. 3.9. Екстраполяцію результатів стендових випробувань до досягнення граничного значення пояска.

Екстраполяція результатів стендових випробувань до позначки ширини пояска припрацювання в 2 мм виконана із застосуванням лінійної апроксимації даних. Отримано рівняння, що описують зміну ширини пояска припрацювання від часу напрацювання для стандартного клапана і клапана з зміцнюючим покриттям:

$$h_{\text{с.к.}} = 0,122t + 0,858; \quad (3.1)$$

$$h_{\text{у.к.}} = 0,063t + 0,911. \quad (3.2)$$

Адекватність отриманих моделей оцінювалася за коефіцієнтом детермінації R^2 , який не повинен бути менше 0,5. Для моделі припрацювання стандартного клапана коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,99$, для моделі клапана з зміцнюючим покриттям робочої фаски $R^2 = 0,95$. Виходячи з цього, можна зробити висновок про високу достовірність результатів екстраполяції експериментальних даних. Згідно з отриманими результатами, стандартний клапан виходить з ладу при 420 год прискорених випробувань, що відповідає 4200 год напрацювання клапана в умовах експлуатації клапанів у складі ДВЗ автомобільної техніки, тракторів і спеціалізованих машин. Клапан з зміцнюючим покриттям поверхні робочої фаски виходить з ладу при напрацюванні 835 год, що відповідає 8350 год роботи

клапана при експлуатації клапанів у складі ДВС автомобільної техніки, тракторів і спеціалізованих машин. Згідно з зазначеним раніше співвідношенням пробігу і годин напрацювання двигуна і відповідно клапана, робоча фаска стандартного клапана виходить з ладу при пробігу 240 тис. км. Клапан з зміцнюючим покриттям робочої фаски виходить з ладу при пробігу 477 тис. км. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що розроблене зміцнювальне покриття дозволяє збільшити ресурс робочої фаски випускного клапана в 2 рази [6]. При цьому порівняння напрацювання клапанів при теоретичній оцінці і при стендових випробуваннях дозволяє зробити висновок, що розбіжність результатів не перевищує 5%.

Висновки по розділу

Було визначено коефіцієнт сухого тертя в сполученні «диск з покриттям – чавунна колодка», який дорівнює $0,12 \pm 0,005$ при 300 Н. Визначено середнє значення інтенсивності зношування зразка, яке дорівнює $6,5 \cdot 10^{-7}$ г/м. Порівняння результатів досліджень зі сталевим зразком 40X10C2M дозволило зробити висновок про збільшення зносостійкості зразка з зміцнюючим покриттям на 34%.

Проведено стендові випробування стандартного клапана і клапана з зміцнюючим покриттям поверхні робочої фаски. Проведено оцінку напрацювання клапанів до виходу їх з ладу при досягненні граничної ширини пояски припрацювання 2 мм. При аналізі апроксимованих даних, зроблено висновок, що передбачуване напрацювання стандартного клапана до виходу з ладу становить 240 тис. км, напрацювання клапана з зміцнюючим покриттям робочої фаски – 477 тис. км, що дозволяє зробити висновок про те, що відбувається двократне збільшення довговічності зміцненого випускного клапана в порівнянні зі стандартним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблено та обґрунтовано методику проведення стендових випробувань, а також створено спеціалізований стенд, призначений для дослідження довговічності та термостійкості покриття робочої фаски клапанів. Запропоновано методику підбору пружин, яка забезпечує формування необхідних зусиль притискання клапана до сідла в процесі випробувань.

У ході експериментальних досліджень визначено коефіцієнт сухого тертя у парі «диск із покриттям – чавунна колодка», значення якого становить $0,12 \pm 0,005$ за навантаження 300 Н. Встановлено середнє значення інтенсивності зношування зразка на рівні $6,5 \cdot 10^{-7}$ г/м. Порівняльний аналіз отриманих результатів зі сталевим зразком 40X10C2M показав, що застосування зміцнювального покриття забезпечує підвищення зносостійкості на 34 %.

Проведено стендові випробування серійного клапана та клапана з нанесеним зміцнюючим покриттям робочої фаски. Виконано оцінку напрацювання клапанів до моменту відмови, що визначався досягненням граничної ширини пояса припрацювання 2 мм. На основі аналізу апроксимованих експериментальних даних встановлено, що прогнозоване напрацювання стандартного клапана до виходу з ладу становить близько 240 тис. км, тоді як для клапана зі зміцненим покриттям робочої фаски цей показник досягає 477 тис. км. Отримані результати свідчать про майже дворазове підвищення довговічності зміцненого випускного клапана порівняно зі стандартним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борак К.В., Міненко С.В., Савчук В.С., Буката Д.О. Перспективні напрямки підвищення надійності дизельних автотракторних двигунів. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 74-77.
2. Міненко С.В., Савчук В.С. Способи наплавлення тонких покриттів на поверхню робочої фаски клапана. Міжнародна науково-практична конференція до Дня автомобіліста та дорожника. “Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура ‘2025” (MAITRI 2025). 30-31 жовтня 2025 року. Харків 2025. С.
3. Савчук В.С. Стенд для випробовування випускних клапанів. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 80-82.
4. Solangi E., Ali Memon I. Ayaz Memon M. This person is not on ResearchGate, or hasn't claimed this research yet. Failure Analysis of a Diesel Engine Crankshaft based on Finite Element Modeling. June 2023 Journal of Applied Engineering & Technology (JAET) 7(1):1-9. DOI:10.55447/jaet.07.01.82.
5. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
6. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York : McGraw-Hill, 2018. 930 p.

7. Taylor C. M. *Engine Tribology*. Amsterdam : Elsevier, 2019. 512 p.
8. Totten G. E., Funatani K., Xie L. *Handbook of Mechanical Alloy Design*. Boca Raton : CRC Press, 2015. 832 p.
9. Stott F. H. High-temperature sliding wear of metals. *Tribology International*. 2017. Vol. 110. P. 25–36.
10. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*. 2019. Vol. 7(3). P. 263–284.
11. Diesel R., Woydt M. *Tribologie der Verbrennungsmotoren*. Berlin : Springer Vieweg, 2016. 684 S.
12. Habig K.-H. *Ventiltrieb und Ventilwerkstoffe*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2018. 412 S.
13. Zum Gahr K.-H. *Microstructure and Wear of Materials*. Berlin : Springer, 2013. 560 S.
14. Hoffmann F. Verschleiß- und Reibungsmechanismen bei Ventilsitz-Kontakten. *Tribologie und Schmierungstechnik*. 2020. Nr. 2. S. 18–25.
15. Giuliani M., Rossi A. *Tribologia dei motori a combustione interna*. Milano : Hoepli, 2017. 456 p.
16. Bianchi G. Studio dell'usura delle valvole di scarico nei motori diesel. *La Metallurgia Italiana*. 2019. N. 6. P. 33–40.
17. Mariani F., Conti P. Analisi sperimentale della resistenza all'usura dei rivestimenti duri. *Ingegneria dei Materiali*. 2018. Vol. 29(4). P. 45–52.
18. Maher I. Boulos , Pierre L. Fauchais , Joachim V.R. Heberlein Thermal Spray Fundamentals. Springer. 2022. 567 p.
19. Qu S., Ma X. Improvement of impact wear properties of seat insert by laser cladding cobalt-based alloy. *Materials Science, Engineering*. DOI:10.1088/2051-672X/ac8364.
20. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина I: Навч. посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 511 с.