



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА ТА ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»



КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Підвищення ефективних показників автомобільних двигунів плазмовим
напилюванням теплофізичних покриттів на базі кафедри «Експлуатація та ремонт
машин» Центральноукраїнського національного технічного університету»

Виконав:

магістрант групи АТ-21М Олександр ЧЕРНОБАЙ
(шифр групи) (підпис) (ім'я та прізвище)

Консультант:

канд. техн. наук, доц. Олег БЕВЗ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник:

канд. техн. наук, доц. Михайло КРАСОТА
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

канд. техн. наук, доц. Сергій МАГОПЕЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Рецензент:

_____, _____
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Кропивницький – 2022 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 «Автомобільний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Автомобільний транспорт»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

_____ Чернобаю Олександр Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Підвищення ефективних показників автомобільних двигунів плазмовим напилюванням теплофізичних покриттів на базі кафедри «Експлуатація та ремонт машин» Центральноукраїнського національного технічного університету»

керівник роботи Красота Михайло Віталійович, канд. техн. наук. доц., _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» ____ 20__ року № ____

2. Строк подання здобувачем роботи «__» _____ 20__ р.

3. Вихідні дані до роботи

матеріали науково-дослідної практики, літературні джерела наукової інформації, патенти, нормативні акти з охорони праці

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

4.1 Розділ 1 Аналіз наукової діяльності бази науково-дослідної практики

4.2 Розділ 2 Аналіз теоретичних досліджень за тематикою магістерської роботи

4.3 Розділ 3 Аналітичний розрахунок показників двигуна з теплозахисними покриттями

5. Перелік ілюстративного матеріалу комплект

1. Мета, об'єкт та задачі досліджень; 2. Аналіз методів підвищення ефективності автомобільних двигунів; 3. Теоретичні передумови підвищення ефективності двигунів теплофізичними покриттями; 4. Аналіз параметрів робочого циклу двигуна; 5. Ефективні показники автомобільного двигуна; 6. Характеристика методу нанесення теплофізичних покриттів 7. Обладнання та матеріали нанесення теплозахисних покриттів

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1		
2	Розділ 2		
3	Розділ 3		
4	Розділ 4		
5	Оформлення ілюстративного матеріалу		

Магістрант _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Реферат

Магістерська робота виконана на базі кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету.

В першому розділі роботи розглянуто напрямки наукової діяльності кафедри експлуатації та ремонту машин, на базі якої виконувалися дослідження, наукові напрямки, за якими виконуються дослідження на кафедрі, склад наукових лабораторій та основні напрями їх діяльності.

В другому розділі розглянуто методи підвищення ефективних показників автомобільних двигунів та виконано аналіз впливу теплофізичних (теплозахисних) покриттів на ефективні показники автомобільних двигунів.

В третьому розділі виконано тепловий розрахунок автомобільного двигуна з урахуванням зміни його показників в результаті застосування теплофізичних покриттів. Також, проаналізовано технологічні методи нанесення покриттів на деталі камери згорання, обґрунтовано використання плазмового напилювання на деталі камери згорання. Виконано аналіз матеріалів для напилювання та вибрано в якості матеріалу для теплофізичних покриттів оксид молібдену.

Виконано аналіз безпеки проведення робіт при проведенні робіт з нанесення покриттів на деталі камери згорання двигунів.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 3 розділів, висновків; містить 72 сторінок тексту, додаток.

Об'єкт досліджень - робочий процес автомобільного двигуна з деталями, що обмежують камеру згорання, на які нанесені теплофізичні (теплозахисні покриття).

Предмет досліджень – показники бензинового автомобільного двигуна з деталями камери згорання, на які нанесені теплофізичні (теплозахисні покриття).

Завдання досліджень:

1. Теоретично обґрунтувати вплив теплофізичних (теплозахисних) покриттів на ефективні показники автомобільних двигунів.
2. Виконати розрахунок параметрів робочого циклу ДВЗ і ефективних показників автомобільного двигуна, оснащеного деталями, що обмежують камеру згорання, з теплофізичними (теплозахисними) покриттями.
3. Обґрунтувати вибір найбільш ефективного методу та матеріалів для нанесення теплофізичних покриттів.

Зміст

Вступ	6
Розділ 1. Напрямки наукової діяльності кафедри експлуатації та ремонту машин, на базі якої виконувалися дослідження	9
Розділ 2 Аналіз стану питання	11
2.1. Методи підвищення ефективних показників двигунів	11
2.2. Теоретичний аналіз впливу теплозахисних покриттів на робочий процес двигуна	21
Розділ 3 Дослідження впливу теплофізичних (теплозахисних) покриттів на ефективні параметри двигунів	32
3.1. Аналітичний розрахунок показників двигуна з теплозахисними покриттями	
3.2. Вибір матеріалу та методу нанесення теплозахисних покриттів	39
3.3 Характеристика плазмового напилювання, як способу нанесення теплозахисних покриттів	57
3.4 Матеріали для плазмового напилювання теплозахисних покриттів	60
3.5 Безпека виконання робіт при нанесенні теплозахисних покриттів	66
Висновки	69
Список використаної літератури	70

Вступ

Актуальність роботи. Ефективний розвиток автомобільних двигунів в першу чергу пов'язаний із покращенням показників роботи автомобілів і підвищенням їх експлуатаційних та екологічних параметрів; зниження трудомісткості обслуговування, матеріалів на виготовлення, часу на технічне обслуговування і виконання ремонту двигунів; покращенням умов праці обслуговуючого персоналу та водіїв.

Удосконалення автомобільних двигунів на теперішній час відбувається за умов виснаження запасів нафти та інших видів палива, винайдення шляхів переходу на альтернативні види палив, при одночасних умовах збільшення економічності та екологічних параметрів автомобілів, що досить ускладнює вирішення проблем щодо удосконалювання двигунів.

Забезпечення більш високих показників і параметрів автомобільних двигунів може бути виконане за рахунок підвищення ефективності їх робочих циклів, застосування прогресивних конструкцій, зокрема використання гібридних установок (двигун - тепловий елемент; двигун - акумулятор та ін.), біль активного застосування альтернативних палив.

Найперспективнішим способом зниження температури, підвищення зносостійкості пар тертя, є створення теплозахисних і зносостійких покриттів поверхні деталей. Ефективне використання теплозахисних і зносостійких покриттів деталей двигуна пов'язано з рішенням ряду питань. В першу чергу це відноситься до вибору металевих і керамічних матеріалів для високотемпературного напилювання покриттів. Вибір матеріалів з певним комплексом фізико-механічних властивостей дозволяє формувати покриття з необхідними характеристиками. Важливу роль в забезпеченні ефективності і працездатності покриттів на деталях двигуна грають технологічні чинники високотемпературного напилювання покриттів.

