

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор
_____ Костянтин ДЯДЮРА
«__»_____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти
Освітньої програми «Агроінженерія»
За спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПРЕЦЕЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНИХ ДИЗЕЛЕЙ

Науковий керівник:
_____ к.т.н., доц. Сергій УМИНСЬКИЙ

Рецензент: д.т.н., проф. Василь ЛАРШИН

Виконав здобувач *денної* форми навчання
Максим ДОБРЯНСЬКИЙ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ **Максим ДОБРЯНСЬКИЙ**

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра Агроінженерії

Рівень вищої освіти другий магістерський

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 Агроінженерія

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Максиму ДОБРЯНСЬКОМУ

(ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

«Технології відновлення та підвищення зносостійкості прецезійних деталей
автотракторних дизелів»,

науковий керівник кваліфікаційної роботи:

к.т.н., доцент Сергій УМИНСЬКИЙ

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету
№ 124 від «27» червня 2025 р.2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи : 15 грудня
2025 року3. Об'єкт дослідження: підвищення зносостійкості
розмилювачів шестових автотракторних двигунів4. Предмет дослідження: технології відновлення
розмилювачів шестових автотракторних двигунів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: Інноваційні методи
напівної апаратури. Експлуатація та відновлення
напівної апаратури. Конструкція розмилювачів
шестових. Аналіз зносу деталей розмилювачів
шестових шестових.5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: Технології
оскільки у процесі напівної роботи шестових двигунів
вміщують металічні. Дослідження впливу
напівної напівної, мікротвердості напівної

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: Властивості
осаджених покриттів, Захиснові покрит-
тя, зносостійкість покриттів.
Технологія відновлення руйнованих фор-
сунок автотракторних деталей напосад
зміцнюючих покриттів.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу: Статистика частоти
відмов напвної системи деталей
Двигунів сімсотогосторічної "Техніка".
Характеристика руйнуючих факторів,
що веде до зносування пружних поверх-
хонь.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Методи відновлення деталей руйнованих
двигунів ДВЗ. Схема установки напвної
покриттів СДР-методом АВС на робочій поверхні.

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу:

Схема установки, схема технологічного
процесу формування зносостійкого покриття

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи :

У руйнуванні деталей машини зносується
напвня поверхні (полки і кривизну
руйнування, збільшення їх товщини,
поверхні полки, отвори що руйнують.
Основна причина зносу зносу, наприклад
стійкість робочих поверхонь деталей

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

Технологія відновлення та підвищення
зносостійкості пружних деталей
автотракторних двигунів. Техн. V Міжнародної
наради - практичної конференції. 2-3 жовтня 2025р.

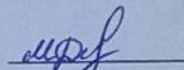
9. Дата видачі завдання: «28» червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Травень 2025	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи	Червень 2025	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку	Липень 2025	0,5	

	з підготовки кваліфікаційної роботи			
4.	Написання першого (теоретико-методичного) розділу кваліфікаційної роботи	Вересень 2025	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Вересень 2025	1,0	
6.	Написання другого (дослідницько-аналітичного) розділу кваліфікаційної роботи	Жовтень 2025	2,0	
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи	Листопад 2025	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Листопад 2025	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Листопад 2025		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Листопад 2025	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Грудень 2025	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	16 грудня 2025		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Грудень 2025		
14.	Попередній захист на кафедрі	Грудень 2025		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Грудень 2025		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 грудня 2025	1,5	
	Загальна кількість		12	

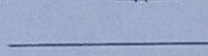
Здобувач ОС «Магістр»

 Максим ДОБРЯНСЬКИЙ
підпис

Науковий керівник

 Сергій УМИНСЬКИЙ
підпис

Гарант ОП

 Анатолій ЯКОВЕНКО
підпис

РЕФЕРАТ

Метою роботи є підвищення зносостійкості розпилювачів форсунок автотракторних дизелів при застосуванні карбідохромових покриттів.

На даний час, відомі технологічні методи не дозволяють підвищити зносостійкість прецизійних деталей, а технології, що зміцнюють, не забезпечують нанесення покриттів на важкодоступні робочі поверхні з малими діаметрами. Крім того, більшість відомих способів не дозволяють наносити достатню товщину зносостійких покриттів для відновлення розмірів зношених деталей і мають високотемпературний режим, який призводить до відпуску сталей, що застосовуються.

Об'єктом дослідження є технологія відновлення розпилювачів форсунок автотракторних дизелів термічним розкладанням з'єднань гексакарбонілу хрому при температурі нижче 200 С, що виключає короблення та їх повторне загартування.

Розглянуто пристрій для формування зносостійкого покриття з карбіду хрому на внутрішній поверхні корпусу розпилювача форсунки, що відновлюється.

Зміцнення обох деталей прецизійної сполуки «голка-корпус» забезпечує підвищення ресурсу розпилювача форсунки в 2,5 і більше разів.

Ключові слова: ФОРСУНКА, ПОКРИТТЯ, РОЗПИЛЮВАЧ, ВІДНОВЛЕННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ НА ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	2
РЕФЕРАТ.....	4
ВСТУП.....	7
1. УМОВИ РОБОТИ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ.....	9
1.1. Експлуатація та відмови паливної апаратури.....	9
1.2. Номенклатура розпилювачів форсунок.	11
1.3. Аналіз зносу деталей розпилювача форсунки.....	17
1.4. Знос деталей форсунок.....	29
1.5. Методи реставрування та зміцнення розпилювачів форсунок.....	30
2. ВІДНОВЛЕННЯ РОЗПИЛЮВАЧІВ ФОРСУНОК ДВЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КАРБІДОХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ.....	45
2.1. Умови осадження карбідохромового покриття.	45
2.2. Товщини карбідохромового покриття, що забезпечує відновлення розпилювачів.....	47
3. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	52
3.1. Технологічне оснащення процесу нанесення покриттів методом хімічної металізації.	52
3.2. Дослідження залишкової напруги, мікротвердості карбідохромового покриття.....	58
3.3. Властивості осаджених покриттів.....	62

3.4. Залишкові напруження, зносостійкість покриттів.....65

3.5. Технологія відновлення розпилювачів форсунок

автотракторних дизелів нанесенням зміцнюючих покриттів.....70

4. . ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ

СИТУАЦІЯХ.....75

5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ

РОЗПИЛЮВАЧІВ.....84

ВИСНОВКИ.....91

Література.....92

ДОДАТКИ.....96

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Статистика частоти відмов паливної системи дизельних двигунів сільськогосподарської техніки

2. Принципова схема розпилювача форсунки: а - корпус, б - голка;

3. Характеристика забруднюючих речовин, що веде до зношування прецизійних поверхонь

4. Зовнішній вигляд та дефекти зношених деталей розпилювачів форсунок

5. Рух абразиву у розпилювачі форсунки ДВЗ..

6. Методи відновлення деталей розпилювачів форсунок ДВЗ

7. Схема геометричних розмірів деталей розпилювача форсунки: а - розпилювач серійний; б - розпилювач зношений; в – розпилювач відновлений

8 Схема установки нанесення покриттів CVD-методом МОС на зовнішні поверхні деталей машин

9 CVD-установка для формування зносостійкого покриття карбіду хрому на внутрішній поверхні корпусу розпилювача форсунки..

10 Схема технологічного процесу формування зносостійкого покриття деталях.

11 Зовнішній вигляд відновлених деталей розпилювача форсунки.

.12. Залежність подачі парів гексакарбонілу хрому від швидкості зростання покриття

ВСТУП

До сільськогосподарських машин, які працюють у важких умовах, пред'являються високі вимоги щодо надійності. Основна причина втрати працездатності машин – низька зносо- та корозійна стійкість деталей.

Надійність та економічність автотракторних дизелів багато в чому визначаються стабільною та безвідмовною роботою паливної апаратури (ПА), якість якої не відповідає сучасним вимогам. Більше 40% відмов дизелів обумовлено порушенням роботи паливної системи. Із загальної кількості відмов паливної апаратури на форсунку ДВЗ припадає 12%.

Щонайменше 66% несправностей форсунок автотракторних дизелів посідає розпилювач [2]. У розпилювачі форсунки зношуються напрямні поверхні голки і корпусу розпилювача, ущільнювальні їх конусні поверхні та отвори, що розпилюють [12]. Основна причина низької зносо- та корозійної стійкості робочих поверхонь прецизійних деталей – це забрудненість дизельного палива. Дизельне паливо є гетерогенною сумішшю, тому що забруднюється на всіх етапах транспортування від заводу до паливного бака машини та в процесі експлуатації машинно-тракторних агрегатів (МТА).

Останнє відбувається через те, що МТА переміщаються великими земельними площами і працюють у пиловій хмарі, яка містить у собі тверді абразивні частинки кварцу SiO_2 , корунду Al_2O_3 та інших речовин. В результаті цього пил проникає в паливний бак через сапун і поєднується з паливом [8]. Фільтри тонкого очищення здатні затримувати забруднюючі речовини розміром до 3х мкм і мають ступінь очищення 85...98%. Зношування деталей відбувається через високу мікротвердість абразивних частинок у порівнянні з мікротвердістю деталей. Забезпечити високу надійність розпилювачів форсунок можливо за допомогою вдосконалення системи очищення палива і значного підвищення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь деталей. застосування зміцнювальних покриттів, що мають мікротвердість, значно перевищуючу мікротвердість абразивних частинок.

1. УМОВИ РОБОТИ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ.

1.1. Експлуатація та відмови паливної апаратури.

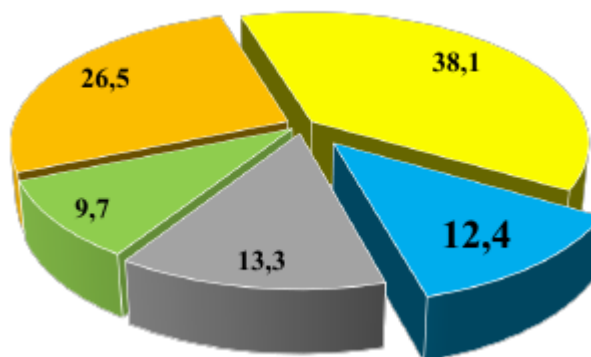
Сучасний ринок налічує велику кількість виробників сільськогосподарської техніки. Рівень надійності машин багато в чому визначається правильною експлуатацією. Експлуатація будь-якої одиниці техніки однакового класу, але різного виробника, індивідуальна, оскільки потрібні певні знання. Найчастіше робота двигуна на критичних або близько критичним оборотах, неправильний вибір передачі, активна робота гідравлічної системи, перевищення швидкісного режиму і т.д., веде до позапланового простою машини. Зношування вузлів і агрегатів призводить до погіршення технічних характеристик машин.

З метою підтримки високого рівня технічної готовності автотракторної техніки та зниження ризиків відмов, пов'язаних з антропогенним фактором, при експлуатації машин багато виробників впроваджують пасивну систему безпеки, що дозволяє знизити ризик аварійної зупинки. Внаслідок цього збільшується напруження, підвищується ефективність використання машини та парку техніки, а також знижуються позапланові простої та ремонти. В даний час дилери сільськогосподарської техніки проводять навчання та інструктаж операторів, щоб знизити витрати на гарантію та виключити людський фактор з експлуатації машини, оскільки від кваліфікації персоналу безпосередньо залежить ефективність використання машин [11, 18]. Крім цього, трактори, комбайни та інші самохідні сільськогосподарські машини обладнані телематичною системою]. Вона знімає показання з датчиків, записує в бортовий комп'ютер і передає дані на сервер (або скачується з бортової системи за допомогою сервісного інструменту) для подальшого аналізу. Це дозволяє відстежувати, оцінювати правильність експлуатації кожної одиниці техніки, наприклад час роботи, витрата палива, температуру, забрудненість технічних рідин, режим роботи систем і вузлів, траєкторію, швидкість пересування, місцезнаходження, продуктивність та інші параметри. Вітчизняна сільськогосподарська техніка, порівняно із зарубіжною, має нижчу надійність вузлів та агрегатів. Зазвичай, позаплановий вихід із ладу

одиниці техніки зумовлюється втратою працездатності агрегату чи деталей систем машини.

Недостатній ресурс окремих деталей призводить до збільшення кількості простоїв машин, що визначається збільшенням вартості володіння машини. У рахунок низького коефіцієнта технічної готовності (КТГ) машин експлуатуючі організації змушені закупувати резервну техніку, яка дозволить зупинити виробничі роботи. Збільшення витрат негативно впливає на формування собівартості одиниці виробленої продукції.

Використання техніки закордонного виробника для аграріїв вигідніше, оскільки вона надійніша, що дозволяє відмовитися від використання резервних машин. Завдяки цьому агросектор більш охоче експлуатує імпортні машини. Для підтримки високого рівня КТГ багато дилерів і виробників техніки ведуть статистику з несправностей машин, яка дозволяє заздалегідь виключати їх простим шляхом проведення на них планово-попереджувальних заходів щодо заміни слабших вузлів та агрегатів залежно від напрацювання машини. За відмовами сільськогосподарських машин вітчизняної техніки, слабкими та менш надійними вузлами, порівняно з іншими системами, є двигун 33,5%, гідросистема 17,6% та трансмісія 16,3%. У двигуні на паливну систему (ПС) припадає до 44% відмов. На рис. 1.1 показані дані моніторингу якості за умов реальної експлуатації паливної системи дизелів залежно кількості відмов на одну одиницю техніки у відсотковому співвідношенні. Аналіз статистики відмов паливної апаратури дизелів показує, що у форсунку припадає 12,4% відмов, у тому числі щонайменше 66% несправностей посідає розпилювач.



- Насос високого тиску
 - Трубка високого тиску
 - Кут випередження порскування
- Форсунка
 - Трубка низького тиску

Рис. 1.1 Статистика частоти відмов паливної системи дизельних двигунів сільськогосподарської техніки.

Основна причина низької надійності вітчизняної сільськогосподарської техніки – це зниження вимог та кількості контрольованих параметрів під час проведення сертифікаційних та попередніх випробувань.

1.2. Номенклатура розпилювачів форсунок.

Сучасна сільськогосподарська техніка оснащена дизельними двигунами. Головне завдання двигуна - це передача моменту, що крутить, до вузлів і агрегатів машин. Надійність та економічність дизелів багато в чому визначається стабільною та безвідмовною роботою паливної системи. Найбільш популярні паливні системи дизелів, які найчастіше зустрічаються в сучасних двигунах, це механічна та Common Rail.

Відмінна риса між ними – це управління уприскуванням. Механічна система менш вимоглива до якості палива, так як уприскування в камеру згоряння здійснюється за рахунок збільшення тиску палива в паливній магістралі, що йде від паливного насоса високого тиску (ПНВТ) до форсунки. Система Common Rail вимагає кращого очищення палива, а вприскування відбувається за рахунок напруги на електромагнітний клапан, встановлений у форсунці. Ця система дозволяє контролювати уприскування палива. За один цикл уприскування палива в камеру згоряння двигуна можливо здійснити до 90 підприскувань, що забезпечує краще згоряння палива і підвищує екологічні характеристики двигуна. В механічній паливній системі 80% вартості припадає на ТНВД та 20% на все інше. У Common Rail 80% вартості паливної системи припадає на форсунку.. Найбільш розповсюджені форсунки ФД-22, ФД-11, ФД-111, ФШ-62005, та інші. Вони мають однаковий принцип роботи, але відрізняються розмірами. Крім того, деякі з них відрізняються діаметром плунжерної частини голки і кількістю

отворів, що розпилюють. Незважаючи на різноманіття видів конструкцій форсунок автотракторних дизелів, основна причина низького ресурсу - це знос розпилювачів. Розпилювач форсунки – це прецизійна пара, що складається з корпусу та голки розпилювача, (рис. 1.2). Розпилювачі у всіх видах форсунок, включаючи використовувані в системі Common Rail, мають схожі конструктивні елементи (голку та корпус), але також, як і форсунки, відрізняються розмірами. Розпилювачі для механічної ПС виготовляються з діаметром прямої голки від 4,5 мм, а Common Rail розмірами меншими. Встановлюються на дизелі СМД, ТМЗ, Д240...260, та інші.

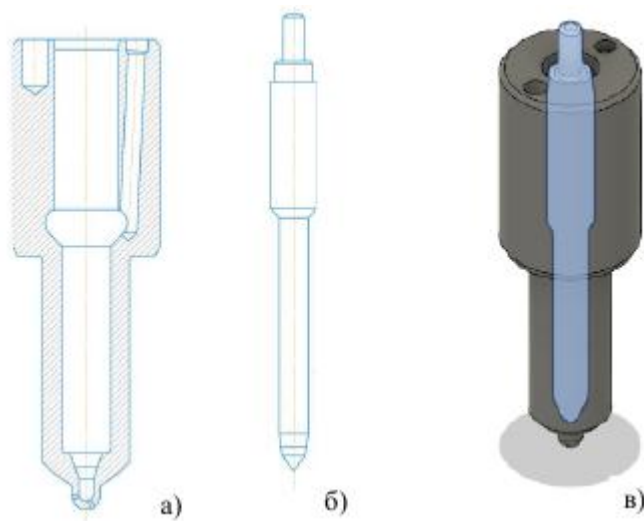


Рис. 1.2. Принципова схема розпилювача форсунки: а - корпус, б - голка;

Заміна розпилювачів проводиться при двозмінному режимі роботи на кожен 25 ... 40 календарний день або при напрацюванні в 500 ... 4000 мото-год, що дозволяє безвідмовно експлуатувати сільськогосподарські машини протягом двох і більше років. У таблиці 1.1 представлена номенклатура та ресурс деяких застосовуваних форсунок та розпилювачів на тракторах вітчизняного та зарубіжного виробника.

Таблиця 1.1 Номенклатура та ресурс розпилювачів форсунок.

Трактор	Модель	Двигун	Номер розпилювача форсунок	Напрацювання, мот.год
ЮМЗ 8070	МТЗ-80...1221	Д-240/245/260	НЗТА 11.1112010-14 ЧЗПИ 39.1112010-05 ЯЗДА 273.1112010-20	500...4000
ХТЗ 17221	К-700...744	ЯМЗ 236/238/240	ЯЗТА 26.111211 ЯЗТА 261.1112110 ЯЗДА 273.1112110-30	500...4000
ХТЗ 5020	ТГ-90/150 ТК-30/85/180	А-41СИ-02 / Д-442 Д120/145Т/ SISU66	АЗПИ 468-20с1 АЗПИ 11ТА-20с1 АЗПИ 204.1112110-1 НЗТА 16.1112010 Bosch DLLA151P2244	500...4000
John Deere	9R 8R	ECE-R120 Cummins X15	RE533501/RE524369 VNL4088665/4076902	~15000
Deutz-Fahr	6G	DEUTZ TCD 2012	DEUTZ 04290987 VOLVO 03050480 BOSCH 04290987	~15000

Розпилювачі форсунок автотракторних дизелів виготовляються в такий спосіб. Голка та корпус розпилювача із запірними конусами точать на внутрішньошліфувальному верстаті типу S131 [12]. Торець корпусу обробляється на чавунній плиті за допомогою карусельного приводу. Основна складність у технологічному процесі - це витримка перпендикулярності до напрямної голки, тому що в процесі експлуатації можливе передчасне зношування пар і заклинювання голки. Напрямна корпуса розпилювача хонінгується на верстаті типу 3LN2/25R [19]. Після кожної операції хонінгування проводиться промір діаметра напрямної і, як результат, забезпечується зазор. Отвори діаметром до 0,26 мм пропалюються за допомогою електроерозійної обробки, а діаметром більше свердляться. Ця операція здійснюється на верстаті HP4-EDM [10]. Велика кількість отворів, що розпилюють, обмежує ресурс розпилювача. Після цього отвори, що розпилюють, підлягають контролю витрати палива (л/хв), показання звіряються з регламентними даними і коригуються. Витратомір повинен мати похибку вимірювань 1% від номінальних значень, а за 10% номіналу похибка витрати повинна становити не більше 5%. Після виготовлення деталей їх комплектують та доводять притиральною операцією. Площина торця корпусу розпилювача до прямолінійності напрямної повинна бути перпендикулярна і

витримується до 1 мкм. Округлість замикаючого конуса перпендикулярна до торця форсунки, при цьому конусність повинна бути відсутня. Ці параметри перевіряються лабораторією за допомогою кутомірів та кругломірів. Шорсткість одержуваних поверхонь $Ra\ 0,1 \dots 0,05$ при точності вимірювального обладнання 0,05 мкм [9, 19]. Мінімальний допуск прецизійного сполучення голки та корпусу розпилювача має бути не менше 2 мкм, оскільки менший зазор призводить до зависання голки. Технологічний допуск лежить в інтервалі від 2...4 мкм, а розміри виготовлених деталей розподіляються за законом розподілу. Голки розпилювачів виготовляються з інструментальних сталей Р18, Р6М5 та в окремих випадках 9ХС. У виробництві голок розпилювачів використовують об'ємне загартування та багаторазову відпустку для отримання дрібнозернистої структури та максимальної поверхневої твердості сталі 63...65 HRC. Мікротвердість голки 7850 МПа [12, 16]. Корпус розпилювача виготовляють з конструкційних легованих високоякісних сталей 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА і 40ХН2МА з подальшою хіміко-термічною обробкою (ХТО) - цементацією, яка характеризується нагріванням деталей та витримкою їх у середовищі. Твердість поверхні сталі після зміцнення становить 60...62 HRC. Мікротвердість корпусу розпилювача після термічної обробки 7350 МПа [20]. Відновлення розпилювачів економічно доцільно, оскільки витрати виготовлення запасних частин становлять до 70% у собівартості ремонту техніки. Собівартість відновлених деталей нижче на 25...45% вартості нових [14]. Відновити працездатність розпилювачів форсунок можна за допомогою збільшення геометричних розмірів деталей до номінальних значень на зношених ділянках. Існуючі технології відновлення та зміцнення призводять до зміни механічних властивостей деталей. Головною вимогою при відновленні розпилювачів форсунок є забезпечення високих фізико-механічних властивостей деталей, які є найважливішими характеристиками, відповідальними за їхню працездатність, довговічність і зносостійкість. Максимальна твердість деталей досягається застосуванням термічної та хіміко-термічної обробки. Після високотемпературного впливу у структурі металу виникають залишкові напруги, частина яких знімається за допомогою відпустки. Кристалічна решітка в сталях, що застосовується, не є ідеально правильною.