Разом з ефективністю покриттів в зниженні температури деталей камери згоряння, теплозахисні покриття роблять істотний вплив на параметри робочого процесу, шум, вібрацію, нагароутворення, старіння масла і знос деталей двигуна.

Підвищення зносостійкості деталей двигуна і в першу чергу деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) забезпечується головним чином вибором матеріалів і технологічних операцій їх високотемпературного напилювання.

Конструктивні особливості сучасних генераторів високотемпературних струменів дозволяють вводити в них матеріали у вигляді порошків, проволоч, гнучких шнурів. Умови подачі і розпилення порошкових матеріалів, що здійснюються в газополум'яних і плазмових пальниках, вимагають, щоб дисперсність порошків лежала у вузьких межах. Останнім часом повідомляється про можливість напилювання дрібнодисперсійними металевими порошками (1-5 мкм), що дозволяють одержувати високоякісні покриття з низькими пористістю і шорсткістю.

На сьогоднішній час існує багато видів матеріалів для нанесення теплозахисних покриттів, які мають різні хімічні та фізико-механічні властивості.

Перспективи подальшого розвитку, удосконалення і широкого використання техніки високотемпературного розпилювання передбачається саме у використуванні композиційних порошкових або дротяних матеріалів. Створення теплозахисних, зносостійких, антизадирих і антифрикційних покриттів складного фазового складу, змінного по перетину з програмованою структурою і властивостями найбільш ефективно може бути здійснено саме з використуванням екзотермічно реагуючих композиційних матеріалів.

Мета роботи підвищення ефективних показників автомобільних двигунів нанесенням теплозахисних покриттів на деталі камери згорання теплофізичних (теплозахисних) покриттів методом плазмового напилювання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі.

Задачі досліджень:

1. Теоретично обґрунтувати вплив теплофізичних (теплозахисних) покриттів на ефективні показники автомобільних двигунів.
2. Виконати розрахунок параметрів робочого циклу ДВЗ і ефективних показників автомобільного двигуна, оснащеного деталями, що обмежують камеру згорання, з теплофізичними (теплозахисними) покриттями.

4. Обґрунтувати вибір найбільш ефективного методу та матеріалів для нанесення теплофізичних покриттів.

Об'єкт досліджень - робочий процес автомобільного двигуна з деталями, що обмежують камеру згорання, на які нанесені теплофізичні (теплозахисні покриття).

Предмет досліджень – показники бензинового автомобільного двигуна з деталями камери згорання, на які нанесені теплофізичні (теплозахисні покриття).

Наукова новизна: –

- 1) теоретично обґрунтовано підвищення ефективних показників автомобільних двигунів методом нанесення теплофізичних (теплозахисних покриттів) на деталі, що утворюють камеру згорання;
- 2) уточнена методика розрахунку параметрів робочого циклу, індикаторних і ефективних показників двигуна, оснащеного деталями з теплофізичними (теплозахисними покриттями).

Практичне значення:

Запропоновано плазмове напилювання, як метод нанесення теплофізичних (теплозахисних) покриттів, надані рекомендації щодо матеріалів, режимів та обладнання для нанесення покриттів.

Розділ 1

Напрямки наукової діяльності кафедри експлуатації та ремонту машин, на базі якої виконувалися дослідження

«На кафедрі "Експлуатація та ремонт машин" ЦНТУ функціонує наукова школа "Розробка конструктивних, технологічних та експлуатаційних заходів для підвищення надійності автомобільної та сільськогосподарської техніки"» [34].

«В рамках означеної наукової школи проводяться наукові дослідження за шістьма різними науковими напрямками, роботу яких очолюють п'ять д.т.н., професорів кафедри:

- відновлення та зміцнення деталей сільськогосподарської техніки композиційними покриттями (науковий керівник: д.т.н., проф. Черновол М.І.);
- зносостійкості та надійності машин (науковий керівник: д.т.н., проф. Аулін В.В.);
- транспортні системи та технології (науковий керівник: д.т.н., проф. Аулін В.В.);
- підвищення довговічності деталей машин формуванням на робочих поверхнях дискретних покриттів (науковий керівник: д.т.н., проф. Солових Є.К.);
- вдосконалення конструкції, технології виготовлення, випробування, експлуатації та ремонту гідروприводу сільськогосподарської техніки (науковий керівник: д.т.н., проф. Кулешков Ю.В.)» [34].

На кафедрі працюють наступні наукові лабораторії:

«1. Наукова лабораторія "Транспортні системи та технології" (науковий керівник д.т.н., проф. Аулін В.В.).

Основні напрями її діяльності:

- вивчення стану проблем розвитку транспортних систем та технологій перевезень пасажирів і вантажів;
- методи дослідження транспортних процесів;
- організація перевезень і управління на транспорті;
- розробка науково-методичної та нормативної документації для транспортних систем і технологій;

- створення теоретичних та методичних основ удосконалення структури транспортної системи міста та управління транспортним обслуговуванням населення;
- оптимізація процесів перевезення пасажирів та вантажів;
- проведення експериментальних досліджень транспортних систем, обробка та аналіз результатів отриманих даних;
- розробка способів удосконалення структури та раціонального розподілу міського пасажирського транспорту;
- організація і регулювання дорожнього руху;
- підвищення надійності транспортних засобів і підвищення надійності і інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту якості транспортних послуг;
- удосконалення систем технічного обслуговування і ремонту транспортної техніки;
- інформаційні технології і системи на транспорті та вивчення технічних та технологічних характеристики транспортних перевезень;
- розробка теоретичних та методичних основ забезпечення та підвищення надійності функціонування транспортних систем;
- розробка трибофізичних основ довговічності систем і агрегатів АТТ технологіями припрацювання та відновлення;
- інтелектуальні системи на транспорті.

2. Наукова лабораторія "Зносостійкість та надійність машин" (науковий керівник д.т.н., проф. Аулін В.В.). Основні напрями її діяльності:

- вивчення стану проблем тертя та зношування, надійності деталей та сполучень сільськогосподарської та транспортної техніки, побудова фізичних та математичних моделей їх зносних станів;
- створення теоретичних основ підвищення зносостійкості, процесів модифікації та самоорганізації робочих поверхонь деталей концентрованими потоками енергії як з нанесенням покриттів, так і без них;

- оптимізація технологічних параметрів запропонованих способів модифікації робочих поверхонь деталей при їх виготовленні та відновленні;
- аналіз експериментальних досліджень фізичних, фізико-механічних та триботехнічних властивостей поверхневих шарів деталей після їх модифікації;
- розробка технологічних способів модифікації поверхонь деталей та оцінка їх техніко-економічної ефективності;
- виявлення умов реалізації процесів самоорганізації;
- створення фізичних основ та визначення технологічних способів впливу на робочу поверхню, на якій спостерігаються процеси самоорганізації.