Метали складаються із зерен, а межі зерен самі по собі є порушенням кристалічної будови. Зерна відрізняються один від одного формою, розмірами та взаємним розташуванням атомних площин. При нагріванні металів амплітуда теплових коливань атомів у кристалічній решітці зростає, що призводить до їхньої дифузійної рухливості та збільшення розмірів зерен. З метою досягнення рівноважного стану атоми металу прагнуть розташуватися у вузлах кристалічних ґрат. Ці процеси протікають тим інтенсивніше і повніше, що вища температура і тривалість нагріву [24, 30,]. При температурах нагріву сталей, що застосовуються при виготовленні розпилювачів, понад низьку відпустку 180...400 °С та інших залежно від хімічного складу, відбуваються структурні зміни зерна металу, що призводять до зменшення щільності дислокацій та утворення субкордонів. В результаті знижується міцність та підвищується пластичність металу. Змінюються механічні властивості. При високотемпературному нагріванні металів зменшується твердість деталей через збільшення обсягу зерна. Нагрів сталей при температурах 600 ... 727 ° С веде до утворення нових зерен шляхом їх зародження в найбільш напружених зонах сталі - рекристалізація. При подальшому підвищенні температури нагріву від 727 ° С до лінії солідус активізується зростання величини зерна, кілька зерен об'єднуються в одне. Внаслідок цього змінюються механічні властивості металів. Метал деталей стає більш крихким [24]. Після формування зміцнюючого покриття на поверхнях голки і корпусу розпилювача форсунки при використанні високотемпературних технологій, температура яких дорівнює низькій відпустці і вище, відбувається відпуск серцевини деталей, що вимагає наступного загартування, в результаті якої здійснюється релаксація внутрішніх напруг . Залежність зміни твердості марок сталей при виготовленні розпилювачів форсунок від температури їх нагріву представлена на рис. 1.3 [16]. Згідно з даними, збільшення температури нагріву деталей розпилювача призводить до зниження їх твердості та релаксації внутрішніх напруг. Для збереження фізико-механічних властивостей голки та корпусу розпилювача форсунки та виключення їх повторного загартування температура осадження карбідохромового покриття не повинна перевищувати рівень низької відпустки деталей 180...200°С. Це дозволить застосовувати

технологію до всіх видів розпилювачів форсунок, деталі яких виготовлені з розглянутих марок сталей, а також тих, де температура низької відпустки відповідає не вище зазначеної межі.

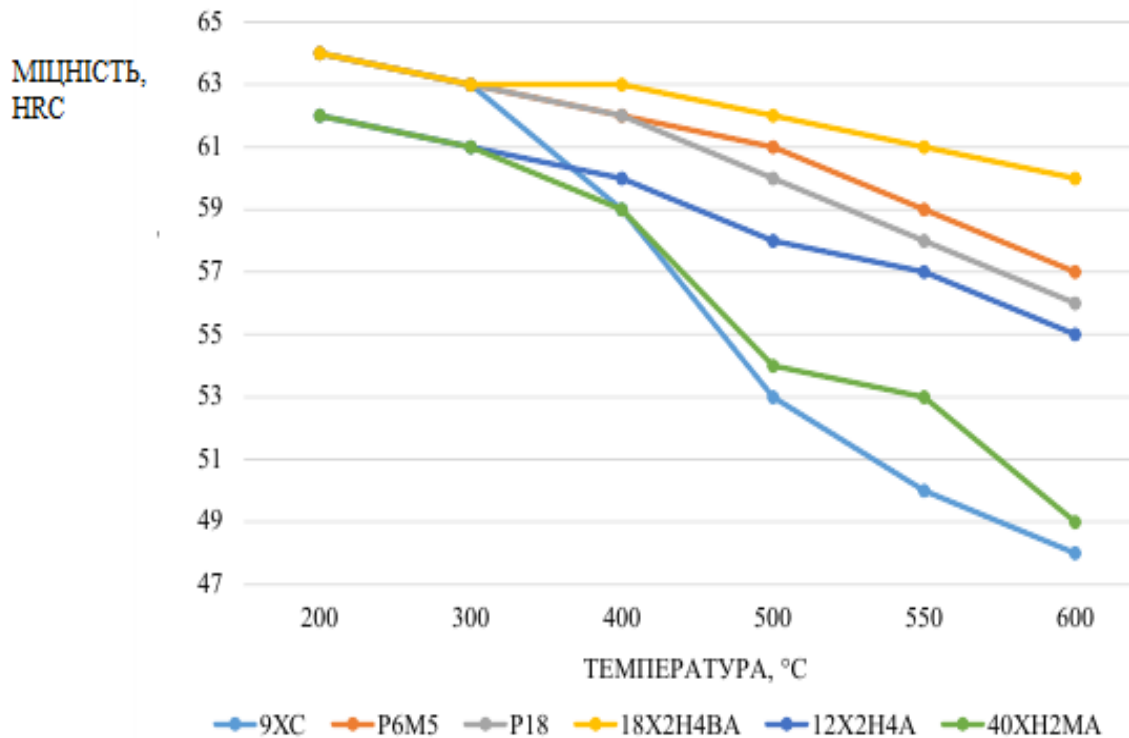


Рис. 1.3 Характеристика зміни твердості сталей залежно від температури відпустки.

Для збереження твердості на рівні 62...64 HRC оптимальна температура нового способу відновлення деталей форсунки розпилювача не повинна перевищувати 180...200°C.

1.3. Аналіз зносу деталей розпилювача форсунки.

Основна причина зношування прецизійних пар у паливній системі пов'язана з якістю палива. Відповідно до стандартів, масова частка механічних домішок у паливі повинна становити не більше 0,005% включно, і це оцінюється як їх відсутність. Вміст механічних домішок у паливі збільшується на етапах від нафтопереробного заводу до паливного бака машини з 0,0005 до 0,063%, тобто в 126 разів. Машинно-тракторні агрегати переміщаються великими земельними площами і працюють у пиловій хмарі, яка містить тверді абразивні частинки.

Встановлено, що через сапун до паливного бака трактора надходить до 0,3 м³ повітря на годину. При оранці ступінь насичення повітря пилом становить 0,05...1,2, при сівбі - 0,8...2,5 і при транспортних роботах доходить до 2,1 г/м³. Встановлено концентрацію абразивних частинок у баку з паливом при оранці 30 г/т або 0,0255 г/літр при щільності дизельного палива 850 кг/м³. Мікротвердість кварцового абразиву перевищує мікротвердість робочих поверхонь деталей у 1,4 рази, а у оксиду алюмінію перевищення у 2,7 рази. Для захисту вузлів та деталей паливної апаратури машин від забруднень застосовуються різноманітні ущільнення, але вони також недосконалі [17]. При порушенні технології ремонту та обслуговування паливної системи можливе попадання до неї великих абразивних частинок та хімічно активних речовин, що також руйнує деталі паливної апаратури (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Характеристика забруднюючих речовин, що веде до зношування прецизійних поверхонь.

Корозійне (хімічне) зношування деталей ПА дизелів викликається головним чином наявністю в паливі сірки та води. баків. Водна емульсія, розчинена в паливі, органічні з'єднання і гази різко збільшують швидкість корозії металів.

вміст водорозчинних кислот і лугів у паливі неприпустимо [6]. Підвищити корозійну стійкість деталей розпилювача і знизити нагароутворення можливо за допомогою нанесення на поверхні деталей захисної плівки, яка буде інертна до мінеральних і органічних розчинників, а також матиме низьку шорсткість і мати відштовхувальні властивості для забезпечення змиву продуктів горіння палива. Кількість абразиву, що міститься, в паливі впливає на напрацювання ПА, пошкодження фільтруючих елементів, з подальшим проходженням у систему більших абразивних частинок.

Таблиця 1.3 . Концентрація абразивних частинок палива після очищення

Найменування	до очистки	після очистки			
	100%	2%	5%	10%	15%
Оксид кремнія	78%	1,56%	3,90%	7,80%	11,70%
Оксид алюмінія	10%	0,20%	0,50%	1,00%	1,50%
Оксид заліза	10%	0,20%	0,50%	1,00%	1,50%
Оксид магнія	1%	0,02%	0,05%	0,10%	0,15%
Оксид кальція	1%	0,02%	0,05%	0,10%	0,15%

Абразив має різну геометричну форму, включаючи сферичну, овальної, конусну і т.д., надходить у розпилювач форсунки з потоком палива. Використання низькоякісних фільтрів призводить до передчасного зношування паливної апаратури. На рис. 1.5 показаний вид фільтруючого середовища паливного фільтра зі збільшенням у 500 разів. Слід зазначити, що всі низькоякісні фільтри (контрафактні) мають більшу структуру доби, ніж високоякісні (оригінальні). Механічні домішки, що містяться в паливі при використанні неоригінальних фільтрів, потрапляють у систему та викликають прискорене зношування деталей. Масове використання перших фільтрів пояснюється тим, що вони мають вартість значно нижчу за другі [19]. Така різниця ціни пояснюється тим, що при їх виробництві не дотримуються технологій виготовлення та використовуються неякісні матеріали. Застосування цих фільтрів нерідко призводить до заміни ПНВТ, форсунок та розпилювачів. ПНВТ, форсунок та розпилювачів.

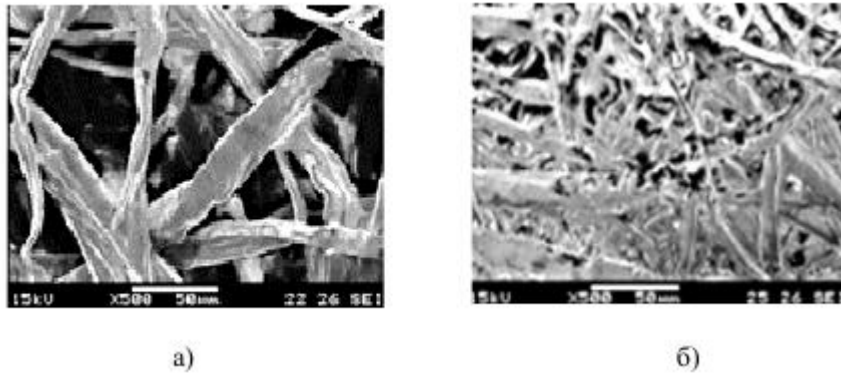


Рис. 1.5 Зображення фільтруючого елемента у розрізі при збільшенні в 500 разів: а – низькоякісний фільтр (неоригінальний чи контрафактний); б – високоякісний фільтр (оригінальний).

За результатами обстеження фільтрів тонкого очищення (ФТО) палива тракторів встановлено, що більше 35% з них втрачають працездатність в умовах експлуатації на обводненому паливі.

У рядовій експлуатації 10 ... 18% елементів ФТО набухають і деформуються. Фільтри швидше забиваються механічними домішками, що призводить до збільшення розміру пор та пропуску більшої кількості абразивних частинок. Таким чином, дизельне паливо є гетерогенною сумішшю, а знос розпилювачів форсунок у процесі експлуатації є природним явищем. Розпилювачі форсунок автотракторних дизелів схильні до раптових і поступових відмов. Раптові відмови характеризуються порушенням рухливості голки, викликаними зношуванням робочих поверхонь та зменшенням зазору між напрямними поверхнями корпусу та голки.

На рис. 1.6 представлений зовнішній вигляд із дефектами зношених деталей розпилювачів форсунок .

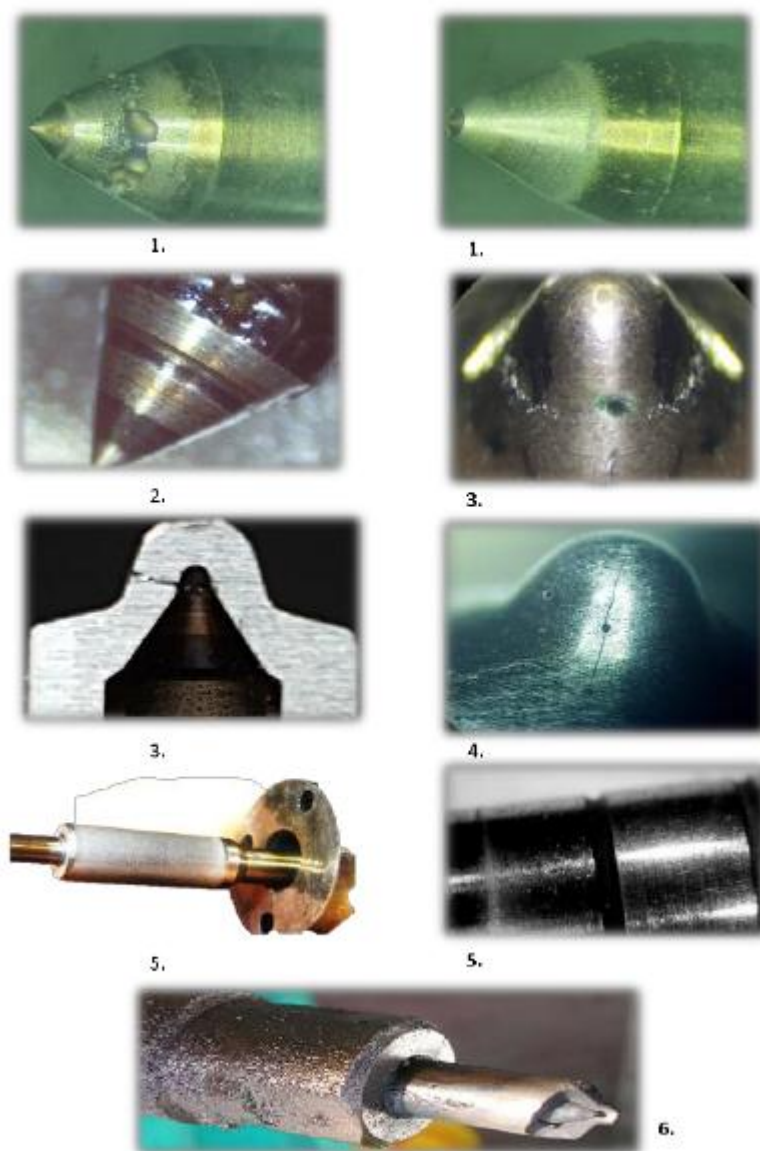


Рис. 1.6. Зовнішній вигляд та дефекти зношених деталей розпилювачів форсунок: 1 – Ерозія запірного конуса; 2 - Знос запірного конуса по поясу, що ущільнює; 3 – Зношування розпилювальних отворів; 4 – Тріщина на носику розпилювача; 5 – Задири на напрямній; 6 - Відкол носика розпилювача.

Місця зношування голки і корпусу розпилювача (рис. 1.7) наступні: зовнішні поверхні - торець голки 1 і торець корпусу розпилювача 2 і внутрішні поверхні - напрямна поверхня А, замикаючий конус Б і отвори, що розпилюють.

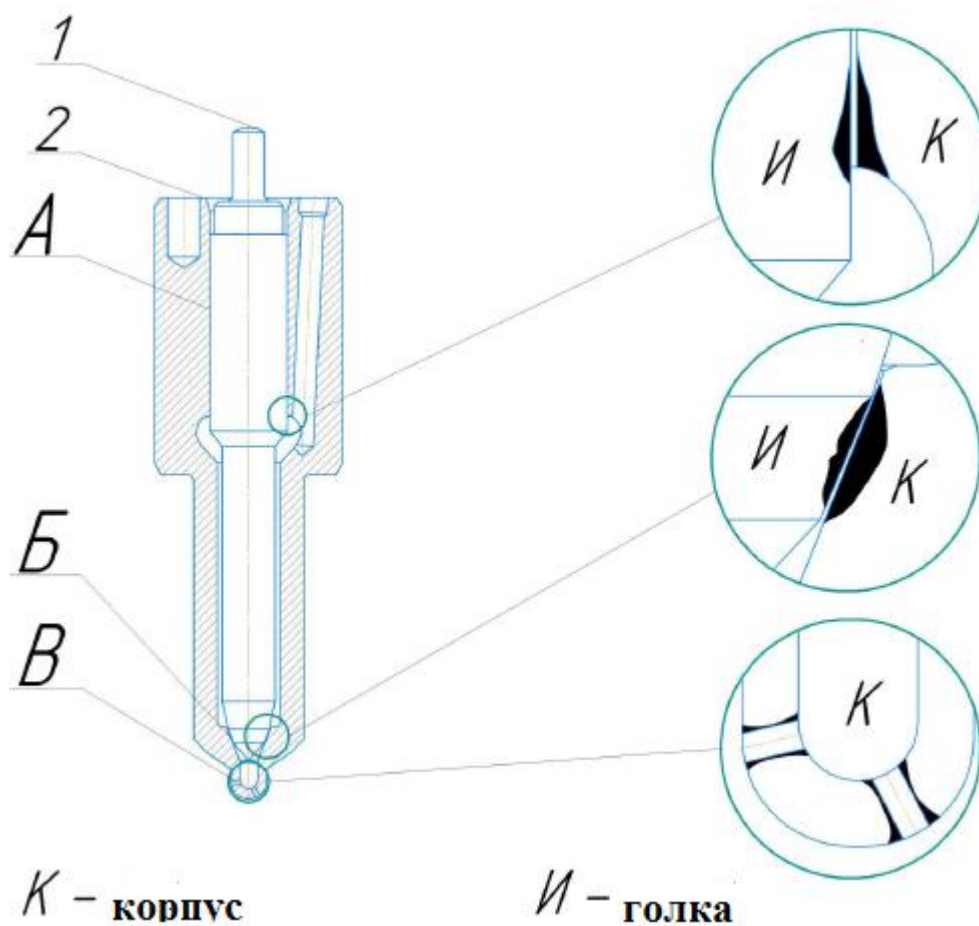


Рис. 1.7. Дефекти (знос) голки та корпусу розпилювача [21]: 1 – торець голки; 2 – торець корпусу розпилювача; А - напрямна поверхня; Б - замикаючий конус; В – отвори, що розпилюють.

Торець голки розпилювача 1 сполучається зі штоком форсунки та утримує її в закритому положенні пружиною. При нагнітанні достатнього тиску палива у внутрішній порожнині корпусу розпилювача голка долає силу стиснення пружини і відкриває подачу палива, що йде через отвори, що розпилюють, в ЦПГ дизеля. В результаті багатоциклових динамічних навантажень здійснюється його стирання. Компенсація зменшення довжини голки розпилювача забезпечується за рахунок підбору регулювальних шайб. Торець корпусу розпилювача 2 сполучається з корпусом форсунки. У момент установки розпилювача у форсунку і її подальшого монтажу в головку блоку циліндра (ГБЦ), а також у процесі експлуатації, при якій здійснюється температурне розширення сталей, що

застосовуються для виготовлення деталей розпилювача і форсунки, виникають деформації робочих поверхонь розпилювача, які призводять до порушення площини площу торця 2 А і прямоліній. 3...5 мкм, а викривлення осі корпусу розпилювача 5...25 мкм. Основними заходами, що зменшують деформацію корпусу розпилювача, є зниження жорсткості гайки для компенсації неточностей виготовлення та посилення допуску на неперпендикулярність опорного торця гайки до осі різьблення, а також виключення контакту гайки з корпусом розпилювача по галтелі в місці переходу носика корпусу в потовщену частину канал головки двигуна. Торець голки стирається в результаті багатоциклових динамічних навантажень, що виникають при завершенні подачі палива до ЦПГ. Торець корпусу форсунки не зношується, але впливає на знос напрямної та запірного конуса розпилювача. Напрямна поверхня голки та корпусу розпилювача піддається корозійно-механічному зношуванню (рис. 1.7.А). Наявність у паливі хімічно активних речовин призводить до корозії поверхонь напрямної. Знаходження абразиву в паливі у вигляді дрібнодисперсних частинок і попадання їх у поєднання деталей між корпусом та голкою розпилювача форсунки викликає як пластичну деформацію, так і мікрорізання металу [14, 18]. Про це свідчать поздовжні ризики на голці та корпусі розпилювача. Результатом зносу є стирання циліндричної поверхні прецизійного сполучення голки з корпусом розпилювача до набуття конічної форми, орієнтованої у бік запірного конуса. На рис. 1.8 показана динаміка руху абразивної частинки в потоці палива, який характеризується тиском, температурою і швидкістю, і заклинювання її в напрямної розпилювача форсунки в момент збільшення тиску палива перед упорскуванням його в ЦПГ.

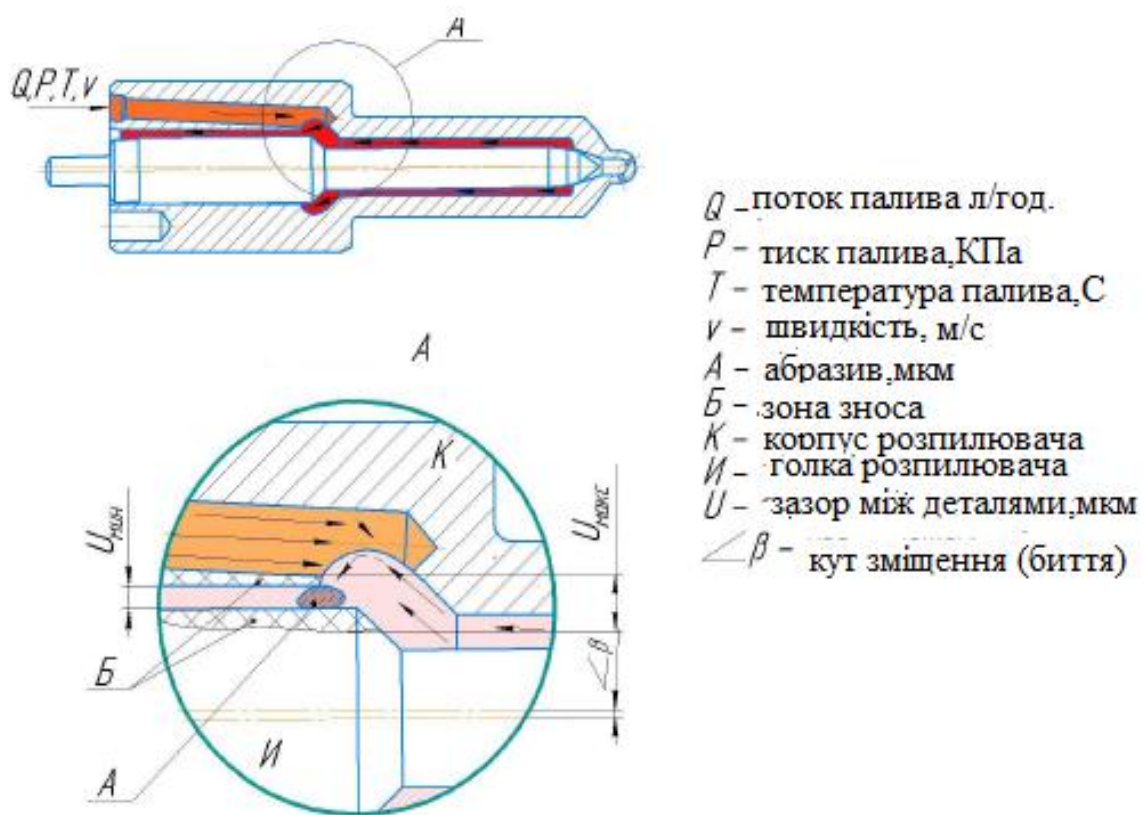


Рис. 1.8. Рух абразиву у розпилювачі форсунки ДВЗ.

В момент подачі палива в ЦПГ дизеля голка здійснює поступальний рух відносно корпусу розпилювача, руйнування частинок або вимивання їх в камеру згоряння. [21]. В результаті зношування направляючої розпилювача форсунки знижується гідроцільність розпилювача, а питома витрата палива збільшується на 3,4% [19]. До найбільш слабких місць розпилювача форсунки відноситься запірний конус, поверхні якого зношуються нерівномірно. Щодо осі голки порушується на $6...8^\circ$. Зношування торця 1 і запірного конуса розпилювача Б збільшує висоту підйому голки на $0,16...0,37$ мм при напрацюванні до 4000 мото-ч. зносу збільшується швидкість опускання голки, що призводить до більш інтенсивного зношування запірної частини розпилювача [9, 20, 24]. Зношування запірного конуса відбувається через багатоциклові динамічні навантаження, в результаті яких метал деталей зазнає наклеп, що призводить до його втоми і лущення мікрооб'ємів. У момент подачі палива, в якому містяться абразивні частинки та хімічно активні речовини, камеру згоряння двигуна здійснюється

вимивання частинок металу деталей розпилювача, що характеризується гідроабразивним зношуванням. У момент від початку опускання голки і до повного перекривання потоку палива, що подається в ЦПГ, зменшується щілина, що дроселює, збільшується швидкість руху палива, а разом з нею і швидкість абразиву. При дотичному контакті абразиву із запірним конусом на його поверхні утворюються ризики та борозенки, а при динамічній пружно-контактній взаємодії здійснюється дроблення абразиву. Залежно від природи абразивної частки вона або руйнується, або впроваджується в поверхню деталей. На зношування замикаючого конуса більшою мірою впливає збільшення зазору сполучення напрямної поверхні, від якої залежить збільшення кута биття (зміщення) голки, так як за допомогою завершення кожного циклу впорскування палива голка своїм конусом розбиває замикаючий конус корпусу розпилювача. Порушення щільності сполучення призводить до підтікання палива до камери згоряння. Великі краплі не встигають згоріти і утворюють кокс і нагар на деталях розпилювача, поршні та компресійних кільцях, що зумовлює нагароутворення. Кавітаційне зношування утворює на поверхнях запірного конуса ерозію у вигляді невеликих заглиблень або кратерів різних розмірів. Механізм руйнування поверхні наступний: спочатку здійснюється прискорене розпушення металу, що призводить до утворення множинних мікротріщин, а потім викрошування дрібних частинок [27]. Кавітація виникає після завершення подачі палива розпилювачем у момент перекриття голкою його потоку. Потік палива перенаправляється у зворотний бік, при обтіканні запірного конуса утворює зону з низьким тиском, що призводить до утворення каверни (кавітаційних бульбашок), які заповнюються насиченою парою палива та розташовуються на його поверхні. Ефект кавітації на запірному конусі спостерігається і на початку циклу впорскування палива в камеру згоряння і поширюється на отвори, що розпилюють. Кавітаційна дія знижує в'язкість дизельного палива, в результаті якого збільшується температура спалаху і відбувається його детонація через деструкцію молекул, що викликається мікрокрекінгом та процесами іонізації. Працездатність розпилювачів форсунок багато в чому визначається станом отворів, що розпилюють. На кромках отворів, що розпилюють, здійснюється

гідроабразивний і кавітаційний знос, який супроводжується нерівномірним зношуванням. Зміна геометрії всередині сопла супроводжується порушенням циліндричної форми, збільшенням діаметра отворів і шорсткості їх стінок, а також закругленням кромки, що призводить до збільшення пропускної здатності форсунки, зниження тиску та скорочення тривалості та якості впорскування палива. Найбільш інтенсивно цей процес протікає у перші 50...200 годин роботи розпилювача. Закруглення кромки отворів, що розпилюють, на виході з корпусу розпилювача здійснюється в результаті раптового розширення потоку палива. Потік зривається з кромки і розширюється не раптово, як русло, а поступово, утворюючи вихроутворення, що є причиною зношування. У разі наявності у паливі забруднюючих речовин збільшується інтенсивність зношування. Аналогічний процес здійснюється і на вході в отвори, що розпилюють, але з протилежною дією за рахунок раптового звуження потоку палива. В результаті цього погіршується шорсткість поверхні отворів, що впливає на гідравлічні характеристики розпилювача. Значення критичної висоти мікронерівності може бути $Ra\ 0,8$. При тривалій експлуатації і в міру зношування розпилювача отвори, що розпилюють, закоксовуються. Це відбувається внаслідок впливу високих температур і фізико-хімічних процесів, викликаних нестачею кисню в ЦПГ. Інтенсивність нагароутворення залежить від наступних факторів: проникнення продуктів згоряння в корпус розпилювача, хімічний склад палива, додаткове підприскування дизельного палива до камери згоряння та зниження тиску початку впорскування. Через нагароутворення зменшується ефективний прохідний переріз розпилювача, внаслідок цього камеру згоряння двигуна подається менший обсяг палива, що порушує рівномірність подачі по циліндрах, і, як наслідок, знижуються техніко-економічні показники дизеля. Зменшення ефективного прохідного перерізу отворів, що розпилюють, через закоксовування на 20..25% призводить до зниження потужності двигуна на 6,5...8,0%. Інтенсивність руйнування від кавітації може бути знижена шляхом використання матеріалів та технологій, спрямованих на зниження впливу зношування деталей. Рішенням німецької компанії Fisher Scientific із виробництва гідравлічних насосів було використання відповідних деталей. Американська компанія Emerson

Electric, що займається розробкою систем управління технологічними процесами (клапани та аналітичні прилади), пропонує рішення щодо використання більш твердих матеріалів. Всі пропоновані способи дозволяють захистити деталі від кавітації, а, отже, формування на розпилювальних отворах розпилювача форсунки щільного зносостійкого покриття, у якого міжмолекулярний зв'язок молекул коротше, ніж у металу деталей розпилювача, дозволить знизити вплив руйнівного ефекту від кавітації і надображів.

Проведений аналіз свідчить про можливість збільшення надійності отворів розпилювача форсунки за допомогою осадження на їх стінках щільного і зносостійкого покриття, яке дозволить знизити вплив руйнівного ефекту від кавітації і гідроабразивного зношування. Проведений аналіз свідчить, що зношування напрямних голки і корпусу розпилювача впливають на витік палива і залишковий тиск у нагнітальній порожнині, замикаючих конусів – на тиск початку і кінця впорскування, а отворів, що розпилюють, на якість його розпилу. У таблиці 1.4 розглянуто дефекти розпилювача, що впливають надійність форсунки. У таблиці 1.5 представлені величини зношування та ймовірності відмови по зношуваних частинах розпилювача форсунок типу ФД-22 залежно від напрацювання. Знос торця голки впливає її висоту підйому, що погіршує якість розпилу палива. Торець корпусу форсунки не зношується, але впливає на знос прямої та запірної конуса розпилювача. Збільшення зазору прямої частини розпилювача впливає знос запірної конуса, оскільки збільшується його площа контакту. Збільшення діаметра отвору, що розпилює, призводить до збільшення кількості подається об'єму палива в циліндр двигуна, що впливає на техніко-економічні параметри роботи машини.

Таблиця 1.4 Зношування розпилювача форсунки.

Спряження розпилювача	Знос U, мкм		Імовірність відмов , Р, %	
	min	max	500 МОТО-Ч	4000 МОТО-Ч
Торець хвостовика голки	1	5	3	8
Торець корпусу розпилювача	-	-	-	-
Направляюча	20	70	39	88
Запірний конус	5	20	23	36
Розпилюючі отвори	29	78	48	89

До відновлення прецизійних деталей розпилювачів форсунок придатні до 90% ремфонду, а решта 10% вибраковуюються через неможливість відновлення .
Порушення працездатності розпилювачів форсунок пов'язане з впливом на них різноманітних факторів, що призводять до зносу, деформацій, корозії або інших видів пошкодження робочих поверхонь деталей, що сполучаються, які призводять до зниження потужності двигуна і збільшення витрати палива. З метою підвищення надійності розпилювача необхідно знижувати інтенсивність зношування деталей шляхом збільшення їх фізико-механічних властивостей або поліпшення якості очищення палива. Порушення працездатності розпилювачів форсунок супроводжується токсичністю відпрацьованих газів.

Якщо димність відпрацьованих газів за результатами вимірювань вища за норму, то машина спрямовується на ремонт або регулювання дизеля та його складових .
Визначення вмісту окису вуглецю в кабіні самохідної машини проводять газоаналізатором KI-28066 або аналогічним в зоні дихання оператора на висоті 700...800 мм від точки відліку «0» сидіння під час виконання технологічної операції. Перед початком вимірювань машина повинна відпрацювати щонайменше 1 години при завантаженні двигуна щонайменше 70% від номінальної. При взятті проби в кабіні необхідно провести щонайменше 5 вимірів зміст окису вуглецю, норма вмісту окису вуглецю в повітрі повинна бути не більше 20 мг/м³. У разі, якщо в кабіні машини концентрація окису вуглецю вище норми, необхідно провести технічне обслуговування з усунення підвищеного вмісту . При несправностях розпилювачів форсунок автотракторних

дизелів, не тільки знижується потужність двигуна і зростає витрата палива, але і в навколишнє середовище з відпрацьованими газами надходить велика кількість токсичних і канцерогенних речовин, які призводять до масового забруднення повітря, ґрунту, води та отруєння операторів експлуатованої техніки.

1.4. Знос деталей форсунок.

Характер взаємодії абразивної частинки з поверхнею деталі змінюється від мікрорезання до пластичного передеформування матеріалу. Мікротвердість матеріалу вплив абразивної частинки на поверхню приймає характер пружного відтискання. При цьому мікрорізання на поверхні деталі не спостерігається, а зношування відбувається внаслідок багатоциклової втоми матеріалу, для мінімізації абразивного зношування поверхнева мікротвердість матеріалу повинна бути не нижче 17 ГПа. Зносостійкість зміцненої металевої поверхні різко зростає при її значеннях мікротвердості, не перевищує роботи деталей за наявності у зоні контакту кварцового абразиву мікротвердість їх поверхні має становити щонайменше 9 ГПа, а за наявності оксиду алюмінію щонайменше 16,8 ГПа . Найбільш перспективні шляхи вирішення - це отримати задану довговічність за рахунок створення поверхонь з необхідними фізичними та механічними властивостями та максимально знизити значення зовнішніх факторів на працездатність агрегатів. Проблема підвищення надійності прецизійних деталей паливної апаратури може вирішуватися двома шляхами. Прецизійних деталей шляхом зміцнення рівня, що перевищує мікротвердість абразивних частинок, що містяться в паливі. Недоліком першого шляху є неможливість повного очищення палива фільтруючими елементами. Найбільш ефективними рішеннями підвищення надійності розпилювачів форсунок є вдосконалення методів зміцнення деталей на стадії їх виготовлення та розробка зміцнювальних технологій відновлення зношених деталей. Зміцнення робочих поверхонь деталей дозволяє компенсувати недосконалість наявних нині ущільнень, з'єднань та систем фільтрації.

1.5. Методи реставрування та зміцнення розпилювачів форсунок

Відновлення деталей вигідно, оскільки витрати на запасні частини знижуються до 45% у разі відновлення власними силами вартості нових і ресурсі рівному новому, а при збільшеному в 1,5...2 рази до 23...30% . В даний час широко застосовується спосіб відновлення розпилювачів форсунок автотракторних дизелів, за допомогою перекомплектування. Даний метод є найбільш раннім і полягає в очищенні, дефектуванні, виведенні слідів зносу і селективній добірці прецизійних пар. Забезпечення герметичності замикаючих конусів здійснюється шляхом спільного притирання голки та корпусу. Спосіб дозволяє відновлювати трохи більше 30% ремфонду розпилювачів. Крім того, не вирішується проблема відновлення отворів, що розпилюють. Однак ефективність цього способу вкрай низька, так як у перші сотні годин роботи такі розпилювачі знову втрачають герметичність . Відом спосіб, при якому деталі розпилювача, що прийшли в ремонт після видалення слідів зносу, комплектуються новими. Перевагою даного способу є те, що з корпусу розпилювача можна усунути сліди зносу і під нього виготовити нову голку з необхідними розмірами і навпаки. Це дозволяє заощадити на ресурсах сировини, трудомісткості виготовлення одиниці та витратах під час виробництва цілком нових розпилювачів. Даний спосіб може бути реалізований тільки на заводах-виробниках прецизійних деталей паливної апаратури , так як механічна обробка голки та корпусу повинна проводитись на обладнанні, що застосовується при виготовленні нових розпилювачів. Існує велика кількість способів відновлення та зміцнення зношених робочих поверхонь деталей машин шляхом формування на їх ділянках зносостійких покриттів.

. Дифузійна металізація

Дифузійні покриття на основі карбідів, нітридів, боридів заліза та легуючих елементів відрізняються високою зносо- та корозійною стійкістю. При відносно невеликій товщині покриття, що зміцнює. Запропоновано спосіб відновлення розпилювачів дифузійним боруванням у розплаві солей. В результаті на поверхні сталі утворюються бориди заліза та карбіди бору. Мікротвердість сталей P18 та

18X2H4BA після борування від 18,7...28 ГПа. Збільшення розмірів деталей до 20...30 мкм. Однак, боридні шари мають високу крихкість і схильні до сколювання, особливо при ударних навантаженнях, а сам процес борування з розплаву солей токсичний і має низьку технологічність. Показана висока ефективність відновлення розпилювачів форсунок дифузійним газофазним титануванням у порошках. Цей процес дозволяє отримати збільшення розмірів сталі Р18 до 20 мкм, а 18X2H4BA до 40 мкм при мікротвердості поверхні, що складається з титану карбідів, до 32 ГПа. За результатами випробувань ресурс розпилювачів, відновлених дифузійним титануванням, вищий у 2...3 рази. Водночас дуже висока мікротвердість покриття різко ускладнює їх механічну обробку, підвищує трудомісткість та собівартість відновлення. Сам процес титанування в порошках для масового виробництва малотехнологічний і має велику витрату компонентів, що насичують [25]. Розроблено технологію відновлення та зміцнення плунжерних пар, виготовлених з азотованої сталі 25X5MA, газофазним контактним хромотитануванням у контейнерах з плавким затвором. Для зменшення ефекту пористості, що супроводжує процес хромування азотованої сталі, було використано явище різної стійкості нітридів насичувальних елементів: чим вище нітридоутворююча здатність насичуючого елемента, тим вища стійкість його фаз. Титан має найбільшу хімічну спорідненість до азоту. При додаванні його в хромуючу суміш він першим утворює стійкі по відношенню до хрому нітридні фази і зв'язує азот поверхневому шарі сталі. Хромотитанування азотованої сталі 25X5MA запропоновано проводити в порошковій суміші складу, % (за масою): хром (Cr97) – 45%; феротитан (FeTi – 30) – 5%; оксид алюмінію (Al_2O_3) – 47%; хлористий амоній (NH_4Cl) – 3%. При температурі 1100 ° С і часу витримки 6 годин зміна розмірів деталей становить 90 ... 100 мкм. Досліджено газофазне контактне боронікелювання в порошках з метою отримання покриттів, що поєднують високу мікротвердість із відносно низькою крихкістю. Боронікелювання проводилося в печах з окисною атмосферою в контейнерах з плавким затвором. Рекомендована порошкова суміш наступного складу, % (за масою): карбід бору (B_4C) – 48%; оксид алюмінію (Al_2O_3) – 32%; порошок нікелю (Ni) дисперсністю

0,04-0,1 мм - 20%. Приріст лінійних розмірів зразків зі сталі марок 25Х5МА, ХВГ, 45 і 65Г при температурі 1050 °С і часу витримки 4 години становить відповідно 45, 65, 70 і 78 мкм. Для збільшення розмірів деталей, виготовлених із сталі марок 25Х5МА і ХВГ, запропоновано склад, % (за масою): 70% (50% В4С + 50% Al₂O₃) + 30% НПГ – 75 (порошок композиту Ni₂₅Mn). Температура процесу – 1050 °С та час витримки – 6 годин. Отримана зміна розмірів зразків із сталі 25Х5МА та ХВГ становить відповідно 115 та 125 мкм. Поверхнева мікротвердість дифузійних комплексних покриттів, отриманих на основі боридів заліза (FeВ та Fe₂В) та диборидів нікелю (Ni₂В), знаходиться в межах 16...18 ГПа . обробки карбідохромових покриттів, що мають поверхневу мікротвердість у межах 16522 ГПа. Замість малопродуктивної механічної обробки деталей із застосуванням абразивного інструменту та довідкових паст на основі електрокорунду білого була запропонована технологія алмазного хонінгування та доведення алмазними та карбідотитановими пастами. Осадження хрому карбіду методом контактного хромування проводиться при температурі 1220°С протягом 7 годин. Мікротвердість одержуваного карбідохромового покриття 15...18 гПа. Досліджено неконтактне парофазне хромування у вакуумі з метою зменшення шорсткості поверхні та виключення механічної обробки виробів із сталі ХВГ та Х12. Даний спосіб хромування дозволяє зменшити шорсткість поверхні зразків на 1 ... 2 класу і отримати карбідохромове покриття з Ra_{0,2} мкм, так як відсутність контакту виробу з частинками хрому більшою мірою проявляє ефект заліковування дефектів поверхні (вакансій, мікротріщин). Оптимальний режим неконтактного хромування у вакуумі: температура – 1140 °С; час витримки – 3 год; грануляція порошку хрому – 0,4...1,5 мм; відстань від хрому до виробів – 5...10 мм. Збільшення товщини покриття, що наноситься за рахунок тривалого часу витримки при високій температурі призводить до збільшення зерна в сталі. Збільшення товщини покриттів більше 150 мкм, що мають мікротвердість в межах 14 ... 19 ДПа, призводить до утворення тріщин, що обмежує застосування дифузійних покриттів як способу відновлення прецизійних плунжерних деталей [18, 27]. Структура сталі після дифузійного хромування при температурі понад 1100 °С має величину евтектоїдного зерна, що дорівнює 6...7

балам, а піддані попередньо термоциклічній обробці (ТЦО) - 4 бали. Комплексний процес інтенсифікації дифузійного хромування за схемою: ТЦО + хромування + ТЦО сприяє додатковому приросту товщини дифузійного шару, але підвищує дисперсність структури до 1...2 балів. Інерційність нагріву та охолодження реакційного простору не дозволяє проводити ТЦО при великій масі саду. Аналіз досліджень міцності зчеплень дифузійних покриттів із підкладкою свідчить, що середня міцність перебуває у межах 240...340 МПа [12, 19, 20]. Високотемпературне нагрівання деталей призводить до зменшення лінійних розмірів напрямних голок на 13,7 мкм, а довжини голки – на 118,6 мкм. Середня довжина корпусів розпилювачів зменшується на 32,7 мкм, а середній діаметр спрямовує на 22 мкм. У водночас зміна лінійних розмірів деталей, викликаними фазовими і структурними перетвореннями для сталі Р18 – 10...12 мкм, 18Х2Н4ВА – 20...25 мкм . Аналіз результатів вимірювань прогину деталей показав, що збільшення часу витримки дифузійного борування не істотно впливає на його величину. Це можна пояснити великим співвідношенням товщини дифузійного шару діаметру плунжера, відповідно 1:100 і 1:50. Середня величина прогину плунжерів, борованих 2 і 6 годин, після охолодження контейнерів протягом 8 годин становить 9,8 і 12,7 мкм, а максимальна досягає 20 мкм. Збільшення швидкості охолодження контейнера призводить до збільшення короблення плунжерів до 35 мкм [17]. Причиною короблення є виникнення градієнта температури від поверхні до серцевини голки через високу швидкість нерівномірності нагріву та охолодження саду у вакуумній печі. Все це призводить до неодночасного розширення зовнішніх та внутрішніх обсягів металу через його структурні зміни. Усунути короблення можна за допомогою механічної обробки (шліфування), але для цього потрібно робити додатковий припуск на товщину покриття, що наноситься (рис. 1.10). Після шліфування деталі з прогином спостерігається різнотовщинність дифузійного шару, яка призводить до різної несучої здатності нанесеного покриття, що залишилося, тому короблення значно погіршує якість прецизійних деталей . Використання способів відновлення деталей за допомогою дифузійної металізації лімітує кількість відновлюваності будь-яких прецизійних деталей, у тому числі голок

розпилювача форсунок. Їх відновлення можливе при товщині дифузійного шару, більшої величини прогину деталей, що виник через високотемпературної термообробки.