3. Наукова лабораторія "Об'ємного гідроприводу" (науковий керівник д.т.н., проф. Кулешков Ю.В.). Основні напрями її діяльності:

- зниження пульсації миттєвої подачі в робочому процесі подачі шестеренного насоса;
- зниження шуму шестеренного насоса шляхом вдосконалення конструкції качаючого вузла насоса;
- розробка принципів і конструкцій шестеренного насоса з регульованою подачею;
- дослідження особливостей руху робочої рідини у відсіченій порожнині шестеренного насоса;
- дослідження і розробка технологій ремонту шестеренного насоса і відновлення і зміцнення його деталей» [34].

Розділ 2

Аналіз стану питання

2.1. Методи підвищення ефективних показників двигунів

Сталий розвиток автомобільного двигунобудування істотно пов'язаний із збільшенням продуктивності роботи автомобілів і підвищенням їх експлуатаційних та екологічних характеристик; зниженням трудомісткості, металоємності та використанням експлуатаційних нових матеріалів на виготовлення, технічне обслуговування і ремонт двигунів; покращенням умов обслуговуючого персоналу та водіїв.

Удосконалення автомобільних двигунів на теперішній час здійснюється в умовах виснаження глобальних запасів нафти та природного газу, швидкого переходу на альтернативні види моторних палив, водночас підвищуються вимоги до економічних та екологічних параметрів автомобілів, що сильно ускладнює вирішення завдань по покращенню двигунів автомобілів.

Отримання більш високих показників і параметрів автомобільних двигунів може бути забезпечене на основі збільшення ефективності робочих циклів двигунів, застосування їх прогресивних конструкцій, зокрема використанням гібридних установок (двигун - тепловий елемент; двигун - акумулятор та ін.), активного застосування альтернативних палив.

В Україні найбільш розповсюдженими є бензинові двигуни, які на сьогодні є досить досконалими. Подальший їх розвиток може здійснюватися шляхом покращення паливної експлуатаційної економічності при обов'язковому зниженні токсичності відпрацьованих газів двигунів.

Основними шляхами при вирішуванні цих проблем є забезпечення сталої роботи бензинових двигунів на збіднених паливо-повітряних сумішах. Але, при роботі на збіднених сумішах знижуються швидкість проходження хімічних реакцій а, отже, і швидкість виділення тепла в циліндрах двигунів, що, в свою чергу, підвищує втрати теплоти в оточуюче середовище. Запобігти цьому можливо шляхом інтенсифікація проходження процесу згоряння, наприклад, забезпеченням

розшарування паливо-повітряної суміші або створенням дрібно масштабних турбулентних пульсацій у паливоповітряному заряді [1, 2].

За результатами досліджень, використання цих рішень може досягти підвищення експлуатаційної економічності двигуна на 3-5% і, таким чином, істотно зменшити токсичність відпрацьованих газів [1, 2].

Один із напрямків зниження енерговитрат при роботі ДВЗ пов'язаний зі зменшенням витрат теплоти в систему охолодження при одночасній утилізації теплоти, яка виділяється з відпрацьованими газами. Як відомо, в ДВЗ більше 30% теплоти, що вноситься в циліндр із паливом, виводиться у навколишнє середовище через систему охолодження. Використання навіть частки цієї теплоти для виконання корисної роботи може істотно покращити економічність двигуна [3, 4].

Тому, актуальною залишається проблема створення адіабатного автомобільного двигуна, тобто такого, в якому втрати теплоти через теплообмін із навколишнім середовищем будуть мінімальними.

У адіабатному двигуні підвищується температурний стан деталей камери згоряння. Це, з одного боку, розширює асортимент палив, які можуть використовуватися в цих двигунах, пом'якшує роботу двигуна, зменшує виділення CO і CH із відпрацьованими газами, але, з другого боку, вимагає застосування у них дефіцитних жаростійких матеріалів і термостійких олив, відсутність яких стримує роботи із створення таких ДВЗ [5, 6].

Щоб охарактеризувати сучасний двигун внутрішнього згорання використовують його ефективні показники. До ефективних показників відносять:

- середній ефективний тиск;
- механічний ККД;
- ефективну потужність;
- ефективний ККД;
- ефективну питому витрату палива.

Величина кожного з ефективних показників визначається величиною відповідного індикаторного показника і механічним ККД.

Середній тиск внутрішніх витрат можна зменшити [5, 6]:

1. Правильним вибором і забезпеченням підтримки в експлуатації оптимального теплового режиму роботи двигуна;

2. Оптимальним конструюванням двигуна і його агрегатів. Правильний вибір конструкції і розмірів впускної і випускної систем зводить до мінімуму втрати на газообмін. В експлуатації опір систем не повинен змінюватися;

3. Правильним вибором масла. При цьому прагнуть використовувати масло з мінімальною в'язкістю, при якій забезпечується надійне рідинне тертя, тривала робота всіх вузлів двигуна при максимально можливих термінах заміни і мінімальному вигоранні масла;

4. Використанням нерозділених камер згорання замість розділених. Цим досягається зниження внутрішніх втрат в результаті виключення втрат на перетікання заряду;

5. Раціональним вибором матеріалів і технології виготовлення деталей. Так, при правильному виборі матеріалів, твердості, мікрогеометрії поверхонь деталей пар тертя, а також використанні спеціальних покриттів поліпшується змащення пар тертя, знижуються втрати на тертя, зменшується інтенсивність зносу деталей і підвищується надійність роботи двигуна.

Для встановлення оптимального методу підвищення ефективних показників розглянемо відомі шляхи в цьому напрямку (рис. 2.1).

На підвищення ефективних показників двигуна впливають наступні фактори [5, 6]:

Ступінь стискання. З підвищенням ступеня стиску збільшується термічний ККД робочого циклу. Підвищуються тиск і температура в кінці процесу стискання, що сприяє пришвидшенню підготовки паливо-повітряної суміші до згорання, підвищенню швидкості поширення фронту полум'я і зменшенню загальної тривалості процесу згорання. Це надає можливість покращити показників роботи автомобільного двигуна. Однак, для підвищення ступеня стиску слід зменшувати об'єм камери згорання двигуна $V_{кз}$, а отже співвідношення площ $R_{кз}$ поверхні камери згорання до її об'єму $V_{кз}$ зростає, відносна кількість робочої суміші, яка дотикається до стінок деталей камери згорання, збільшується. Пристінкові шари суміші піддаються охолодженню, і швидкість згорання їх знижується, що в кінцевому випадку призводить до підвищення часу третьої фази догорання.