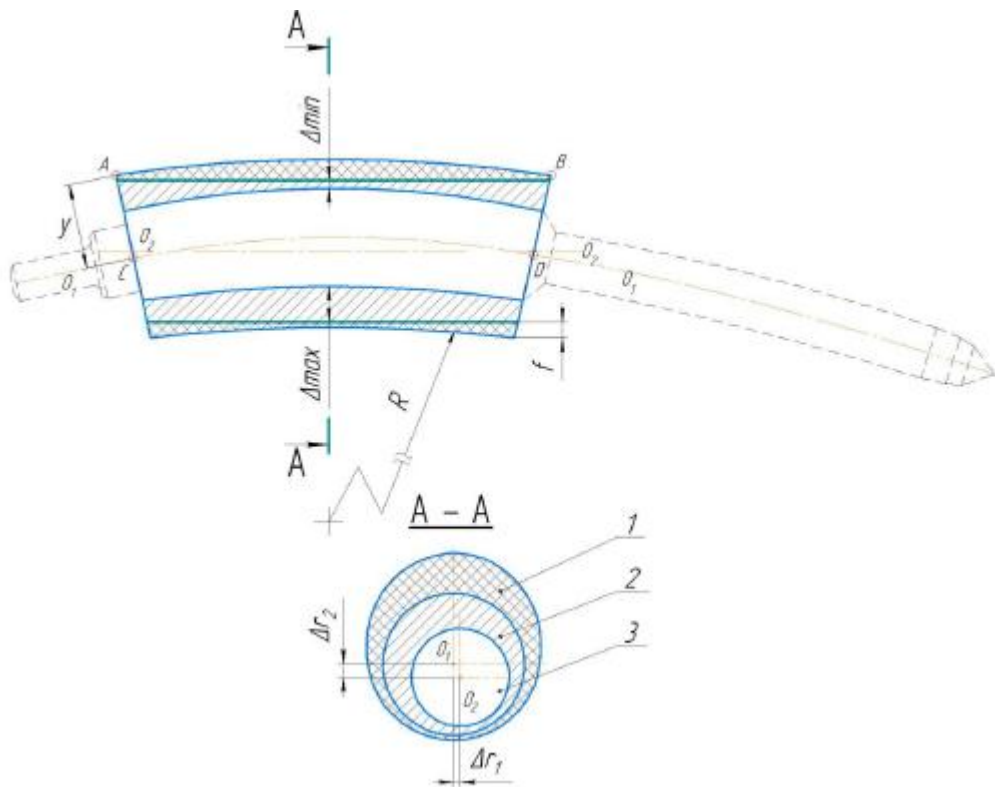


Рис. 1.9. Прогинання (короблення) циліндричних деталей після зміцнення високотемпературними способами: y – відстань від поверхні деталі АВ до нейтрального шару ЦД, мм; $\Delta_{\max}$, $\Delta_{\min}$ – товщина зняття зміцнюючого покриття, мм; f – величина прогину, мм; R – радіус кривизни нейтрального шару, мм; Δr_1 , Δr_2 – відстань усунення осі, мм; O_1O_1 і O_2O_2 – відповідно, вісь деталі до зміцнення та після. 1 - частина покриття, що видаляється; 2 – залишковий шар покриття після механічної обробки; 3 – деталь.

Недолік застосування механічної обробки – це утворення ексцентриситету через усунення осі Δr . Внаслідок цього виникає биття голки у корпусі розпилювача. Середнє сукупне значення зміщення осі Δr знаходиться в інтервалі до 2 мкм. При ХТО середній прогин деталей f залежно від конфігурації розташування деталей у камері печі для корпусу становить 10...50 мкм, а голки 10...150 мкм. Мінімальний прогин деталей розпилювача виходить при розташуванні їх

конусами вгору. Більший прогин пояснюється досить великим відношенням діаметра до довжини та структурними змінами у металі при нагріванні. Дифузійний шар на основі карбідів хрому в поверхневій зоні має найбільшу концентрацію хрому та корисні стискаючі напруги. Тому при механічній обробці видаляється найбільш ефективна по зносо-і корозійної стійкості частина дифузійного шару. На рис. 1.11 представлено залежність зміни мікротвердості покриття від товщини дифузійного шару. Максимальна величина мікротвердості спостерігається на поверхні дифузійного покриття, механічна обробка при усуненні короблення видаляє найтвердіший шар покриття, і чим більший припуск, тим нижче мікротвердість покриття, що залишилося. Високотемпературний процес нанесення карбідів з подальшим усуненням короблення за допомогою механічної обробки може призводити до повторного викривлення деталей через релаксацію внутрішніх напруг в дифузійному шарі і різнотовщинності покриття, що залишилося. У процесі зберігання плунжерних пар розпилювачів форсунок може з'являтися ефект зависання. З рис. 1.9 видно, що механічна обробка при усуненні короблення видаляє найтвердіший шар покриття, і чим більший припуск, тим нижче мікротвердість покриття, що залишилося. Чим вище температура нанесення зносостійких покриттів, тим більші зміни в кристалічній решітці металу і більший прогин прецизійних деталей. Головна причина прогину пов'язана з впливом температури та неодночасним тепловим розширенням зовнішніх та внутрішніх об'ємів металу при нагріванні та охолодженні. Прогин з цієї причини є неминучим і необоротним, проте на його величину можна впливати, змінюючи температуру нагрівання та швидкість охолодження, можна зменшити неспіввісність прецизійних деталей паливної апаратури, різнотовщинність зміцнюючого дифузійного покриття та його різну поверхневу мікротвердість.

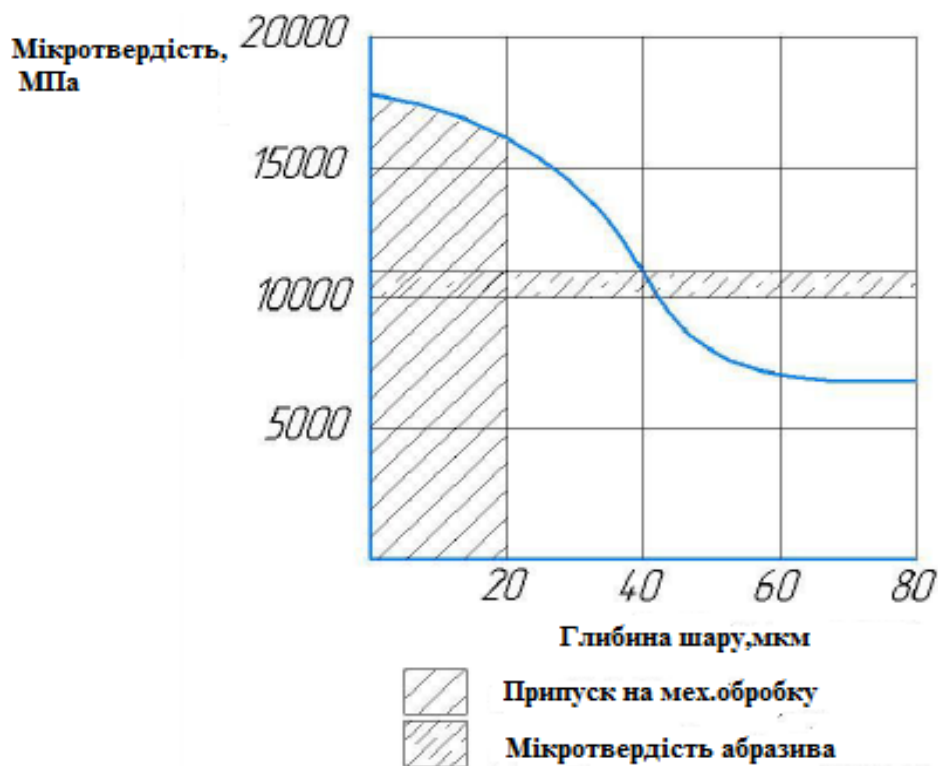


Рис. 1.10. Зміна мікротвердості за глибиною дифузійного шару на сталі ХВГ [17, 26].

Вплив перерахованих факторів можна звести до мінімуму, змінюючи температуру процесу, швидкість нагрівання та охолодження деталей, схему упаковки контейнерів тощо. Хромування у вакуумі з попереднім термоциклюванням дозволяє одержати приріст лінійних розмірів зразків до 25%. Всі перераховані вище способи вимагають високотемпературного нагрівання деталей, який сприяє зменшенню модуля пружності сталі і призводить до релаксації внутрішніх напруг. Структурні зміни у металі призводять до зміни питомого обсягу зерна металу, і це є причиною деформації. Крім того, збільшення структури зерна металу впливає на зниження ударної в'язкості, що неприпустимо, оскільки запірний конус розпилювача постійно зазнає динамічних навантажень, які можуть призвести до відколу носика корпусу розпилювача. Основними недоліками дифузійної металізації при відновленні прецизійних пар є: тривалість процесу, енергоємність, висока температура технології - 900 ... 1220 ° С, зростання зерна металу, різна товщина покриття після механічної обробки,

зміщення осей і релаксація внутрішніх напруг, що супроводжується зміною геометричної форми деталі.

Вуглець – алмазні покриття DLC

Вуглець – алмазні покриття (DLC) – це технологія отримання алмазоподібних покриттів. Принцип технології в наступному деталі встановлюються в касети, які потім ставляться на карусельний привід установки. Поряд з деталями встановлюються контейнери з хромом Cr (IV) і вуглецем C (IV) на частину, що не обертається. Плазма в процесі нанесення покриття містить іони цих елементів. Спочатку напилюється хром, тому що він, як метал, добре зчепляється з матрицею сталевих деталей, в яких містяться молекули вуглецю з 4х валентними зв'язками, а потім сам вуглець. Молекули вуглецю, що містяться в плазмі, вільно поєднуються з молекулами хрому, утворюючи ковалентні зв'язки. За рахунок цього покриття, що осаджується, має високу адгезію. Режим нанесення покриття має вигляд гіперболічної залежності, і здійснюється за рахунок зниження 100% концентрації хрому в плазмі з поступовим переходом на вуглець. Це дозволяє отримувати різноманітні композитні покриття, які містять як графітові, так і алмазні зв'язки. Обсяг одержуваних зв'язків можна регулювати рахунок тривалості впливу плазми на оброблювану поверхню на час зміни концентрації іонів. Температурний режим технології 400...600°C. Мікротвердість покриття 2000-3000 HV або 19,5-30 ГПа . Товщина покриття порівнянна з областю видимого світлового діапазону, тобто. від 0,3 ... 0,8 мкм. Покриття виходять дуже твердими, зносостійкими, але крихкими. Останнє обумовлюється, тим що вони містять у собі до 70% алмазних зв'язків [26].



Рису. 1.11. Вуглець – алмазні покриття (DLC): а – голка розпилювача форсунки АЗП; б – плунжери ПНВТ.

Відновлювати деталі розпилювача форсунки за допомогою цієї технології не оптимально через низьку товщину зміцнюючого шару та високий температурний режим.

Іонно-плазмове напылення PVD.

Іонно-плазмове напылення (PVD) – це різновид катодного способу нанесення матеріалу на поверхню виробу. Процес отримання покриття проводиться у середньому та високому вакуумі або в атмосфері робочого газу при тиску нижче 100 Па та здійснюється за допомогою бомбардування підкладки іонами плазмової речовини в газовому розряді (рис. 1.12) .

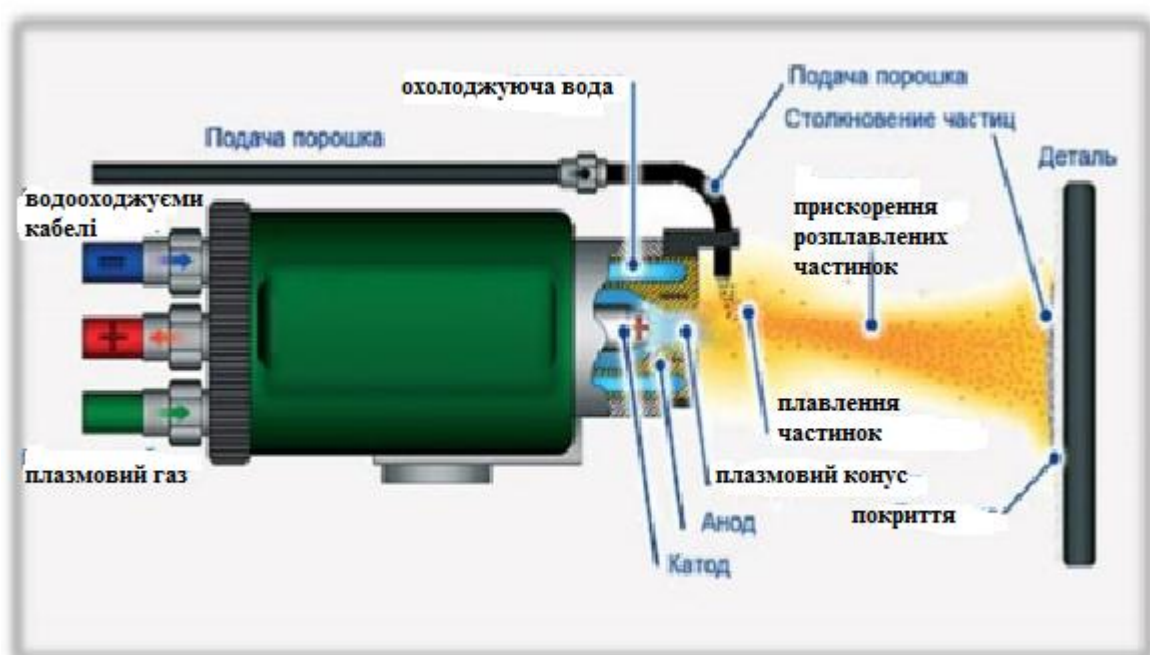


Рис. 1.12. Принцип роботи осадження PVD покриття.

Швидкість осадження залежить від відносного розташування джерела та матеріалу. Рівномірність покриття досягається систематизованим рухом матеріалу чи застосуванням кількох джерел. Даний спосіб має вибірковість, що дозволяє наносити покриття тільки на певні частини поверхні. Однак, на поверхню деталі покриття наноситься лише у прямій зоні від джерела. Температурний режим нагрівання деталей становить 250...750 °С. В результаті цього можна отримувати зносостійкі плівки товщиною до 10 мкм [135, 152, 216]. Таким чином, відновлення розпилювача форсунки іонно-плазмовим способом економічно не доцільно у вигляді високотемпературного режиму, що призводить до жолоблення деталей, недостатньої товщини зміцнюючого шару для компенсації зносу та можливості зміцнення тільки голки розпилювача.

Хімічна металізація.

Одним із способів відновлення геометричних розмірів зношених деталей розпилювача форсунки та захисту їх від корозії є хімічна металізація. Хімічна металізація – це метод осадження металевих покриттів, що ґрунтується на заміщенні електронів між речовинами окислювачем та відновником. Хімічна металізація з рідкої фази - це відновлення металів із розчинів солей або комплексних сполук. Головним недоліком цього методу є вибірковість процесу відновлення, так як він здійснюється на всіх поверхнях доступних розчину і в об'ємі розчину, що ускладнює технологічний процес і знижує коефіцієнт використання реактиву. Сорбційний метод, що є одним із різновидів цього методу, в промисловості отримав найбільше застосування для металізації пластмас із розчинів солей або комплексних сполук. Недоліками цього є насиченість численними елементами складу розчинів і багатостадійність процесу, отже, при утилізації розчину виникає ризик заподіяння шкоди навколишньому середовищі [21, 29]. Електролітична металізація – це осадження металевих покриттів на деталі та вироби у спеціальних ваннах за допомогою пропускання електричного струму через розчин. Спосіб отримав досить широке застосування

в промисловості та є одним з дешевих, що дозволяє наносити тугоплавкі покриття на основі хрому, нікелю, срібла, міді, цинку та інших металів [14, 24]. Отримувані покриття м'які, але мають хорошу антикорозійну стійкість. Даним способом залежно від тривалості ведення металізації регулюється товщина покриття, що наноситься, яка може досягати більше 1,2 мм, що достатньо для відновлення всіх придатних для ремонту розпилювачів. Температурний режим формування покриття вибирається у 100°C. Проте, при осадженні поверхні голки розпилювача гальванічного хрому мікротвердість осаду досягає 4000...6000 МПа. Для підвищення мікротвердості до рівня 7500...11000 МПа та збільшення адгезії покриття до поверхні деталі ведуть термообробку із застосуванням високої відпустки при температурі 400...500°C. Мікротвердість до 15000 МПа можна одержати з наступною цементацією покриття. До недоліків технологічного процесу слід віднести недостатньо високу якість зчеплення хромового покриття з відновлюваною деталлю через його крихкість, наявність великої кількості пір і високих внутрішніх напруг у шарі. При експлуатації відновлених розпилювачів цими покриттями в момент заміщення абразивних частинок у напрямній розпилювачі можливі відколи хромового покриття та заклинювання голки, що неприпустимо. Хімічна парофазна металізація (CVD метод) – є одним із різновидів хімічної металізації. Зносостійке покриття утворюється шляхом термічного розкладання металоорганічних сполук (МОС) на нагрітій підкладці в результаті термодинамічних реакцій у вакуумі. Фізико-механічні властивості зносостійкого покриття залежить від температури нагрівання деталей. Покриття, що отримуються, мають високу мікротвердість і щільність, максимальна товщина лімітується залишковими напругами і в середньому становить 200 мкм, швидкість формування покриттів до 10 мкм/хв; чистота одержуваної поверхні Ra 0,05 ... 0,32 мкм, температурний режим металізації від 70 до 1000 ° С. Міцність зчеплення покриття з підкладкою становить 35 МПа, що забезпечується підготовкою деталей до осадження покриття шляхом завдання поверхонь шорсткості на рівні Ra0,4 та їх очищення. Пропонують застосовувати адгезійний підшар з нікелю, товщина якого повинна становити 1 ... 5 мкм, і далі брати в облогу необхідне покриття.

Таблиця 1.5. МОЗ та технологічні параметри їх розкладання [26].

Група ПСХЗ	Основний матеріал покриття	Вихідні легуючі сполуки	Температура нагріву, °С		Теоретична мікротвердість карбіда для основного матеріала
			вихідної сполуки	підкладки	
VI	Cr	Cr(CO) ₆	40-80	300-700	до 18 ГПа
	Mo	Mo(CO) ₆	30-60	450-700	до 14,99 ГПа
	W	W(CO) ₆	40-70	450-700	до 17,16 ГПа
VIII	Fe	Fe(CO) ₅	20-30	100-300	до 5,8 ГПа
	Co	Co ₂ (CO) ₈	20-25	180-220	до 8 ГПа
	Ni	Ni(CO) ₄	20-30	100-300	до 9 ГПа

Найбільш переважним металоорганічним з'єднанням для застосування у відновленні деталей розпилювачів форсунок з точки зору мікротвердості одержуваних покриттів і мінімальної температури ведення металізації є гексакарбоніл хрому (Cr(CO)₆).

У таблиці 1.6 представлені можливі способи відновлення голки та корпусу розпилювача форсунки паливної апаратури, які дозволяють отримувати зносостійкі покриття на поверхнях сталевих деталей.

Таблиця 1.6. Методи відновлення деталей розпилювачів форсунок ДВЗ.

Способи	Недоліки
Перекомплектування	Неможливість відновлення ремфонду у повному обсязі
Дифузійна металізація (ХТО)	Висока температура технології до 1200 • Зростання зерна металу; • Різномовщинність покриття; • Зміщення осей; • Релаксація внутрішніх напруг
Вуглець – алмазні покриття (DLC – метод)	• Товщина покриттів до 0,8 мкм; • Температура нагрівання деталей до 600 °С.
Ионно-плазменное напыление (PVD – метод)	• Толщина покрытий до 10 мкм; • Температура нагрева деталей более 250 °С.

Електролітична металізація	• Висока пористість; • Схильність до розтріскування; • Мікротвердість до 15 ГПа; • Екологічна небезпека
Парофазна металізація (CVD-метод)	хімічна (CVD-метод) Температура нагрівання деталей від 300 • Товщина покриття до 1 мм.

Отже, найбільший інтерес підвищення зносо- і корозійної стійкості розпилювачів форсунок представляє спосіб парофазної хімічної металізації (CVD – метод) у вакуумі шляхом термічного розкладання металлорганіческого сполуки гексакарбонілу хрому $\text{Cr}(\text{CO})_6$.] Встановлено оптимальну температуру 300°C за умов вакууму $15\ldots 10$ Па, мінімальну температуру, при якій можливе формування карбіду хрому – 200°C в умовах вакууму $20\ldots 1$ Па. При цій температурі хімічна реакція нестійка і призводить до коливання температури підкладки на $10 - 20^\circ\text{C}$, що пов'язано з ендотермічністю процесу терморозкладання гексакарбонілу хрому. Як наслідок, покриття виходить з горизонтально-шаруватою будовою, нерівномірною структурою та з включенням домішок оксиду хрому, що супроводжується збільшеною витратою реактиву. Встановлено оптимальну температуру, при якій формується карбідохромове покриття, $220\ldots 250^\circ\text{C}$. Найбільш перспективним способом відновлення розпилювачів форсунок, що унеможливиює деформацію деталей, є низькотемпературна технологія отримання карбідохромових покриттів за допомогою парофазної хімічної металізації (CVD – метод) у вакуумі.

2. ВІЛНОВЛЕННЯ РОЗПИЛЮВАЧІВ ФОРСУНОК ДВЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КАРБІДОХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ

2.1. Умови осадження карбідохромового покриття.

Карбід хрому Cr_3C_2 – це зносостійке покриття, що осаджується на поверхнях сталевих деталей внаслідок термічного розкладання парів гексакарбонілу хрому $\text{Cr}(\text{CO})_6$ шляхом термодинамічної сполуки молекул та радикалів, що входять до складу карбонілу. Дослідниками [13, 21] встановлені основні реакції, що супроводжуються при розкладанні гексакарбонілу хрому та кінетика CVD-процесів. Визначено умови, за яких осаджується карбід хрому, та фактори, що впливають на його формування [15]. Хімічна реакція розкладання $\text{Cr}(\text{CO})_6$ здійснюється при контакті парів карбонілу з нагрітою підкладкою в реакторі CVD-установки. Температура нагрівання підкладки, своєю чергою, визначає швидкість розкладання парів, інтенсивність і швидкість зростання карбідохромового покриття, що визначає склад і структуру покриття.

Рівняння реакції розкладання гексакарбонілу хрому:

$$[\text{Cr}(\text{CO})_6]_{\text{газ}} \rightleftharpoons [\text{Cr}]_{\text{тв}} + 6[\text{CO}]_{\text{газ}} \quad (2.1)$$

Залишковий тиск або тиск вакууму в реакторі зміщує напрямок термодинамічної реакції термічного розкладання гексакарбонілу хрому вправо і впливає на перебіг процесу. Встановлено, що тиск вакууму до 1000 Па зміщує напрямок реакції у бік утворення хрому та оксиду вуглецю (II) та знижує теплопровідність парової фази гексакарбонілу хрому. При цьому десорбція молекул монооксиду вуглецю не здійснюється незалежно від температурного режиму, встановленого в реакційній камері CVD-установки. Тиск вакууму від 1000 до 0,1 Па дозволяє проводити осадження карбідохромового покриття на нагрітих поверхнях підкладки. З підвищенням ступеня розрідженості в цьому інтервалі тисків знижується температура металізації, покриття формується з меншою кількістю домішок вуглецю і оксидів хрому. Тиск вакууму 0,1...0,001 Па знижує кількість домішок у покритті та швидкість формування покриття. Нижчий тиск вакууму порушує адсорбційно-десорбційний механізм утворення карбіду хрому, і осадження зносостійкого покриття на сталевих деталях не здійснюється [21].

Виходячи з першого закону термодинаміки, значення внутрішньої енергії, залежать від температури і тиску, встановлених у термодинамічній системі:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \quad (2.2)$$

У закритій термодинамічній системі з оборотними процесами вільну енергію можна отримати з виразів першого та другого закону термодинаміки:

$$dG = -SdT + VdP \quad (2.3)$$

При постійній температурі ($T=0$ або $dT=0$) вільна енергія Гіббса дорівнює:

$$dG = VdP \quad (2.4)$$

де $V=f(P)$ – функція зміни обсягу реакційного середовища від тиску. Отже, залежність вільної енергії Гіббса при зміні тиску ($T=\text{const}$) матиме такий вигляд:

$$dG(T, P) = dG(T) + \int_{P_c}^{P_{\text{изм}}} V dP \quad (2.5)$$

де $dG(T)$ - вільна енергія Гіббса при тиску, що встановився, кДж;

P_c і $P_{\text{изм}}$ – зміна тиску від стандартних значень до встановленого, відповідно:
 $P_c \neq P_{\text{изм}}$, Па;

V - Обсяг реакційного середовища рівномірно заповнений в реакційній камері, м³.

Відповідно до рівняння ідеального газу $PV=RT$ або $V=RT/P$ інтеграл функції:

$$\int_{P_c}^{P_{\text{изм}}} V dP = RT \int_{P_c}^{P_{\text{изм}}} \frac{dP}{P} = RT \ln \frac{P_{\text{изм}}}{P_c} = RT \ln \tilde{P}$$

$$dG(T, P) = dG(T) + RT \ln \tilde{P} \quad (2.6)$$

де $\tilde{P}$ – нормований тиск газової суміші, Па;

R – універсальна газова стала $R=8,314$ кДж/кмоль·К.

Визначити вплив тиску вакууму на ентропію можна з вираження енергії Гіббса при тиску $P_c=P_{\text{изм}}$:

$$dG(T, P) = \Delta H(T) - T \Delta S(T, P)$$

$$S(T, P) = \frac{1}{T} [\Delta H(T) - dG(T, P)] \quad (2.7)$$

При тиску $P \neq P_{\text{ізм}}$ отримаємо: $dG(T,P) = \Delta H(T) - T\Delta S(T) + RT \ln \tilde{P}$ (2.8)

Температура термодинамічних реакцій внаслідок впливу тиску вакууму визначатиметься виразом:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0 - R \ln \tilde{P}} \quad (2.9)$$

Похибка у зміні температури проходження хімічної реакції в умовах вакууму при розгляді теорій наближень визначається:

$$T = \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0} - \frac{\Delta H_{298}^0}{\Delta S_{298}^0 - R \ln \tilde{P}} \quad (2.10)$$

Збільшення тиску вакууму призводить до зниження температури протікання хімічних реакцій шляхом збільшення ентропії речовин, що дозволяє витратити на здійснення термодинамічних реакцій меншу кількість теплової енергії.

2.2. Товщини карбідохромового покриття, що забезпечує відновлення розпилювачів.

До відновлення розпилювачів форсунок придатні до 90% ремфонду, а решта 10% вибраковуюються через неможливість відновлення, знос прямої розпилювача - 70 мкм, запірного конуса - 20 мкм, а отворів, що розпилюють, - 78 мкм (рис. 2.1).

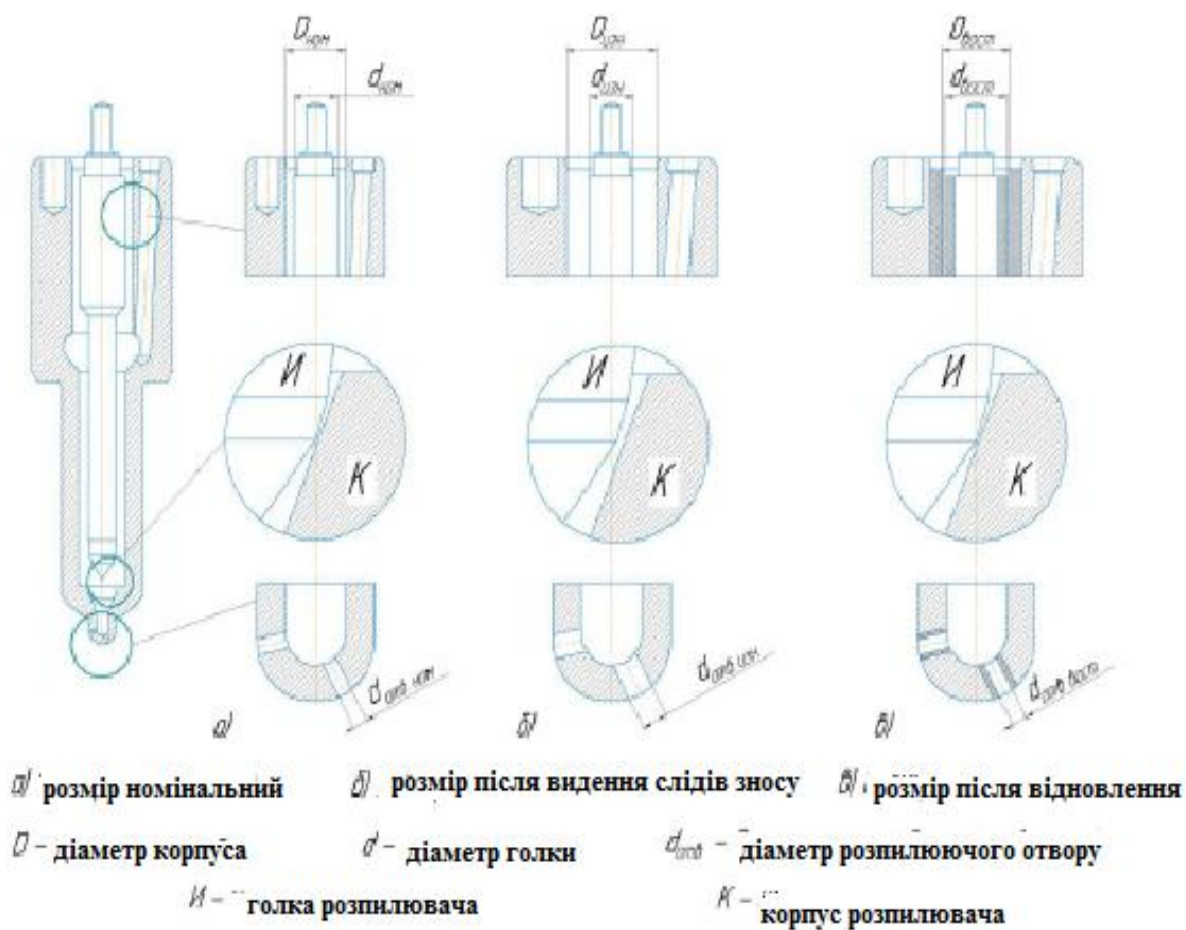


Рис. 2.1. Схема геометричних розмірів деталей розпилювача форсунки: а - розпилювач серійний; б - розпилювач зношений; в – розпилювач відновлений.

При відновленні напрямної розпилювача форсунки необхідно забезпечити зазор між голкою і корпусом розпилювача 2...4 мкм, несучу здатність системи «деталь-покриття», високу зчеплюваність і рівномірну товщину покриття. та точення або шліфування для голки розпилювача верстатами з подальшим поліруванням та очищенням поверхонь. Недоліком механічної обробки є нерівномірність виведення слідів зносу, в результаті якої на оброблюваній поверхні деталі утворюються дефекти у вигляді овальності, циліндричності і корсетності. Для забезпечення достатнього рівня зчеплюваності покриття з підкладкою і економічної доцільності технологічного процесу відновлення розпилювача форсунки чистота його робочих поверхонь перед осадженням зміцнюючого покриття повинна відповідати шорсткості $Ra \ 0,2 \text{ мкм}$, що можливо отримати після механічної обробки з поліруванням. які можуть бути центрами напруг і призводити до руйнування покриття при контактному навантаженні. Для

забезпечення та збільшення можливості комплектації розпилювачів зміцненими деталями з виключенням повторного осадження товщина покриття повинна дозволяти здійснювати перешліфування деталей у ремонтні групи, що вимагає додатковий припуск не менше 5 мкм на діаметр. Для відновлення напрямної розпилювача форсунки необхідна товщина карбідохромового покриття на діаметр однієї деталі визначатиметься рівнянням:

$$h_{\text{п}} = h_{\text{деталі}} \quad (2.11)$$

де $h_{\text{деталі}}$ – товщина карбідохромового покриття, мм.

На напрямних поверхнях голки та корпусу розпилювача необхідно наносити покриття однакової товщини: $h = h_{\text{голка}} = h_{\text{корпус}} = 12h_{\text{заг}}$ (2.12)

де $h_{\text{голка}}$ та $h_{\text{корпус}}$ – товщина покриття, відповідно на голці та корпусі в напрямній частині розпилювача, мм;

$h_{\text{заг}}$ – сукупна товщина покриття в напрямній частині розпилювача, мм.

Для визначення товщини карбідохромового покриття на кожну деталь розпилювача, що забезпечує відновлення:

$$h = \frac{(D_{\text{н.к}} - d_{\text{н.к}}) + (d_{\text{н.к}} - D_{\text{н.к}})}{2} + P_{\text{м}} + P_{\text{п.п}} + P_{\text{п.ш}} - P_{\text{д}} - \frac{1}{2}D + \sum RZ_{\text{ід}} + \sum RZ_{\text{іп}} \quad (2.13)$$

де $D_{\text{н.і}}$, $D_{\text{н.к}}$ – номінальний діаметр голки та корпусу розпилювача, мм;

$d_{\text{н.і}}$, $d_{\text{н.к}}$ – діаметр після виведення слідів зносу у голки та корпусу розпилювача, мм;

$P_{\text{м}}$ – припуск на механічну обробку, мм;

$P_{\text{п.п}}$ – припуск на полірування під час підготовки поверхні до осадження покриття, мм;

$P_{\text{п.ш}}$ – запас на припуск для перешліфування до інших ремонтних груп, мм;

$P_{\text{д}}$ – припуск на доведення при комплектуванні, мм;

D – конструкторський допуск, зазор між голкою та корпусом розпилювача, мм;

$\sum RZ_{\text{ід}}$ – висота мікронерівностей, отриманих при підготовці сталевій поверхні до осадження покриття, мм;

$\sum RZ_{\text{іп}}$ – висота мікронерівностей на отриманому покритті, мм.

При виготовленні нових деталей оптимальна товщина карбідохромового покриття на напрямній розпилювача повинна бути:

$$h_{\text{оптсерійні}} = h_{\text{кр}} + \sum R z_{\text{ід}} + \sum R z_{\text{іп}} \quad (2.14)$$

Нанесення зносостійкого шару на замикаючий конус нераціонально, так як карбіди хрому крихкі і можуть призвести до розтріскування покриття через характер роботи розпилювача. Тому замикаючі конуса голки та корпуси розпилювача шліфуються та притираються. Відновлення отворів, що розпилюють, за допомогою зачеканки зношених і розсвердлюванням рядом нових неможливо, так як є велика ймовірність відриву носика розпилювача при експлуатації. Тому отвори, що розпилюють, як і напрямна розпилювача, підлягають до виведення слідів зносу з подальшим осадженням на них зміцнюючого покриття. Товщина карбідохромового покриття в отворах, що розпиляють, буде визначатися наступним рівнянням:

$$h_{\mu f} = \frac{(d_{\text{изн}} - d_{\text{ном}})}{2} + P_{\text{м}} + P_{\text{п.п}} + \sum R z_{\text{ід}} + \sum R z_{\text{іп}} \quad (2.15)$$

де $d_{\text{изн}}$, $d_{\text{ном}}$ – діаметр розпилювальних отворів відповідно зношений та номінальний, мм.

Для відновлення працездатності розпилювача форсунки у напрямній частині товщина карбідохромового покриття на одну деталь повинна бути:

$$\begin{aligned} h_{\text{игла}} &= \frac{(D_{\text{изн}} - d_{\text{н.н}}) + (d_{\text{изн}} - D_{\text{изн}})}{2} + P_{\text{м}} + P_{\text{п.п}} + P_{\text{пш}} - P_{\text{д}} - \frac{1}{2} D + \sum R z_{\text{ід}} + \sum R z_{\text{іп}} = \\ &= \frac{(5,996 - 5,961) + (6,035 - 6,0)}{2} + 0,05 + 0,0005 + 0,005 - 0,001 - 0,5 \cdot 0,003 + \\ &\quad 0,0002 + 0,00005 = 0,09125 \text{ мм} = 91,25 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Отже, для відновлення геометричних розмірів голки та корпусу розпилювача в напрямній необхідно збільшення їх діаметральних розмірів на 91,25 мкм, а на радіус 45,625 мкм. У разі зміцнення серійних деталей при мікротвердості покриття 16,8 ГПа та діаметрі абразивної частки корунду 3 мкм оптимальна товщина дорівнюватиме:

$$h_{\text{мінсерійні}} = h_{\text{кр}} + \sum R z_{\text{ід}} + \sum R z_{\text{іп}} = 0,000082 + 0,0002 + 0,00005 = 0,000332 \text{ мм} = 0,332 \text{ мкм}.$$

На відновлення розпилювальних отворів збільшення товщини покриття на радіус має бути:

$$h_{\mu f} = \frac{(d_{\text{визн}} - d_{\text{ном}})}{2} + P_{\text{м}} + P_{\text{п.п}} + \sum R_{z_{i_{\text{д}}}} + \sum R_{z_{i_{\text{п}}}} = \frac{(0,418 - 0,34)}{2} + 0,1 + 0,0002 + 0,0002 + 0,00005 = 0,13945 \text{ мм} = 139,45 \text{ мкм.} \quad (2.17)$$

Отже, для відновлення геометричних розмірів отворів корпусу розпилювача необхідно осаджувати покриття товщиною 139,45 мкм. Для відновлення ремфонду розпилювачів форсунок, необхідно забезпечити одночасне і рівномірне зростання товщини карбидохромового покриття в напрямній розпилювача 45,625 мкм, а в отворах, що розпилюють, 139,45 мкм, що можливо забезпечити технологічним режимом роботи CVD- установки.

3.ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

3.1. Технологічне оснащення процесу нанесення покриттів методом хімічної металізації.

Відома велика кількість зарубіжних CVD-установок по нанесенню зносостійких покриттів на сталеві деталі: Easy Tube (США), SAMCO (Японія). Для отримання карбидохромового покриття на голках розпилювачів використовують CVD-установку , принципова схема якої представлено рис 3.1.

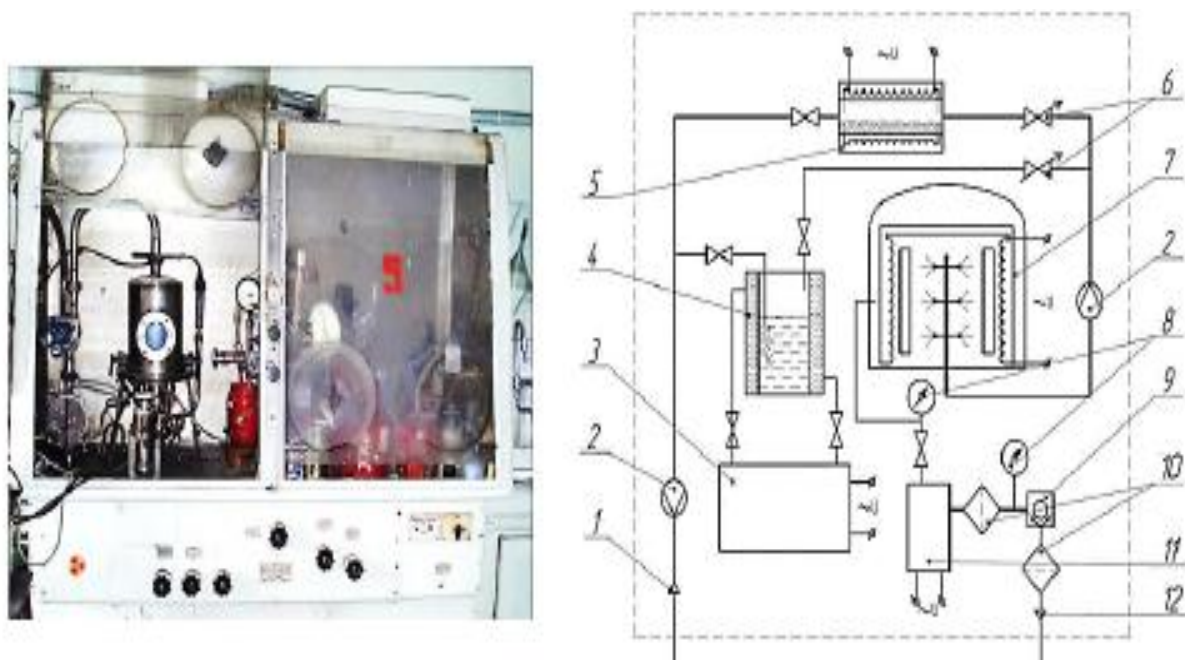


Рис. 3.1. Схема установки нанесения покриттів CVD-методом МОС на зовнішні поверхні деталей машин:

1 - підведення інертного газу; 2 – витратомір; 3 – термостат; 4 – змішувач; 5 – субліматор; 6 – клапан регулювальний; 7 – реакційна камера; 8 – вакуумметр; 9 – вакуум-насос; 10 - фільтруючий елемент; 11 - піч дорозкладання; 12 – випуск очищеного газу атмосфери.