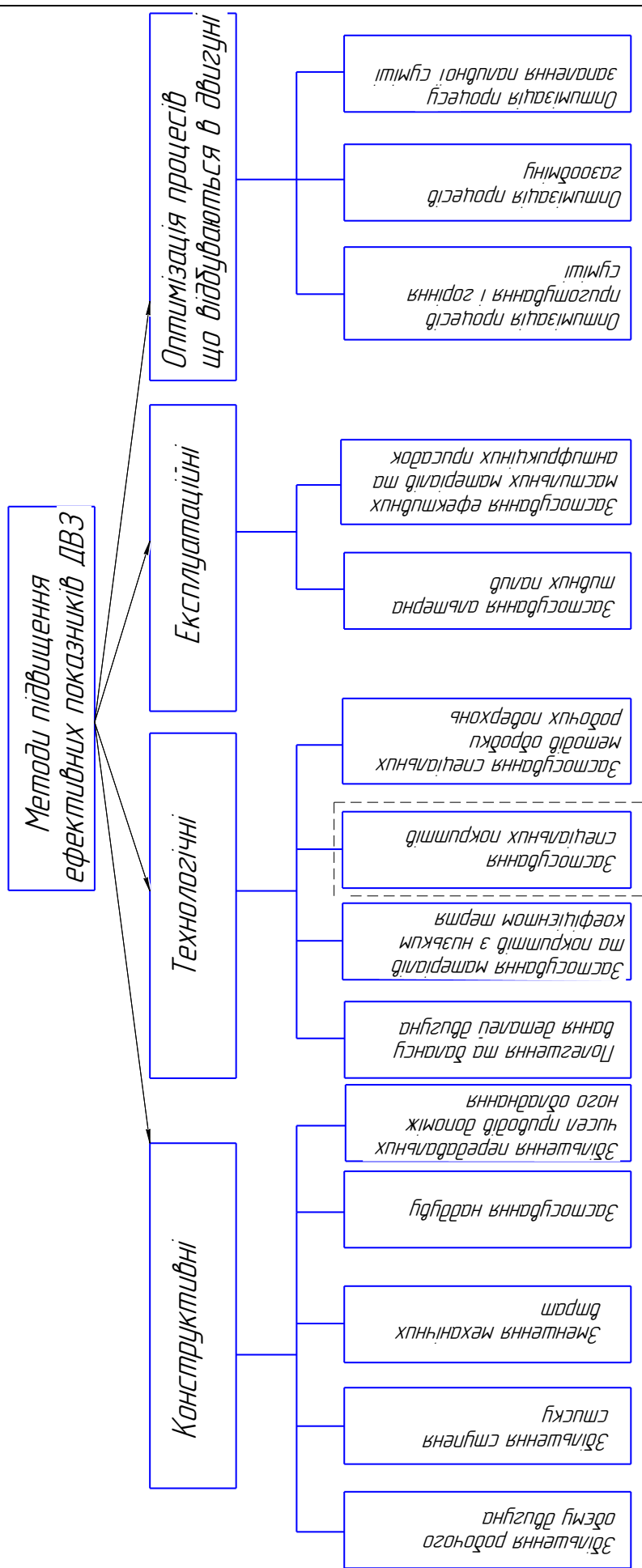


Рисунок 2.1 _ Аналіз існуючих методів підвищення ефективних показників автомобільних двигунів

Форма камери згорання. Головна вимога до функціонування камери згорання автомобільного двигуна з іскровим запалюванням - виконання процесу згорання без явища детонації, при одночасному якомога великому стисканні [5, 6]. Для забезпечення цієї вимоги відношення площі поверхні деталей камери згорання до її об'єму (P_{kz}/V_{kz}) слід бути якомога меншим; необхідно таким чином забезпечувати достатньо якісне змішування свіжого заряду; свічка запалювання в двигуні повинна встановлюватися як найближче до самих нагрітих ділянок камери згорання поблизу до її центру, щоб напрямок фронту полум'я проходив якомога коротшим шляхом. Геометрична форма камери згорання двигуна сильно залежить від типу розміщення клапанів ГРМ: нижнього чи верхнього. На старих конструкціях двигунів широко використовувалося нижнє розташування клапанів ГРМ. У камері згорання при такому способі розміщення клапанів виконується інтенсивний вихровий рух робочої суміші в сторону свічки запалювання двигуна внаслідок витискування цієї суміші з зазору між поршнем і головкою блока циліндра в кінці такту стискання. Однак, у таких типах камер згорання значна поверхня тепловідведення, і на сьогодні вони повністю замінені камерами згорання з верхнім розміщенням клапанів ГРМ.

Найкращою геометричною формою камери згорання являється напівсферичний тип [5, 6]. Вона характеризується найменшим співвідношення P_{kz}/V_{kz} і найменшим проходженням шляху фронту полум'я до будь-якої з поверхонь камери згорання. З використанням додаткових елементів - витискувачів на поверхні поршня, тангенційного розміщення впускних трактів у напівсферичних камерах згорання можливо забезпечити гарну завихрюваність робочої суміші. Однак, для таких типів камер згорання необхідна ускладнена конструкція приводу клапанів, які розміщуються у два ряди, при цьому відбувається збільшення ширини верхньої частини двигуна автомобіля. Схожий за її властивостями являється шатровий тип камери згорання, при якому клапани розміщуються в один ряд, що спрощує конструкцію виконання приводу клапанів ГРМ.

Найкраще завихрювання суміші здійснюється при плоско-овальному типу камери згорання, при цьому у цій камері спостерігається погане наповнення циліндрів свіжою сумішшю.

Задовільне завихрення суміші здійснюється при застосуванні циліндричного типу камери згорання у днищі поршня разом з впускним трактом спеціальної форми в головці блоку циліндрів. При такому типі конструкції камери згорання двигуна спрощується конструкція головки блока циліндрів, тому що нижня поверхня головки блоку виконується плоскою.

У більш сучасних модифікаціях напівклинового типу камери об'єм камери згорання частково розміщений у днищі поршня. Наступним розвитком таких камер є лінзовидний тип камери згорання двигуна, до яких входять два сферичні сегменти, один із яких зроблено в головці блоку циліндрів, а інший - у днищі поршня двигуна.

Кількість клапанів. На сьогодні розповсюджене використання автомобільних двигунів з встановленням трьох, чотирьох і п'яти клапанами у кожному циліндрі [5, 6]. Збільшення кількості встановлюваних клапанів сприяє покращенню процесу згорання, збільшенню антидетонаційних властивостей камери згорання, покращенню наповнення простору циліндрів двигуна свіжим зарядом, зменшенню токсичності відпрацьованих газів (рис. 2.2).