Нанесення карбидохромових покриттів на голки розпилювачів здійснюється за допомогою обертального способу. Перемішування пари металорганічних сполук

МОС всередині реактора при даному способі забезпечує рівномірне нанесення покриття. Зародки карбідів хрому утворюються в зоні контакту з нагрітою деталлю при температурі, що забезпечує проведення хімічної реакції. Співвідношення діаметра отвору до довжини прямої поверхні корпусу 1:5. Установка працює в такий спосіб. У субліматор 1 завантажується порошковий реактив гексакарбонілу хрому $\text{Cr}(\text{CO})_6$, відкриваються вентилі 2 витратомірів 3, відкривається кран 6, що йде з реактора, призначений для прискореного створення тиску вакууму в реакторі і підтримки його при осадженні покриття шляхом регулювання дроселя, 1 перекриває трубопровід. подається струм для нагрівання індуктора 5 та корпусу розпилювача 12 до температур, встановлених CVD-методом. Закривається кран 2 субліматора 1. Вмикається субліматор 1, який нагріває реактив до необхідної температури встановленого режиму та парціального тиску пари. Відкривається кран 2 субліматора 1. Пари гексакарбонілу хрому (МОС) трубопроводом підводяться в реакційну камеру 4 через расходомер 3. У місці зіткнення парів з нагрітою поверхнею металу корпусу розпилювача 12 утворюється покриття, що складається з карбідів хрому. Побічним продуктом хімічної реакції розкладання МОС є чадний газ, який видаляється з реакційної камери 4 за допомогою вакуумного насоса 13 через витратомір 3, піч дорозкладання 7, в якій окислюється до CO_2 і проходячи через охолоджувач 8 і фільтр 9, викидається в атмосферу. Запрограмована контрольно-вимірювальна станція 13 здійснює контроль за нагріванням індуктора і парів карбонілу, тиском вакууму в CVD-установці і парів в субліматорі, подачею карбонілу в реакційну камеру і відведенням продуктів розкладання з протяжкою реакційного середовища через отвори розпилювача

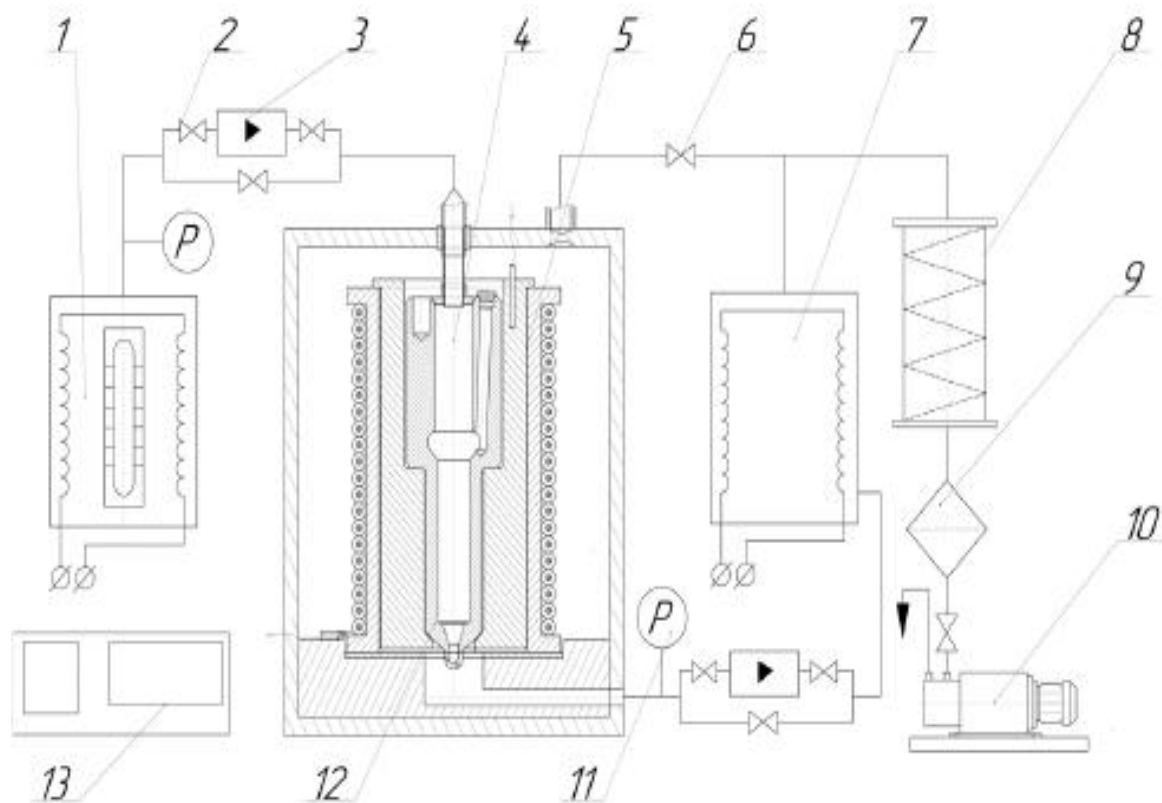


Рис. 3.2. CVD-установка для формування зносостійкого покриття карбіду хрому на внутрішній поверхні корпусу розпилювача форсунки: 1 – субліматор; 2 – кран (вентиль); 3 – витратомір; 4 – реакційна камера; 5 – індуктор; 6 – кран; 7 – піч дорозкладання; 8 – охолоджувач; 9 – фільтр; 10 – вакуумний насос; 11 – датчик

На рис. 3.3. представлена конструкція реактора CVD-установки, що дозволяє відновлювати внутрішні поверхні корпусу розпилювача форсунки автотракторного дизеля, а також аналогічні деталі, наприклад, плунжера втулка ПНВТ при заміні опори 9 в індукторі 5 реактора 1.

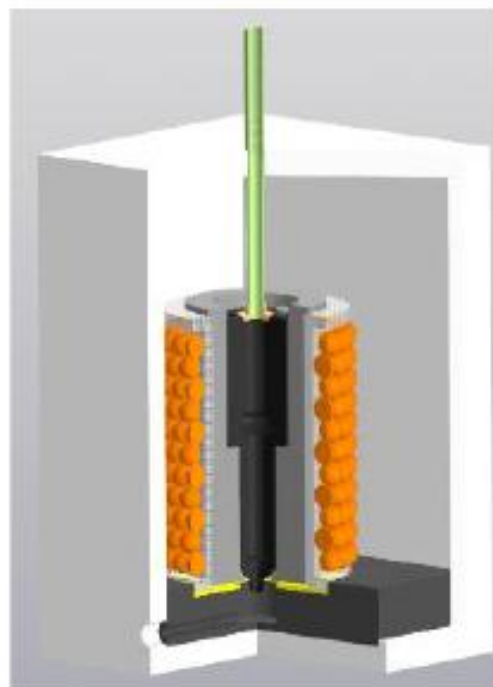
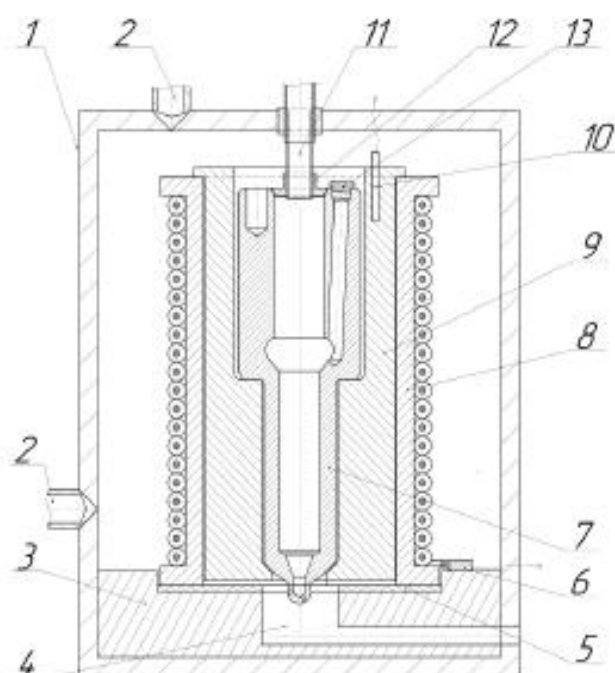


Рис. 3.3. Реактор відновлення внутрішньої поверхні корпусу розпилювача форсунки (а – кінематична схема, б – 3D модель) : 1 – реактор; 2 – муфта; 3 – монтажний стіл; 4 – газовідведення; 5 – пластина; 6 – клемма; 7 – корпус розпилювача; 8 – нагрівач; 9 – опора; 10 – термопара; 11 - трубка телескопічна; 12 - втулка центруюча; 13 – заглушка.

Реактор 1 має форму прямокутного паралелепіпеда та обладнаний муфтами 2, призначеними для подачі та відкачування інертного газу. У реактор 1 встановлюється монтажний стіл 3, в якому міститься газовідведення 4, що служить для видалення продуктів розкладання хімічної реакції із зони осадження покриття. У монтажному столі 3 передбачена установка майданчик під індуктор з встановлюваної в неї пластиною 5, яка призначається для зниження передачі тепла від нагрівача 8 до монтажного столу 3. Індуктор складається з нагрівача 8, опори 9 і термопари 10 і в нього встановлюється деталь 7. Нагрівач 8 керамічні наміста. Опора 9 встановлюється в нагрівач 8. Для забезпечення рівномірного нагріву та фіксації деталі 7 в індукторі форма опори 9 повинна дублювати контур деталі 7. Опора 9 швидкознімна. У разі відновлення різномісних внутрішніх поверхонь можна змінювати форму шляхом виготовлення аналогічної опори 9, але з внутрішньою формою, що повторює зовнішню форму деталі, що відновлюється 7. В опорі 9 встановлюється термопара 10, що визначає

температуру нагріву відновлюваної деталі 7. Підключення нагрівача 8 до електроланцюга здійснюється через швидкороз'ємну жаростійку клему 6, що монтується на монтажному столі 3, що дозволяє оперативно встановити та підключити індуктор. До корпусу розпилювача 7 підводиться телескопічна трубка 11, за якою в процесі формування зносостійкого покриття транспортуються пари металоорганічних сполук. Телескопічна трубка 11 виконана з жаростійкого полімеру, centruється з деталлю 7 через перехідну втулку 12, забезпечуючи щільність прилягання втулки 12 до деталі 7, що відновлюється, що визначає рівномірність подачі потоку парів МОС на внутрішню відновлювану поверхню. Заглушка 13 встановлюється паливопровід корпусу розпилювача і виконує функцію захисту від нераціонального використання реактиву. У режимі індуктор нагрівається. Нагрівач 8 і опора 9 за рахунок коефіцієнта теплового розширення металів збільшуються в розмірах, забезпечуючи щільну посадку між собою і корпусом розпилювача 7 в індукторі, а індуктор жорстко фіксується в установчому майданчику монтажного столу 3. Завдяки цьому в реакторі 1 можливо забезпечити формування зносостійкого покриття реактиву.

На рис. 3.4. представлена технологічна схема роботи CVD-установки з контрольними параметрами для нанесення зносостійкого та зміцнюючого покриття на сталеві деталі. [



Рис. 3.4. Схема технологічного процесу формування зносостійкого покриття деталей.

Якісні характеристики карбідохромового покриття залежать від технологічного режиму металізації, що включає термодинамічні умови, подачу реакційного середовища та швидкість осадження. Фізико-механічні властивості визначаються адгезією та необхідними властивостями самого покриття. У свою чергу якісні та фізико-механічні властивості визначаються параметрами установки. Швидкість осадження та якість покриття залежать від конструкції реактора CVD-установки та технологічного режиму (тиск вакууму, температури підкладки та реакційного середовища, а також її подачі) [28, 32]. Різниця тисків вакууму в субліматорі та реакторі, як зазначалося вище, забезпечує спрямований рух реакційного середовища. В цілях видалення молекул, що залишилися, повітря з системи CVD-установки і при додаванні до пар карбоніла добавок у вигляді попутних газів в конструкції реактора передбачена можливість для підведення і відведення в першому випадку інертного газу, а в другому газу розріджувача, який дозволяє прискорювати зростання покриття і знижувати температуру термодинамічних реакцій. Індуктор забезпечує посилений теплообмін між підкладкою та нагрівачем, що зменшує коливання температури та, як наслідок, дозволяє отримати рівномірну горизонтальну структуру покриття при

низькотемпературному осадженні 123...191°C Гексакарбоніл хрому в нормальних умовах - це білий кристалічний порошок, молекулярна маса якого складає 220,06 г/моль, температура початку сублімації 30 ° С (303 К), щільність при 20 ° С - 1,77 г/см³, молярна теплоємність 240 Дж/(моль х). Підвищення температури гексакарбонілу хрому на кожні 10С при сублімації призводить до збільшення парціального тиску його пари, що визначається функцією натурального логарифму. При нагріванні Cr(CO)₆ сублімується газ, минаючи стадію рідини, і формує реакційне середовище. Реакційне середовище при контакті із нагрітою сталевую підкладкою утворює металеве покриття, склад якого залежить від температурного режиму підкладки. Механізм формування покриття здійснюється в такий спосіб. Карбонільна молекула, що надходить з газової фази, отримує від гарячої поверхні деталі механічний імпульс. Отримана енергія розподіляється з поступальних на коливальні ступені свободи молекули, що призводить до елімінування нейтральних СО-лігандів. Атом металу, що звільняється при цьому, осаджується на поверхню підкладки, як ад-атом, що рухається до попадання на відповідне вакантне місце в кристалічній решітці покриття, що будується. Відбувається формування зародків, у тому числі, залежно від температурного режиму підкладки, нарощується твердофазний шар металу чи карбіду. [19, 28].

3.2. Дослідження залишкової напруги, мікротвердості карбідохромового покриття

Значення залишкових напруг у карбідохромовому покритті на дослідних зразках, виконаних із сталі 20Х, визначали за допомогою вимірювання їх прогину до осадження на них зносостійкого шару та після. Температура низької відпустки стали зразків 180? Зразками були чотири пластини з лінійними розмірами 90 × 4 мм і товщиною 1 мм (рисунок 3.7).

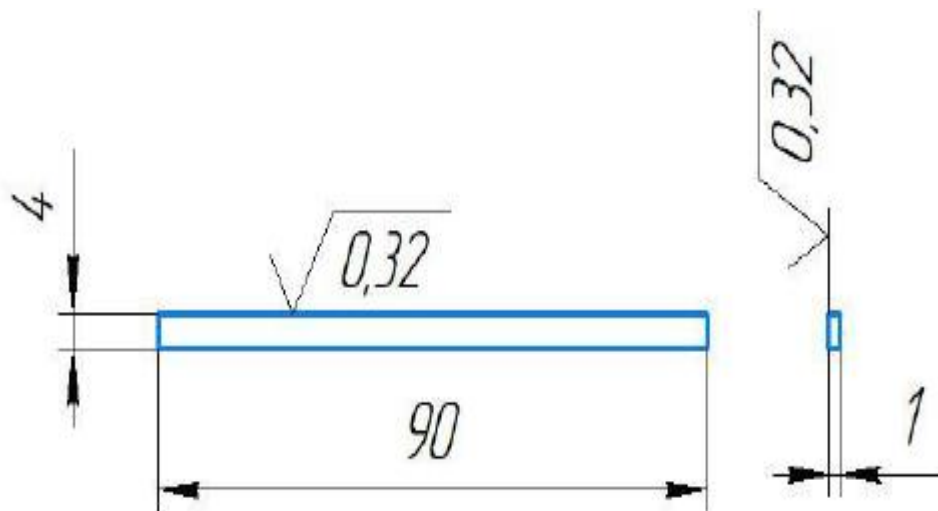


Рис. 3.5. Зразок визначення залишкових напруг.

Перед визначенням залишкової напруги в покритті зразок готували до осадження на нього карбіду хрому шляхом завдання поверхні зразка шорсткості не нижче Ra 0,2. Для монтажу зразка у випробувальний стенд та отримання достовірних з нього даних краю пластини-зразка закривали фторопластовими накладками для запобігання осадженню на них покриття. Після цього на одну площину зразків осаджувалося карбідохромове покриття з товщиною шару 50, 75, 100 та 200 мкм. Далі проводилися виміри стріли прогину індикатором годинного типу з ціною розподілу 0,01 мм, встановленого вимірювальну скобу.

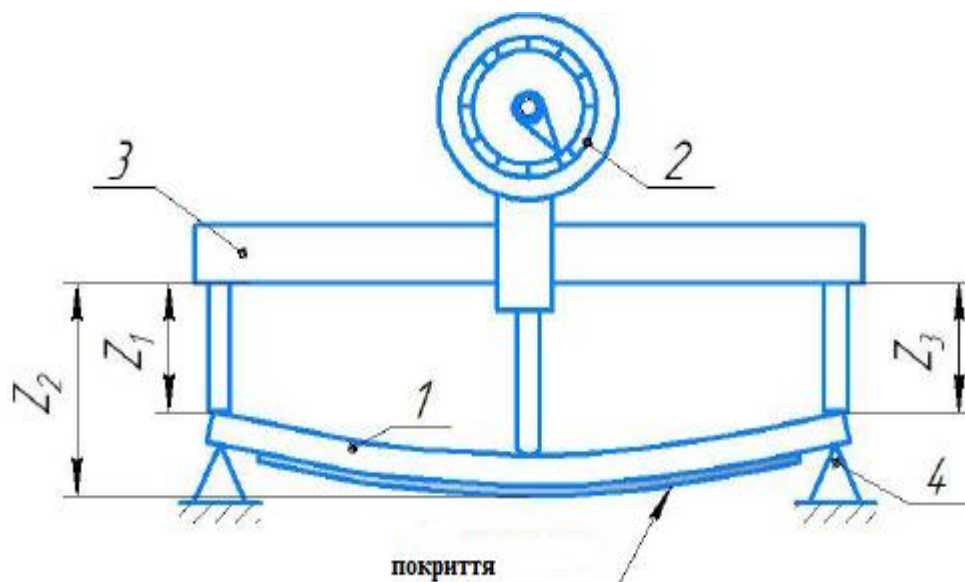


Рис. 3.6. Схема виконання вимірів стріли прогину: 1- зразок; 2 – індикатор годинного типу; 3 – вимірювальна скоба; 4 – опори.

У процесі вимірювань визначали прогин пластини за різницею базуючих розмірів наступної залежності:

$$f=(Z1+Z3)/2-Z2 \quad (3.1)$$

Обчислення середнього значення залишкової напруги в покритті проводили за наступним рівнянням :

$$Q_{cp}=4E(h+h_{п})s \cdot f / 3l2hh_{п} \quad (3.2)$$

де E – наведений модуль пружності покриття сталі, Н/мм²;

l - Довжина покривається частини зразка, $l = 82$ мм;

h - товщина пластини зразка, мм;

$h_{п}$ – товщина осадженого покриття, мм. Значення величини залишкової напруги в покриттях на кожному зразку визначалося як середнє значення при трьох вимірах прогину.

Дослідження мікротвердості покриття отриманого при тиску вакууму 0,025Па, температурі підкладки 161°C, швидкості подачі реакційного середовища 1,0 л/год. Глибина відбитка індентера при навантаженні 1Н (рис 3.7) на підкладці 9,3 мкм, а на карбидохромовому покритті 5,6 мкм. Мікротвердість отриманого карбидохромового покриття на поверхні сталі 12Х2Н4А становить 18,96 ГПа, що вище значень мікротвердості серійних деталей розпилювача форсунки на 11,1 ... 11,6 ГПа або в 2,42 ... 2,58 рази і вище мінімальної, встановленого теоретично.