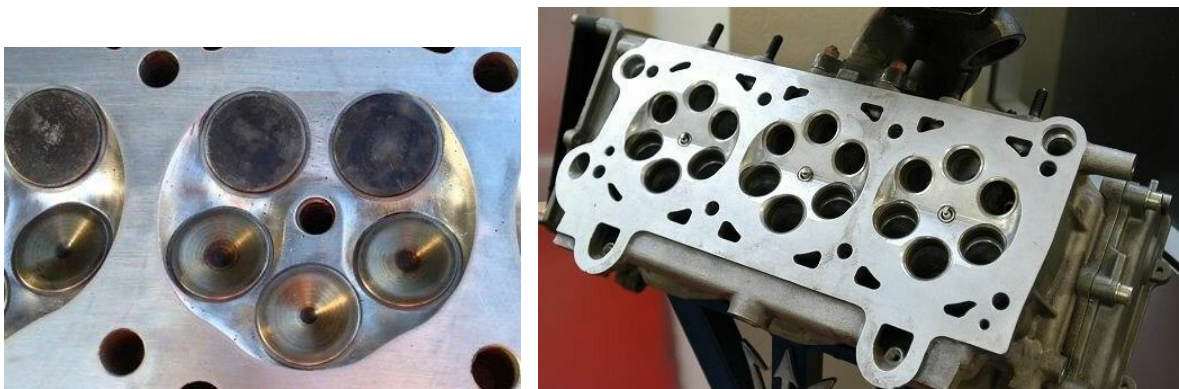


Рисунок 2.2 – Багатоклапанний газорозподільний механізм

Розміщення свічки. На автомобільних двигунах із значним діаметром циліндрів іноді передбачають по дві свічки запалювання на один циліндр, що виконують займання суміші із двох боків, внаслідок чого шлях проходження фронту факелу полум'я зменшується вдвічі (рис. 2.3). Дві свічки необхідно використовувати у газових двигунах, тому що газоповітряні суміші згорають набагато повільніше, ніж бензинові [5, 6].

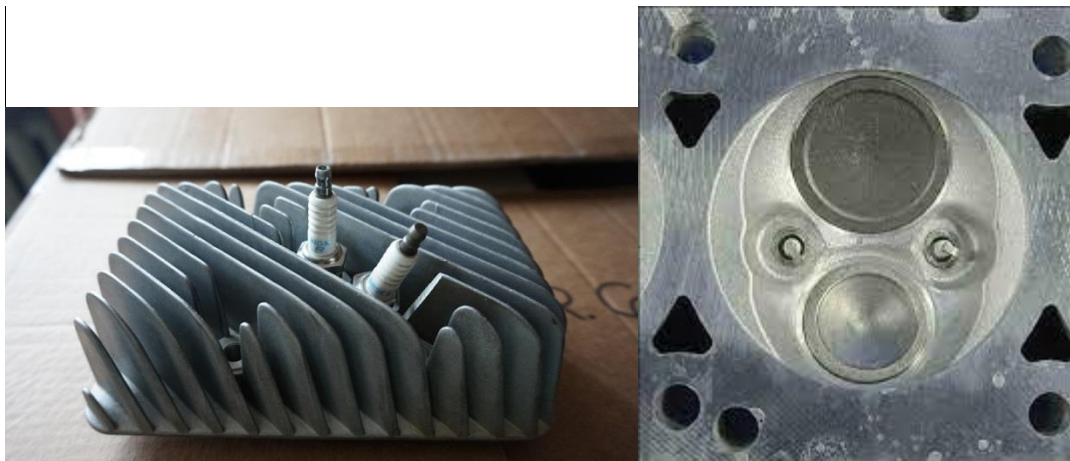


Рисунок 2.3 - Застосування двох свічок запалювання в камерах згорання

Енергія іскрового розряду свічки. Підвищення енергії іскрового розряду свічки збільшує надійність процесу запалювання і зменшує по тривалості першу фазу процесу згорання. Однак, цей позитивний ефект може відбуватися лише до певного моменту, після проходження якого подальше підвищення енергії розряду свічки не дає максимального результату [5, 6].

Частота обертання колінчастого валу. При збільшенні частоти обертання підсилюється завихрювання свіжого заряду, за рахунок підвищення опору у впускній системі відбувається зростання коефіцієнту залишкових газів. Через це температура та тиск у процесі згорання знижуються. Також, зменшується час для хімічної підготовки палива до самозапалювання. Отже, вірогідність появи детонації при підвищенні частоти обертання колінчастого валу зменшується [5, 6].

Якість мастила. Для забезпечення ефективної роботи двигуна слід використовувати мастила відповідної в'язкості. Основною задачею мастила є зменшення втрати від тертя, попередження корозії, виведення продуктів зношення та згорання і частково охолодження деталей [5, 6].

Сумішоутворення та якість палива. Сумішоутворення й дозування в двигунах внутрішнього згорання – найважливіші процеси, що визначають паливну економічність, токсичність відпрацьованих газів, динамічні якості, а в деяких випадках і надійність автомобіля. Система електронного впорскування палива з форсунками в впускних каналах дають змогу оптимізувати конструктивні схема й розміри впускних трактів двигунів, підвищити ступінь стискання і знизити

температуру заряджання, а також температуру деталей камери згорання [5, 6].

Збільшення кількості циліндрів та їх розмірів. Збільшивши кількість циліндрів або збільшення їх розмірів призведе до збільшення потужності двигуна, але збільшить його масу, габарити та зменшить його економічність [5, 6].

Зменшення кількості тактів. Перехід від чотирьохтактного до двохтактного робочого циклу призведе до збільшення літрової потужності двигуна в 1,5...1,7 рази. Але при цьому зменшується якість очищення циліндрів, наповнення та потребується додаткова енергія на приведення в дію продуву циліндрів. Зменшується економічність двигуна. «Також, двотактний двигун характеризується значною тепловою напруженістю деталей, що формують камеру згорання, тому, що кількість теплоти, що підводиться в одиницю часу, в ньому в два рази більша, ніж у чотирьохтактного» [5, 6].

Наддув двигуна. «Форсування автомобільних двигунів можливо здійснювати по середньому ефективному тиску. З цією метою слід збільшити циклову подачу палива та кількість повітря, що надходить в циліндр під тиском за рахунок підвищення його густини. Такий спосіб підвищення називається наддувом» [9].

Наддув класифікують на чотири основні типу : динамічний (резонансний), наддув, що здійснюється від окремого компресора, газотурбінний – від відпрацьованих газів і комбінований.