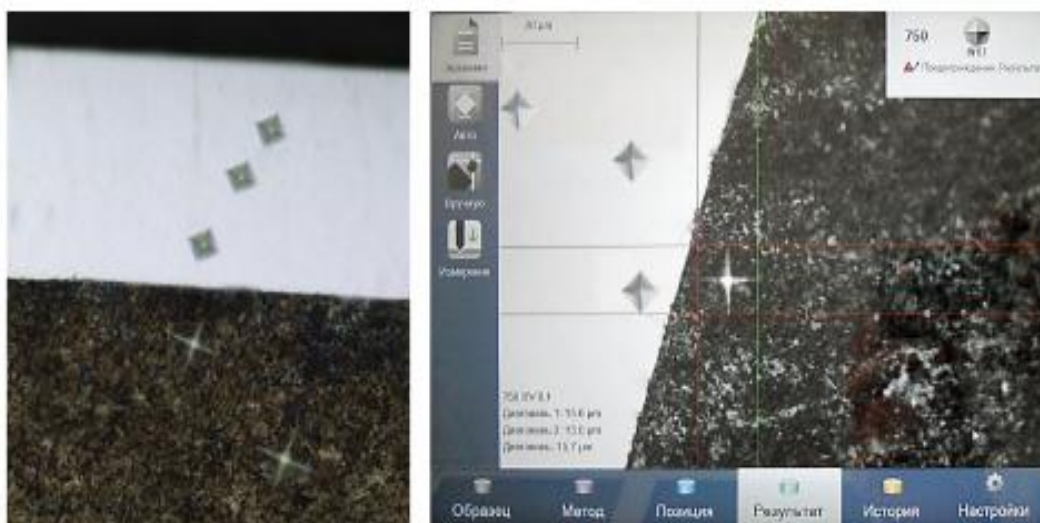


Рис. 3.7. Визначення мікротвердості карбідохромового покриття та підкладки при навантаженні 1Н після парофазної металізації при тиску вакууму 0,025Па, швидкості подачі реакційного середовища 1,0 л/год температур підкладки 161°C.

Корпус та голка розпилювача форсунки після виведення слідів зносу підлягали відновленню геометричних розмірів карбідохромовим покриттям.

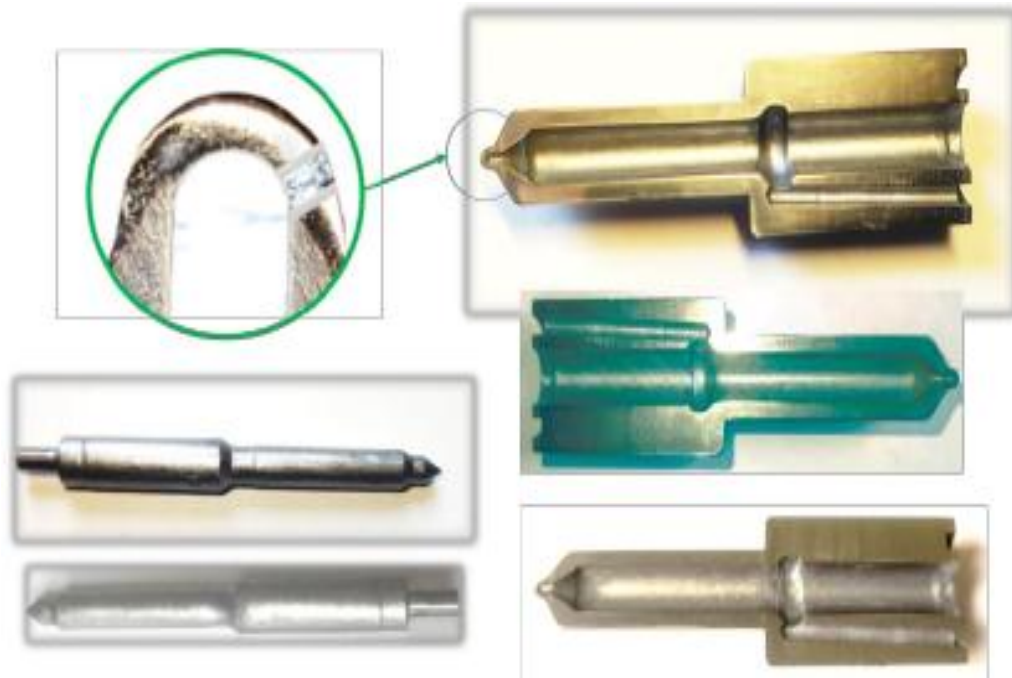


Рис. 3.8. Зовнішній вигляд відновлених деталей розпилювача форсунки.

Шорсткість поверхні Ra0,05. При цьому мікротвердість покриття рівномірна по всій товщині і довжині.

3.3. Властивості осаджених покриттів.

Проведені дослідження оптимальної швидкості подачі реакційного середовища в зону ведення металізації (рис. 3.9) та коефіцієнта використання реактиву (рис.3.10) в умовах тиску вакууму 0,01 Па при температурах підкладки 150, 175 і 195°C.

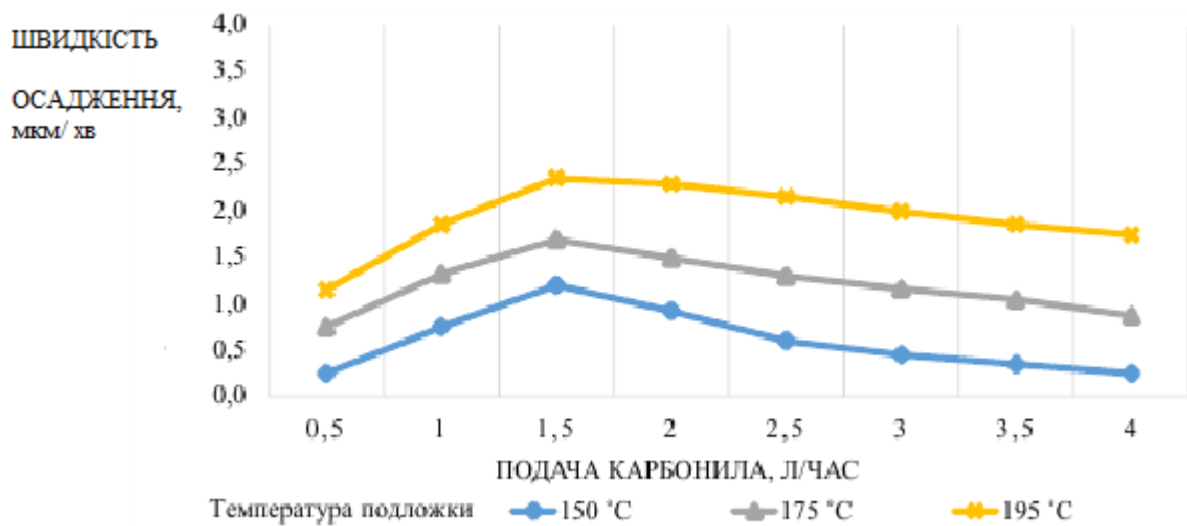


Рис. 3.9. Залежність подачі парів гексакарбонілу хрому від швидкості зростання покриття.

Встановлено оптимальну швидкість подачі реактиву в реакційну камеру 1,5 л/год. Осадження карбідохромового покриття при швидкості подачі реактиву понад оптимальну неефективно, оскільки знижується швидкість росту покриття і збільшується витрата гексакарбонілу хрому через низьку енергію ізобарно-ізотермічного потенціалу та ендотермічність хімічної реакції терморозпаду. Крім того, зі збільшенням подачі у покритті формується велика кількість домішок, які впливають на фізико-механічні властивості.

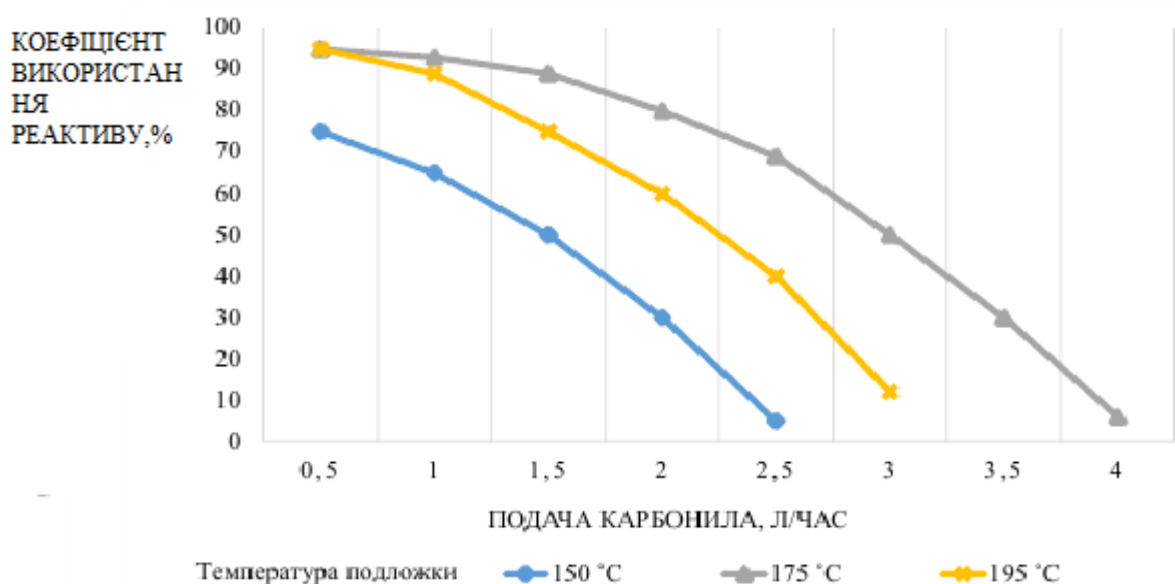


Рис. 3.10. Вплив подачі парів гексакарбонілу хрому використання реактиву.

Встановлено вплив тиску вакууму на швидкість осадження карбідохромового покриття в залежності від температурного режиму підкладки у вільному стані, що утворилися в результаті зниження інтенсивності терморозпаду гексакарбонілу хрому.

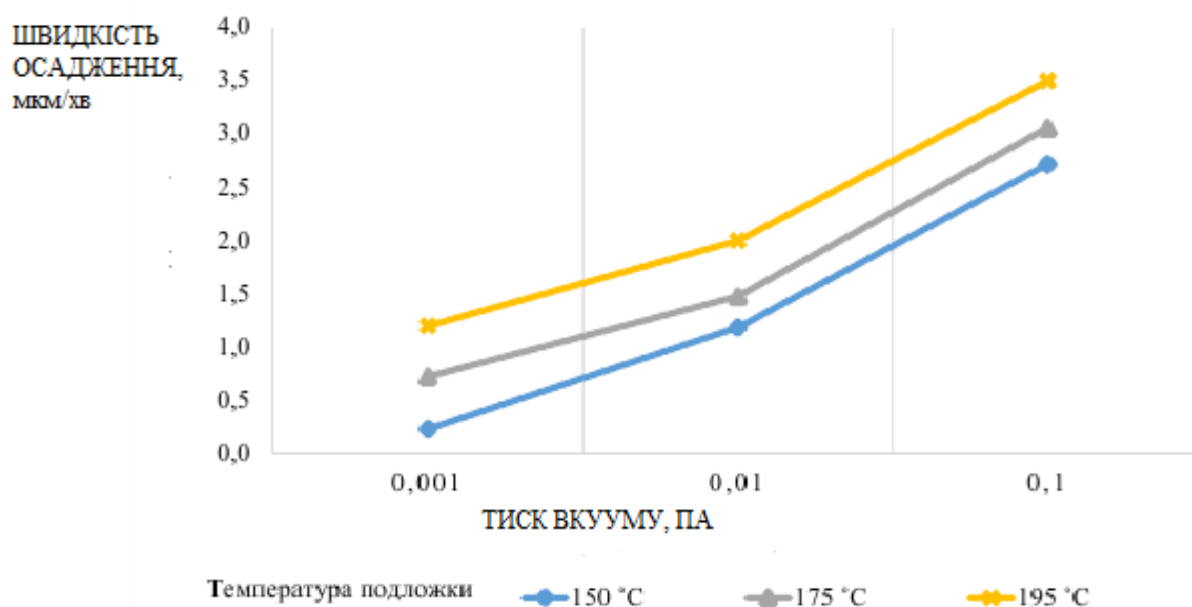


Рис. 3.11. Вплив тиску вакууму на швидкість осадження покриття при температурі підкладки 150, 175 та 195 °C при швидкості подачі пари 1,5 л/година.

Проведено дослідження щодо впливу тиску вакууму на мікротвердість карбідохромового покриття, отриманого при низькотемпературному осадженні (рис. 3.12). Встановлено залежність зростання мікротвердості покриття зі збільшенням тиску вакууму та зменшення температури підкладки в реакторі. Осадження покриттів за умов низького тиску вакууму дозволяє отримувати мікротвердість поверхні деталей до 19,4 ГПа. Товщина покриття рівномірна по всій глибині та довжині. Вміст у покритті домішок у вигляді включень оксиду хрому погіршують його мікротвердість.

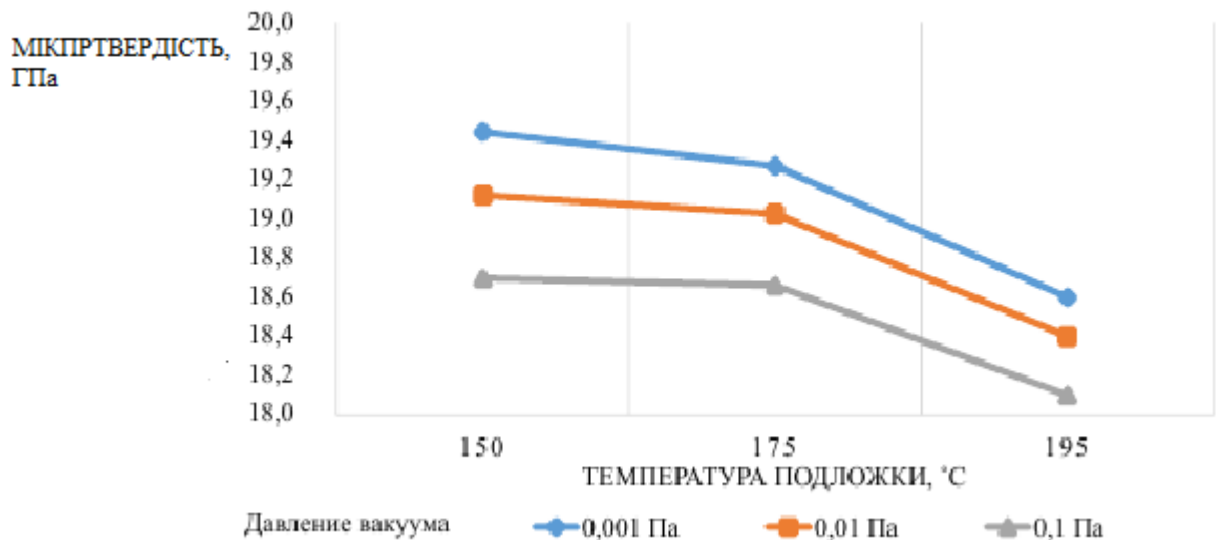


Рис. 3.12. Вплив тиску вакууму на мікротвердість карбідохромового покриття при температурах підкладки 150, 175 і 195С і МОС 60С при швидкості подачі реакційного середовища 1,5 л/год.

Температурний режим при відновленні деталей розпилювачів форсунок не призводить до зміни структури сталей. Зі збільшенням ступеня вакууму знижується швидкість зростання покриття, що дозволяє отримувати його більш вільним від домішок. Температурний режим підкладки впливає на інтенсивність розкладання парів гексакарбонілу хрому та швидкість зростання покриття. Подача реакційного середовища впливає на швидкість зростання покриття і витрата реактиву.

3.4. Залишкові напруження, зносостійкість покриттів.

Досліджено вплив температури ведення металізації та товщини карбідохромового покриття на величину залишкової напруги (рис. 3.13).

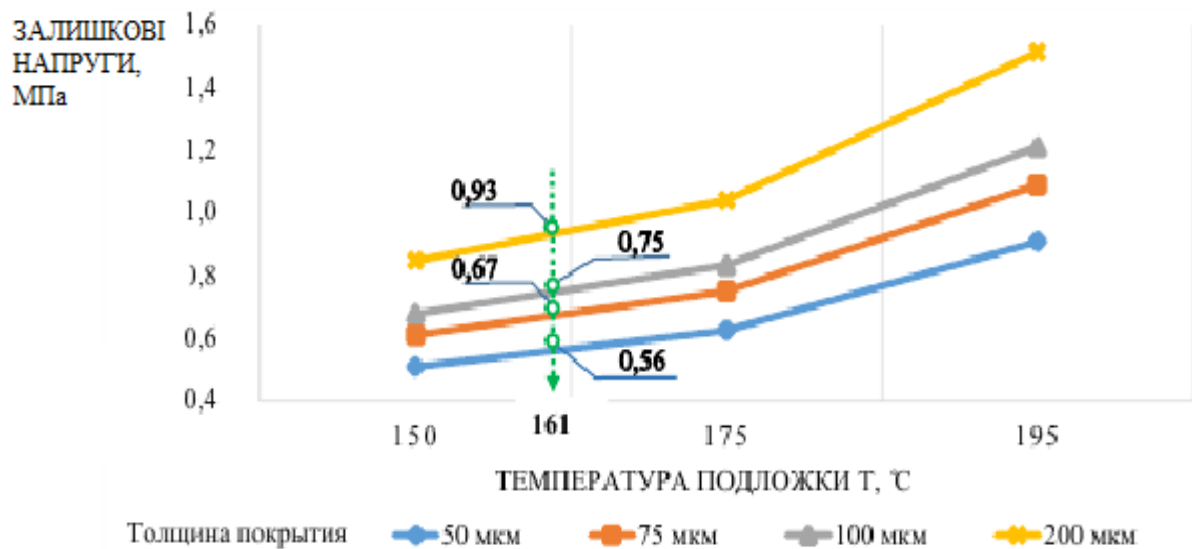


Рис. 3.13. Вплив температури підкладки на залишкові напруги в карбідохромових покриттях різної товщини, отриманих при тиску вакууму 0,025Па, швидкості подачі реакційного середовища 1,0 л/годину, температурі підкладки 161 °С та пари гексакарбонілу хрому 60 °С.

Ведення металізації при постійному тиску вакууму зі зниженням температури підкладки призводить до зниження вмісту в покритті залишкових напруг. Основна причина - це зниження напруг стиснення, що виникають в результаті температурного розширення сталі. Однак із збільшенням товщини карбідохромового покриття збільшуються залишкові напруги у його структурі. Це пов'язано з накопиченням у ньому домішок, що входять до складу покриття та утворюються в результаті термодинамічних реакцій, що супроводжуються утворенням хрому карбіду на поверхні підкладки. Запропонований оптимальний режим нанесення карбідохромового покриття CVD-методом дозволяє зменшити залишкову напругу в 2,7 ... 4,8 рази в порівнянні з раніше дослідженими. При товщині покриття 50 мкм залишкові напруги дорівнюють 0,56 МПа, при 100 мкм - 0,75 МПа.

Характеристика покриттів за міцністю зчеплень порівнюється із міцностями основного матеріалу на розрив. Адгезія карбідохромового покриття при товщині 100 мкм склала 34 МПа, отриманого в режимі: тиск вакууму

0,025Па, швидкість подачі реакційного середовища 1,0 л/годину, температури підкладки 161 °С та парів гексакарбонілу хрому 60 °С. На рис. 3.14 наведено порівняльний аналіз значень адгезії при електролітичному, хімічному та дифузійному хромуванні.



Рис. 3.14. Порівняльна оцінка адгезії хромових покриттів за різних способів відновлення поверхонь.

Карбідохромові покриття, отримані CVD-способом, мають більшу зчеплюваність з підкладкою в порівнянні з електролітичним хромуванням більш ніж в 2,3 рази і менше в 9,1 рази при дифузійному хромування. Однак, при формуванні нікелевого адгезійного підшару, зчеплення карбідохромового покриття з підкладкою збільшується в 2,2 рази. Поряд з цим адгезійний зв'язок покриття з підкладкою сприяє зниженню інтенсивності корозійного процесу, ступінь якої залежить від агресивності середовища та якості покриття.

До випробувань підлягали чотири види зразків типу «диск»: 1. зразок, виготовлений із сталі 12Х2Н4А ГОСТ 4543 з цементацією та загартуванням до 61...63 HRC; 2. зразок, виготовлений зі сталі Р6М5 ГОСТ 19265 з об'ємним загартуванням до 62 ... 64 HRC; 3. зразок, виготовлений із сталі

12X2H4A з нанесеним карбідохромовим покриттям товщиною 100 мкм та мікротвердістю 18,96 ГПа; 4. зразок, виготовлений із сталі Р6М5 ГОСТ 19265 з нанесеним карбідохромовим покриттям товщиною 100 мкм та мікротвердістю 19,4 ГПа. На рис. 3.15. представлені значення зносу, що пройшли випробування зразків, які оцінювалися зважування пар тертя за результатом проходження повного циклу випробувань. Величина зношування зі збільшенням мікротвердості поверхні знижується. Відносна зносостійкість зміцнених зразків до неукріплених склала 4,1 ... 5,0 рази. Інтенсивність зношування зразків із карбідохромовим покриттям нижча, ніж без нього. Зношування зразків сталей 12X2H4A і Р6М5 без зміцнюючого покриття практично однакове, так як мають порівняно рівну мікротвердість поверхонь. Після випробувань на цих поверхнях спостерігається безліч поздовжніх борозен, подряпин і вирів, утворених в результаті абразивного зношування і схоплювання.