Наддув з окремим механічним приводом компресора, що здійснюється від колінчастого валу двигуна дозволяє добре узгоджувати роботу компресора відповідно до тягових характеристик автомобільного двигуна. Він як правило використовується для нетривалого підвищення потужності ДВЗ за рахунок невеликого ступеня наддуву. Проте, використання такого типу наддуву викликає значне погіршення економічності двигуна, що пояснюється витратами енергії на приведення в дію компресора.

Газотурбінний вид наддуву знайшов найширше розповсюдження в двигунах на теперішній час. Для виконання приводу відцентрового турбокомпресора застосовують частину енергії від відпрацьованих газів, що надходять на крильчатку газової турбіни. Агрегат, що об'єднує газову турбіну і компресор в один вузол,

називають турбокомпресором (рис. 2.4). При газотурбінному виді наддуву можливо застосовувати два варіанти використання енергії від відпрацьованих газів: при постійному тиску газів перед турбіною - відпрацьовані гази надходять в ресивер, а далі при постійному значенні тиску подаються на лопатки турбіни; другий варіант - імпульсний наддув – коли відпрацьовані гази надходять безпосередньо на лопатки турбіни. В даному випадку застосовується не лише потенційна енергія газів, але й кінетична складова. Імпульсний варіант наддуву найбільш ефективний при невисоких значеннях тиску наддуву, коли енергія імпульсу становить значно більше значення тиску. При значних тисках ефект від використання імпульсного типу наддуву знижується, а при значеннях тиску $> 0,4$ МПа - практично непомітний.

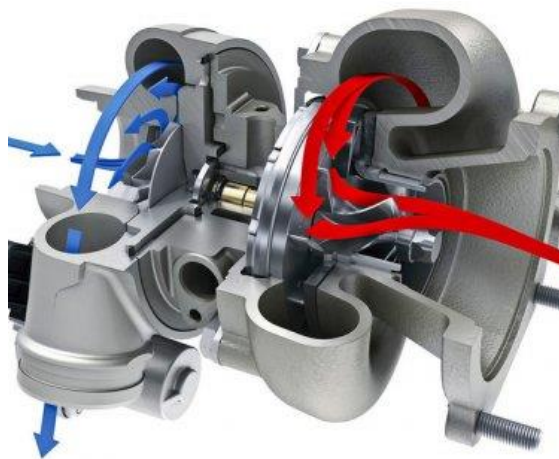


Рисунок 2.4 – Газотурбінний наддув

При газотурбінному наддуві механічний зв'язок агрегату наддуву з колінчастим валом двигуна відсутній, тому можуть істотно погіршитися тягові характеристики двигуна через інерційність турбінного колеса. У зв'язку зі зниженням енергії відпрацьованих газів на малих навантаженнях на початку розгону може не забезпечуватися подача в циліндр необхідної кількості свіжого заряду.

Ці недоліки можуть бути усунені шляхом використання комбінованого наддуву - послідовної комбінації наддуву з привідним компресором і газотурбінного наддуву. Динамічний (резонансний) наддув припускає використання коливальних явищ в системі впускання і випуску, що виникають в результаті циклічного повторення процесів газообміну в циліндрі. Принцип його полягає в

створенні зони стиснення свіжого заряду перед клапаном впускання до моменту його закриття, що забезпечує збільшення маси що поступає в циліндр заряду. Крім того, у випускному трубопроводі під час перекриття клапанів за випускним клапаном, що закривається, створюється зона розрідження відпрацьованих газів, що дозволяє поліпшити очистку циліндра і повніше заповнити його свіжим зарядом.

Нанесення покриттів з спеціальними властивостями. Найперспективнішим способом зниження температури, підвищення зносостійкості пар тертя, є створення теплозахисних і зносостійких покриттів поверхні деталей [7, 8].

Ефективне використання теплозахисних і зносостійких покриттів деталей двигуна пов'язано з рішенням ряду питань. В першу чергу це відноситься до вибору металевих і керамічних матеріалів для високотемпературного напилювання покриттів. Вибір матеріалів з певним комплексом фізико-механічних властивостей дозволяє формувати покриття з необхідними характеристиками. Важливу роль в забезпеченні ефективності і працездатності покриттів на деталях двигуна грають технологічні чинники високотемпературного напилювання покриттів.

Разом з ефективністю покриттів в зниженні температури деталей камери згоряння, теплозахисні покриття роблять істотний вплив на параметри робочого процесу, шум, вібрацію, нагароутворення, старіння масла і знос деталей двигуна. Підвищення зносостійкості деталей двигуна і в першу чергу деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) забезпечується головним чином вибором матеріалів і технологічних операцій їх високотемпературного напилювання.

2.2. Теоретичний аналіз впливу теплозахисних покриттів на робочий процес двигуна

Якісний вплив теплозахисних покриттів стінок камери згоряння на деякі параметри робочого процесу можна проаналізувати за допомогою відомої залежності теорії робочого процесу.

Більш висока температура поверхні покриття приводить до підвищення температури повітря в кінці процесу наповнення, яку можна визначити по формулі [10]:

$$T_{a2} = T_{a1} \cdot \frac{(T_k + \Delta T_2)}{(T_k + \Delta T_1)}, \quad (2.1)$$

де T_k - температура повітря на впусканні;

ΔT - підігрів повітряного заряду в процесі наповнення. Індексом 1 відмічаються параметри робочого процесу двигуна без покриття на деталях камери згоряє, індексом 2 - з теплозахисним покриттям цих деталей.

Висока температура поверхні теплозахисних деталей не має впливу на тиск повітря в циліндрі двигуна в кінці процесу наповнення. Коефіцієнт наповнення циліндра двигуна за наявності покриттів на деталях змінюється обернено пропорційно до зміни абсолютної температури кінця наповнення [10].

$$\eta_{g2} = \eta_{g1} \frac{T_{a1}}{T_{a2}}, \quad (2.2)$$

Параметри повітряного заряду в кінці процесу стиснення в циліндрі двигуна з теплозахисними покриттями деталей змінюються по такій закономірності:

$$T_{C2} = T_{C1} \cdot \frac{T_{a2}}{T_{f1}} \cdot \epsilon^{n_1 - n_1^1}, \quad (2.3)$$

Тиску в кінці процесу стиснення

$$P_{c2} = P_{c1} \cdot \epsilon^{n_1 - n_2}, \quad (2.4)$$

де ϵ - ступінь стиснення;

n - середні показники політропи стиснення без покриттів і з покриттями на деталях.

Матеріали ряду експериментальних робіт, пов'язаних з дослідженнями теплової ізоляції головки циліндрів за допомогою накладок і покриттів, показують, що середній показник політропи стиснення зростає. Це приводить до збільшення тиску і температури в кінці процесу стиснення [10, 11].

Теплозахисне покриття на стінках камери згоряння з підвищеною температурою його поверхні здійснює вплив на параметри процесу згоряння таким чином.