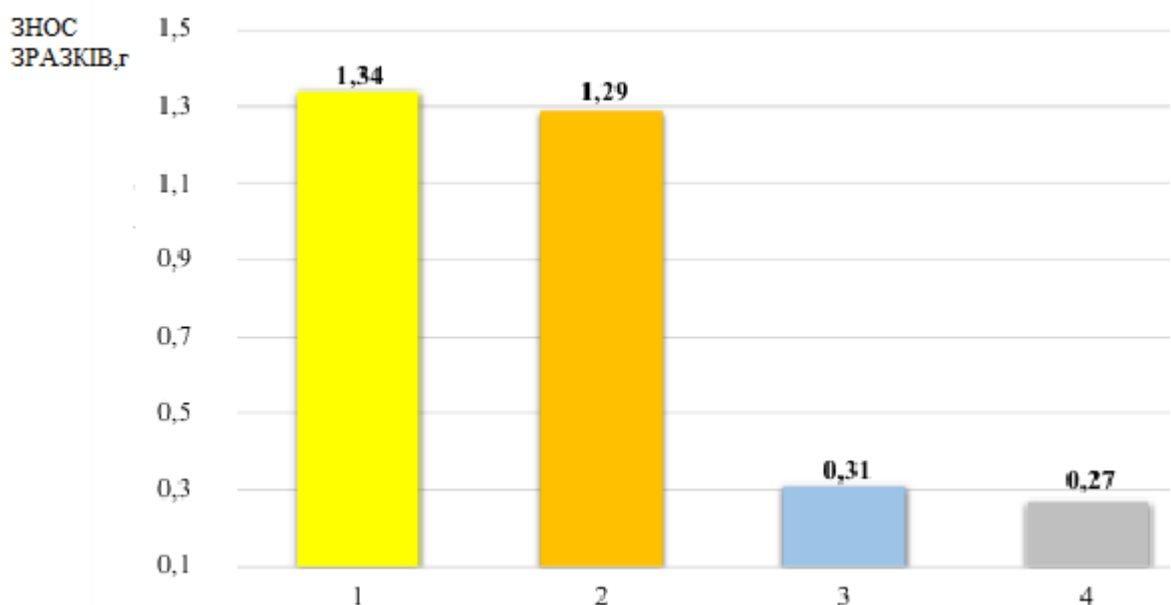


Рис. 3.15. Зношування зразків: 1 – сталь 12X2H4A з цементацією та загартуванням (61...63 HRC); 2 - сталь Р6М5 з об'ємним загартуванням (62 ... 64 HRC); 3 – сталь 12X2H4A зі зміцнюючим покриттям (18,96 ГПа); 4 – сталь Р6М5 із зміцнюючим покриттям (19,4 ГПа).

За результатом випробувань у зразків 3 і 4 немає явних відмінностей із зносу, оскільки відсутні ризики, борозни, сколи та інші дефекти. Покриття, що зміцнює, дозволило виключити пошкодження поверхонь частинками кварцу, присутніми в зоні тертя, а, отже, його можна рекомендувати для зміцнення деталей, схильних до впливу абразивних частинок кварцу. При відновленні та зміцненні деталей доцільно осаджувати на поверхнях голки та корпусу розпилювача форсунок карбідохромові покриття з мікротвердістю 18,96 ГПа, так як їх формування здійснюється при менших енергетичних витратах та з більшою продуктивністю, ніж потрібно для отримання мікротвердості 19,4 ГПа. Оптимальна мікротвердість покриття 18,96 ГПа.

3.5. Технологія відновлення розпилювачів форсунок автотракторних дизелів нанесенням зміцнюючих покриттів.

Розпилювачі дизельних форсунок як механічної паливної системи, так і Common Rail мають однакову форму, але відрізняються розмірами. Це дозволяє корелювати пропонуєму технологію на велику кількість номенклатур виробів, що серійно випускаються. Послідовність дій з організацією робіт з відновлення деталей прецизійних пар із застосуванням CVD-покриттів представлена рис. 3.16. У ремонтну організацію ремфонд розпилювачів форсунок може надходити різними шляхами, наприклад, при плановому проведенні ремонту автотракторного дизеля, передачі накопичених деталей сторонніми підприємствами та дилерами. При надходженні в ремонт вузли розбираються, миються в ультразвуковій ванні типу ПСБ-8060-05 із застосуванням робочої рідини типу Галс при температурі 50...60°C. Завантаження та вивантаження деталей, що підлягають очищенню, слід проводити при вимкненій мийній машині. Тривалість очищення залежить від продуктивності установки та ступеня забрудненості деталей і може змінюватись в межах 5...15 хвилин. Після деталі дістаються з миючого розчину, витираються чистими бавовняними серветками, укладаються в переносну тару і вирушають на дефектування.

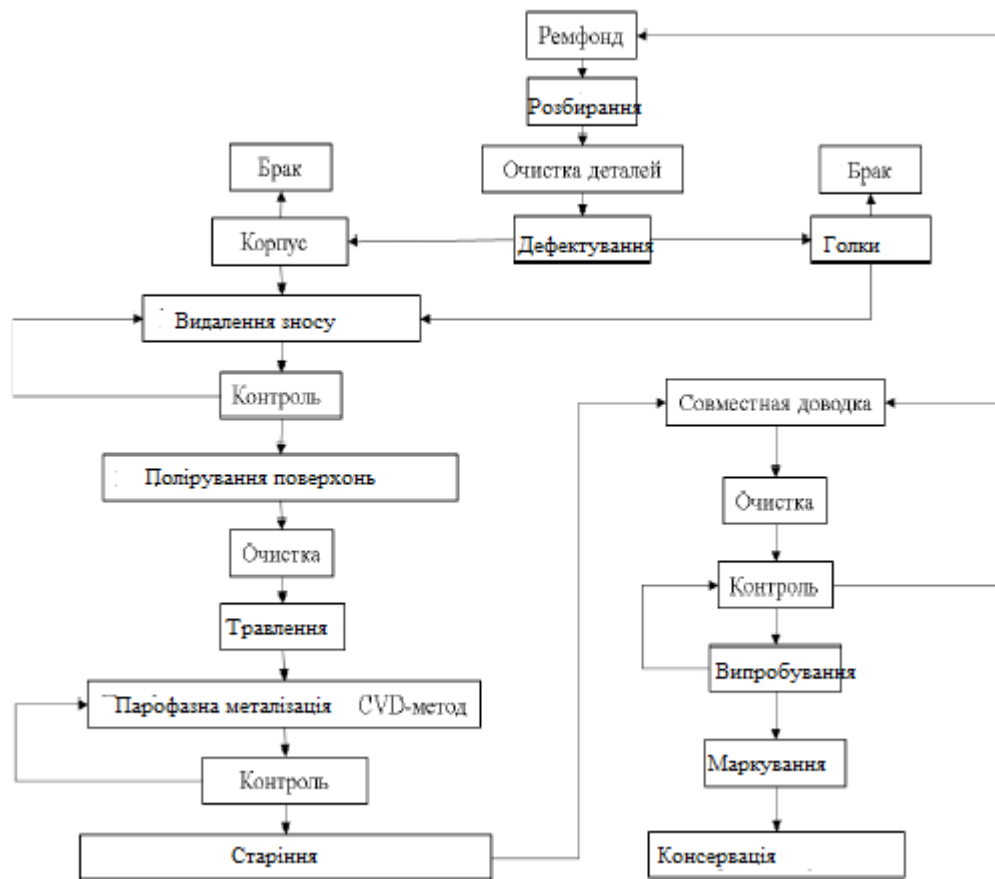


Рис. 3.16. Структурна схема технологічного процесу.

У процесі дефектації голки та корпусу розпилювачів сортуються, вибраковуюються та вимірюються, а також діляться за типорозмірними групами та зносом. Вимірювання напрямної в корпусі розпилювача проводиться індикаторним нутромірором з ціною поділу 0,001 мм у двох перерізах. Залежно від моделі відновлюваних розпилювачів проводиться типовий розрахунок визначення оптимальної товщини покриття. Далі деталі піддаються механічній обробці, з допомогою якої виводяться сліди зносу. Напрямна поверхня корпусу розпилювача хонінгується, а голки точиться або шліфується. Розпилюючі отвори розсвердлюються, запірні конуса корпусу та голки шліфуються. Торець корпусу та голки доводяться на притиральній плиті. Граничний припуск на механічну обробку встановлюється розробки технологічного процесу відновлення. Після механічної обробки деталі піддаються технічному контролю, а за потреби сортуються за розмірними групами. Для забезпечення економічної доцільності використання реактиву

потрібно полірування поверхонь, підданих механічній обробці, до шорсткості $Ra_{0,2}$ мкм. Далі деталі піддають повторному очищенню в ультразвуковій ванні та інших забруднень, що йдуть після попередніх операцій протягом 5...10 хвилин.

Перед металізацією виконується хімічне травлення деталей у 10% розчині сірчаної кислоти при температурі $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ та тривалості 50... 80 с. Далі здійснюється промивання в гарячій, при температурі $60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, та холодній воді [12, 31]. Після цього деталі протираються бавовняними серветками. Далі голки розпилювачів встановлюються на навішування, а корпуси в індуктор і виставляються в реактори CVD-установок для подальшого осадження на них карбідохромового покриття на режимі: тиск вакууму 0,025 Па, подача реакційного середовища 1,0 л/год $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. На початку формування зміцнюючого покриття збільшення адгезії деталі нагріваються до заданої температури технологічного процесу і піддаються дегазації шляхом знаходження їх у вакуумі до вирівнювання тиску, що задається технологічним режимом, в системі CVD-установки. Тривалість цього процесу 8... 12 хвилин. Далі здійснюється подача реакційного середовища до зони ведення металізації. На початку цього процесу протягом двох хвилин необхідно витримати швидкість подачі гексакарбонілу хрому до 0,1 л/год для створення адгезійного підшару, головними завданнями якого є рівномірне заповнення всього об'єму мікрорельєфу поверхні підкладки та зниження ймовірності утворення порожнин на межі переходу між покриттям та металом. Після цього, з метою зниження собівартості застосовуваної технології, поступово збільшується подача реакційного середовища до заданого режиму. Тривалість відновлення геометричних розмірів деталей розпилювача. По завершенню формування покриття та остигання деталей вони підлягають контролю на відповідність якості. Деталі, що пройшли перевірку, відправляються на наступну технологічну операцію – старіння, а не минулі або повторно підлягають зміцненню, або бракуються і назад надходять у ремфонд або утилізуються. Старіння ведеться в муфельній

термопечі при температурному режимі 120 °С та витримці протягом двох годин. Після охолодження контролюють наявність дефектів. Далі деталі скеровуються на селективне складання. Розпилювальні отвори з метою доведення та вирівнювання геометрії підлягають електроерозійній обробці до діаметра, що регламентується виробником. Запірні конуси голки та корпусу шліфуються до видалення технологічних шарів карбіду хрому. Спільне доведення голки та корпусу розпилювача в напрямній та запірному конусі проводиться притиральною пастою, що містить частинки ельбору (кубічного нітриду бору) типу ЛКВ40 5/3 або синтетичних алмазів типу: А АС4 5/3, 100/80. Після деталі підлягають ультразвуковій очистці у ванні типу ПСБ-4035-05, візуальному контролю на наявність сколів та дефектів, складання, перевірки параметрів розпилювача відповідно до ТУ, що супроводжується випробуваннями на працездатність. Перевірка працездатності відновленого розпилювача здійснюється шляхом встановлення його в форсунку з наступним підключенням її до випробувального стенду типу СТ.441439.107,. Оцінка працездатності розпилювача перевіряється на відповідність якості розпилювання палива, тиску початку впорскування, гідрощільності та герметичності замикаючих конусів. Ефективність прохідного перерізу отворів, що розпилюють, перевіряються протокою, а отримані дані звіряються з регламентними. Найбільш слабе місце - запірний конус, який схильний до кавітаційного і гідроабразивного зношування, а по досягненню граничного значення зносу порушується його герметичність. Однак інтенсивність зношування запірного конуса при зміцненні напрямної та розпилювальних отворів у порівнянні з серійними деталями знижується. З метою відновлення працездатності запірний конус може бути відновлений шляхом спільного доведення притиральної пастою до виведення слідів зносу. При зносі зміцнюючого покриття на направляючій і отворах, що розпилюють, деталей розпилювача можливе повторне осадження на них карбідів хрому. При відновленні розпилювачів форсунок допускається наступне: на корпусі освіжати напрямну поверхню карбідом хрому до

товщини покриття понад критичною 5 мкм з умовою повного відновлення геометричних розмірів отворів, що розпилюють, а основне осадження вести на направляючій голки і навпаки.

ВИСНОВКИ

1. Зношування деталей розпилювачів форсунок автотракторних дизелів відбувається через забрудненість дизельного палива і призводить до зниження потужності двигуна, збільшеної витрати палива, забруднення навколишнього середовища та зниження продуктивності машини та праці.
2. Ефективним рішенням підвищення надійності розпилювачів форсунок є розробка та вдосконалення зміцнювальних технологій відновлення зношених деталей. Найбільш перспективним способом відновлення розпилювачів форсунок є отримання карбідохромових покриттів методом парофазної хімічної металізації.
3. З метою збереження фізико-механічних властивостей голки і корпусу розпилювача, виключення повторного загартування деталей, необхідно застосовувати режим парофазної металізації, при якому проводиться рівномірне осадження карбідохромового покриття при температурі нижче відпуску низької сталей, що застосовуються для виготовлення деталей розпилювача форсунки, до 200°C.
4. Визначено мінімальну товщину покриття 0,082 мкм при мікротвердості 16,8 ГПа, яка забезпечує його несучу здатність в умовах гідроабразивного зношування.
5. Обґрунтовано технологію відновлення розпилювачів форсунок автотракторних дизелів нанесенням зміцнюючих покриттів. Зміцнення розпилювачів призводить до збільшення зносостійкості сполучення в 4,1 ... 5,0 рази в порівнянні з серійними. Покриття підвищує корозійну стійкість сталей 12Х2Н4А та Р6М5 у кислому середовищі у 3,5...4 рази, у лужному – у 6...7 разів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бобров Г.В., Ільїн А.А. Нанесення неорганічних покриттів. Київ : Слово, 2004. 624 с.
2. Бугаєв В.М. Підвищення довговічності плунжерних пар. /В. н. Бугаєв, С. П. Казанцев // Механізація та електрифікація сільського господарства. 1988. - № 1. - С. 29-30.
3. Гайдуков В.Ф., Колесник В.П., Литовченко Л.В. Проектування та розрахунок вакуумних систем випробувальних стендів та технологічних установок / В.Ф. Гайдуков, В.П. Колесник, Л.В. Литовченко, В.В. Колесник, Д.В. Слюсар. – курс лекцій для вищих технічних навчальних закладів. – Київ: «Міленіум», 2009. – 172 с.
4. Іванов, В.П. Відновлення та зміцнення деталей: Довідник / В.П. Іванов, В.С. Івашко, В.М. Костянтинов та ін. – Київ.: Наука та технології, 2013. – 368 с.
5. Єрмолов, Л.С. Підвищення надійності техніки/Л.С. Єрмолов. – Київ. Техніка, 1999. – 255 с.
6. Чорноіванов В.І. Організація та технологія відновлення деталей машин. - К.: Агропромиздат, 1989. - 336 с.
7. Міцність та надійність машин/ В.Я. Анілович, О.С. Гринченко, В.В. Карабін та ін.; за ред В.Я. Аніловича — К.: Урожай, 1996.-248 с.
8. Журавель Д.П., Паламарчук І.П., Уминський С.М., Паламарчук В.І. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: Підручник для здобувачів вищої освіти. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2021. 448 с.
- 9.Цюцюра В.Д., Цюцюра С.В. Метрологія та основи вимірювань. Навчальний посібник. К.: Знання-Прес., 2003. 180с.

- 10.Боженко Л.І., Гутта О.Й. Управління якістю, основи стандартизації та сертифікації продукції. Львів: Афіша, 2001. 172 с.
11. С. М. Уминський, Інютин С.В,Чучуй В.П. Технічна експлуатація мобільних сільсько-господарських машин. (Навчальний посібник для студентів вищих учбових закладів) Видавництво та друкарня «ТЕС»., ISBN 978-617-733754-06-4, 2015 р.224с.
12. Термомеханічна обробка сталі/М.Л. Бернштейн, В.А. Займівський, Л.М. Капуткіна; за ред. М.Л. Бернштейн. - Київ.: Наука та технології,, 2003. - 480 с.
13. Структура термічно обробленої сталі/В.М. Щасливців, Д.А. Мірзаєв, І.Л. Яковлева. - Київ.: Техніка., 2004. - 288 с.
- 14.С.М.Уминський, Б.В.Лебедев,І.І. Дударев, М.В.Королькова, С.Ю.Дмитрієва Відновлення деталей електромеханічною обробкою Видавництво та друкарня «ТЕС»., ISBN 978-617-8039-13-4, 2024 р.182 с.
15. Данилін Б.С. Минайчов В.Є. Основи конструювання вакуумних систем. Київ, Центр навчальної літератури, 2004 393 с.
16. Єрохін М.М. Способи модифікування поверхонь тертя деталей машин. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2014. 140 с.
17. Казанцев С.П. Відновлення зношених деталей багатокомпонентною дифузійною металізацією /С. П. Казанцев, Ст. А. Прилепін // Механізація та електрифікація сільського господарства. - 1998. - № 4. - С. 31-32.
18. Кардашев Г.А. Фізичні методи інтенсифікації процесів хімічної технології. Київ.:Знання. 208 с.
19. Карнаух С.Г. Деталі машин : курс лекцій для студентів технічних спеціальностей / С. Г. Карнаух, М. Г. Таровик. Краматорськ : ДДМА, 2017. 226 с.
20. Козирєв В.В. Металоорганічні сполуки у машинобудуванні та ремонтному виробництві. Київ. .Техніка, 2003. 160 с
21. Крагельський І.В., Добичин М.М., Комбалов В.С. Основи розрахунків на тертя та знос. К. Техніка, 1977, 526 с.

22. Лобанов М.Л. Захисні покриття: навч. посібник. Київ. Техніка, 2014. 200 с.
23. Мансуров Г.М., Петро О.А. Електрохімія тонких металевих плівок. Київ.:Знання. 351 с.
24. Марков В.А., Баширов Р.М., Габітов І.І. Токсичність відпрацьованих газів дизелів. Краматорськ : ДДМА, 376 с.
25. Марочник сталей і сплавів/уклад: Ю.Г. Драгунов [та ін]; за ред. Ю.Г. Драгунова та А.С. Зубченко. 4-те вид., перероб. та дод. К.: Знання 2015. 1215 с.
26. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: 2015. 492 с.
27. С.М. Уминський, Б.В. Лебедев, П.І. Осадчук. Технологія конструкційних матеріалів . (Навчальний посібник для студентів вищих учбових закладів) Видавництво та друкарня «ТЕС»., 2018 р.178с.
- 28.Кравчук В.С., Дашченко О.Ф., Коломієць Л.В., Лимаренко О.М. Основи опору матеріалів. Навчальний посібник. Одеса : Стандарт,2019, 322с.
- 29.Гурняк Л.І., Гуцуляк Ю.В., Юзьків Т.Б. Опір матеріалів . Навчальний посібник. Новий Світ . Львів. 2021.363с.
30. Кузьменко, П.П. Електроперенесення, термоперенесення та дифузія в металах / П.П. Кузьменко. – Київ: Вища школа. – 1983. – 152 с.
31. Сіднєєв Ю.Г. Гальванічні покриття. Львів: Афіша. 256 с.
32. Скороходов А.М., Льовшин А.Г. Виробнича експлуатація машинно-тракторного парку. Київ: Логос, 2017. 478 с.
33. С. М. Уминський, Інютин С.В,Чучуй В.П. Технічна експлуатація мобільних сільсько-господарських машин. (Навчальний посібник для студентів вищих учбових закладів) Видавництво та друкарня «ТЕС»., ISBN 978-617-733754-06-4, 2015 р.224с.
34. Сиркін В.Г. CVD-метод. Хімічна парофазна металізація. Київ: Каравела. 2000 . 496 с.

35. Сиркін В.Г. Газофазна металізація через карбоніли. Київ: Каравела. 2005
248 с.
36. Хрущов М.М. Абразивне зношування Київ: Каравела.2007. 251 с.
37. Цирельман Н.М. Технічна термодинаміка: Навчальний посібник. - 2-ге
вид., Київ :Лань, 2018 . 352 с.:
38. Diesel-Einspritzausrustung // Technische Unterrichtung / Robert Bosch. -
Stuttgart, 2011.-S. 12.
39. Meegoda, J.N. Conversion of Chromium Ore Processing Residue to Chrome
Steel / Jay N. Meegoda, Wiwat Kamolpornwijit, Zhengbo Hu Newark: New
Jersey Institute of Technology, 2007. – 49 p.
40. Сакун М.М., Москалюк І.В., Атрашкова О.О., Яковенко А.М. Охорона
праці в галузях сільського господарства. Одеса: БМВ, 2019. – 458 с.
41. Мельник, П.І. Технологія дифузійних покриттів/П.І. Мельник. - Київ:
Техніка, 1978. – 150 с.