Коефіцієнт надлишку повітря при тому, при згорянні змінюється пропорційно зміні коефіцієнта наповнення.

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cdot \frac{\gamma_{B_2}}{\gamma_{B_1}} \cdot \frac{\eta_9}{\eta_\sigma}, \quad (2.5)$$

де γ_B – густина повітря, що надходить в циліндр

η_9 - коефіцієнт наповнення.

З останньої рівності виходить, що за наявності покриттів на деталях коефіцієнт надлишку повітря зменшується.

Період затримки самозаймання палива за прийнятих умов порівняння змінюється залежно від зміни температури і тиску в кінці стиснення і від дії найгарячішої поверхні покриття на паливний факел. Оскільки теплова ізоляція деталей приводить до зростання середньої температури і середнього тиску і гаряча поверхня покриття прискорює передполуменеву підготовку палива, період затримки самозаймання, - у разі теплоізованих деталей скорочується. Приблизно період затримки самозаймання можна обчислити по формулах проф. А. І. Толстова [11].

Для максимальної і середньої швидкостей, наростання тиску і ступеня підвищення тиску при тому, що згоряє А.І. Толстовим отримана експериментальна залежність:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right)_{cp} = \alpha \tau_1;$$

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right)_{max} = b e^{k \tau_1} \quad (2.6)$$

$$\lambda_g = c + m \tau_1 \quad (2.7)$$

Дослідні коефіцієнти a , k , b , m , c , що входять в ці залежності, є універсальними для великого ряду швидкохідних двигунів.

При застосуванні теплозахисних покриттів стінок камери згорання період затримки самозаймання t скорочується, тому величини $\Delta p / \Delta t$ і λ зменшуються.

Максимальний тиск згоряння в циліндрі з теплоізоляцією деталей змінюватиметься по формулі

$$p_{z2} = p_{z1} \cdot \frac{\lambda_{D2}}{\lambda_{D1}} \cdot \epsilon^{n-n_{11}}, \quad (2.8)$$

отриманої за умови незмінності тиску повітря на початку стиснення $p_a = p_a$.

Результати експериментальних досліджень двигунів з теплоізольованими головками циліндрів, показують, що множник $\lambda_{D2}/\lambda_{D1}$ в першій частині останнього рівняння завжди значно менше одиниці, тоді як множник $\epsilon^{n-n_{11}}$ дуже мало перевищує одиницю. Все це указує на те, що максимальний тиск згоряння в циліндрі з теплоізольованими деталями зменшується [10].

Інші параметри робочого процесу, наприклад витрата палива g_e , температура вихлопних газів t_g , залежатимуть від характеру процесу згоряння, а g_e - ще і від зміни теплового балансу.

При практично незмінному значенні температури охолоджуючого середовища та розмірів камери згоряння різниця нагріву типового та камери згоряння з теплозахисними покриттями по суті може бути зведена до визначення величини середнього питомого потоку через стінку q .

Ця величина залежатиме послідовно або від середньої результуючої температури газів за цикл t_g , середнього за часом і поверхнею коефіцієнта тепловіддачі від газів до стінки α_g і від температури стінки $t_{гсг}$ або від температурного перепаду в стінці, що визначається як різниця температур між $t_{гсг}$ і температурою днища поршня $t_{гск}$ зі зворотного боку, коефіцієнта теплопровідності матеріалу λ і товщини стінки δ . Використовуючи відомий вираз для теплового потоку, можна визначити деяке усереднене значення температури стінки на гарячій стороні:

$$q = \alpha_z (t_z - t_{zcz}) = \frac{\lambda}{\delta} (t_{zcz} - t_{зск}), \quad (2.9)$$

где q - середній питомий тепловий потік через днище поршня двигуна, Вт/м²;

α_z - коефіцієнт тепловіддачі від газів до деталей камери згорання;

t_r - середня результуюча температура газів за цикл, К;

$t_{ггг}$ - температура стінки камери згорання з боку газів, К;

$t_{гск}$ - температура деталей камери згорання із зворотного боку. К;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріала днища поршня. Вт/м-К;

δ - товщина днища поршня, м.

Для визначення різниці нагріву серійного двигуна та двигуна з теплозахисними покриттями, на основі теорії теплопередачі, процес передачі тепла для двигуна з теплозахисними покриттями може бути представлений у вигляді схеми зміни температури та розподілу теплових потоків від газів через тришарову стінку по товщині поршня (рис. 2.5).

При цьому q_a - відбитий теплозахисним шаром деталі камери згорання тепловий потік, q_o , q_{δ} , q_m - відповідно теплові потоки поглинуті теплозахисним шаром, тілом деталей камери згорання і шаром охолоджуючого середовища (антифриз, масло), q_{γ} - тепловий потік, що пройшов через деталі камери згорання.

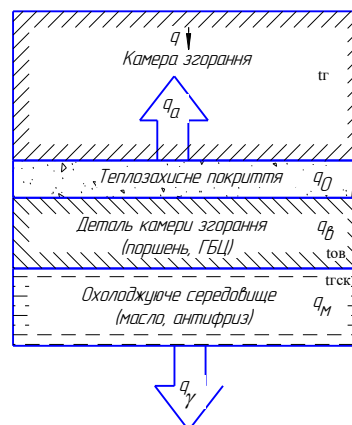


Рисунок 2.5 - Схема передачі теплоти через деталь камери згорання з теплозахисними покриттями

За цієї умови

$$t_{ггг} > t_o > t_{ов} > t_{гск}, \quad (2.10)$$

де $t_{ггг}$ - температура теплозахисного шару з боку газів. К; t_o - температура стінки деталі під теплозахисним покриттям, К; $t_{ов}$ - температура деталі з боку

охолоджуючого середовища. К; $t_{зск}$ - температура зовнішнього шару охолоджуючого середовища, К.

Різниця нагрівання серійної деталі і деталі з теплозахисним покриттям з урахуванням термічних опорів шарів розраховується:

$$\Delta t = (\Delta t_{cpr} - \Delta t_{mn}) - (\Delta t_{cpr} - \Delta t_{mno}) = \left(\frac{\Delta t_r}{1 + \frac{R_{en}}{R_{er}}} - \frac{\Delta t_{cpr}}{1 + \frac{R_{em}}{R_{en}}} \right) - \left(\frac{\Delta t_{cpr}}{1 + \frac{R_{en}}{R_{eon}}} - \frac{\Delta t_{cpro}}{1 + \frac{R_{eoc}}{R_{em}}} \right), \quad (2.11)$$

де Δt_{cpr} - різниця нагрівання поверхні днища типового поршня відносно середньої результуючої температури газів при згорання;

Δt_{mn} - різниця нагрівання тіла серійної деталі;

Δt_{cpro} - різниця нагрівання поверхні деталі з теплозахисними покриттями відносно середньої результуючої температури газів при згорання;

Δt_{mno} - різниця нагрівання тіла деталі під теплозахисним покриттям;

t_r - температура нагрівання опроміненої поверхні на такті розширення;

R_{en} - термічний опір матеріалу поршня, $m^2K/Вт$;

R_{ez} - термічний опір газів, $m^2K/Вт$;

R_{em} - термічний опір внутрішньої поверхні поршня, оскільки внутрішня поверхня покрита шаром охолоджуючого середовища, приймається рівним термічному опору масла, $m^2K/Вт$;

R_{eon} - термічний опір поверхні деталі з покриттям, $m^2K/Вт$;

R_{eoc} - термічний опір теплозахисного покриття, $m^2K/Вт$.

В результаті розрахунків встановлено, що зниження температури деталі камери згорання з теплозахисним покриттям, порівняно з типовим, становить $88^\circ C$. Зміна температури підігріву свіжого заряду, що надходить до циліндрів бензинового ДВЗ, описуватиметься лінійною залежністю

$$\Delta T = (0,2\Delta t + \beta), \quad (2.12)$$

где β - коефіцієнт, що враховує збільшення температури підігріву свіжого заряду в залежності від зміни нагріву деталі (рис. 2.6) і змінюється за законом:

$$\beta = \ln(T_{on} - T_{mn}), \quad (2.13)$$

де T_{on} - температура поверхні теплозахисного шару з боку камери згорання, С;
 T_{mn} - температура тіла деталі під теплозахисним покриттям, °С;
 Δt - різниця нагрівання серійної деталі і деталі з теплозахисним покриттям, °С.

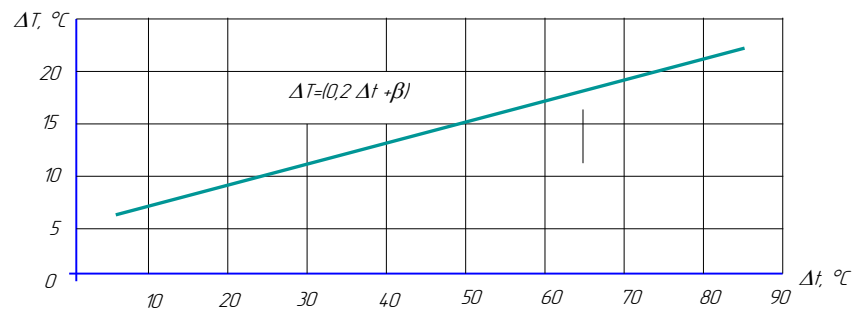


Рисунок 2.6 - Залежність зміни температури підігрівання заряду (ΔT) від зміни температури нагрівання деталей камери згорання (Δt).

Визначальний вплив на потужності та паливно-економічні показники ДВЗ надає коефіцієнт наповнення

$$\eta_v = \frac{G_z}{\rho_0 - V_h} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{P_a}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_a} \cdot \frac{\varphi_d}{1 + \varphi_d \gamma_r}$$

де G_z - дійсна кількість свіжого заряду, що надійшов у циліндр двигуна; ρ_0 - густина свіжого заряду на впуску, г/см³;

V_h - робочий об'єм циліндра, см³;

ε - ступінь стискання двигуна;

P_a - тиск в кінці впуску, МПа;

P_0 - тиск навколишнього середовища, МПа;

T_0 - температура навколишнього повітря, °С;

T_a - температура газів в кінці впуску, °С;

γ_r - коефіцієнт залишкових газів;

φ_d - коефіцієнт дозаряджання.

З урахуванням зміни температури підігріву свіжого заряду за рахунок наявності теплозахисного покриття на деталі камери згорання, вираз для визначення коефіцієнта наповнення набуде вигляду

$$\eta'_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{P_a}{P_0} \cdot \frac{\varphi_d \cdot T_0}{T_0 + 0,2\Delta t + \ln(T_{on} - T_{mn}) + \varphi_d \cdot \gamma_r \cdot T_r}, \quad (2.14)$$

Таким чином, утворення окисованого шару на дно поршня ДВС сприяє зниженню температури підігріву бензоповітряного заряду в порівнянні з ДВС, оснащеним типовим поршнем і. відповідно, до підвищення коефіцієнта наповнення, що дозволить покращити індикаторні та ефективні показники двигуна.

Розрахунки показують, що ДВЗ без покриттів $\eta_v=0,863$, у ДВЗ з теплозахисними покриттями $\eta_v=0,875$.

Для оцінки впливу коефіцієнта наповнення на потужнісні та економічні показники двигуна, проаналізуємо відому формулу індикаторної потужності:

$$N_i = \frac{p_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{30\tau}, \text{ кВт} \quad (2.15)$$

де p_i - середній індикаторний тиск дійсного циклу, МПа; V_h - робочий об'єм одного циліндра, л; n - частота обертання колінчастого вала, хв⁻¹; i - число циліндрів; τ - тактність двигуна.

В свою чергу індикаторний тиск

$$p_i = \frac{H_u p_0 \eta_v \eta_i}{\alpha l_0}, \text{ МПа}, \quad (2.16)$$

де H_u - теплотворна здатність (нижча теплота згорання) палива, кДж/кг; p - індикаторний ККД; α - коефіцієнт надлишку повітря; l_0 - теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг палива, кг повітр./кг.

З урахуванням (2.16) отримаємо

$$p_i = \frac{H_u \eta_i p_0 \eta_v}{\alpha l_0} \cdot \frac{V_h \cdot n \cdot i}{30\tau}, \text{ кВт} \quad (2.17)$$

Величини $H_u \eta_i p_0 \eta_v$ залежать від типу та конструкції двигуна. Тоді для бензинового двигуна індикаторна потужність є функцією від чотирьох змінних параметрів

$$N_i = f(\eta_i, p_0, \eta_v, n). \quad (2.18)$$

Таким чином, змінюючи параметри робочого процесу підвищенням p_0 і η_i можна збільшити індикаторну потужність і, як наслідок, ефективну потужність двигуна, що впливає із співвідношення

$$N_e = N_i \cdot \eta_M, \text{ кВт}$$

де η_M - механічний ККД двигуна.

В формулі (2.17) добуток

$$\frac{H_u \eta_i p_0 \eta_v}{\alpha \ell_0} = Q_T - \text{це кількість теплоти (кДж), підведена з паливом за цикл.}$$

Ступінь ефективності використання теплоти в дійсному циклі ДВЗ оцінюється індикаторним ККД:

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_T} = \frac{p_i \cdot V_h}{Q_T}, \quad (2.19)$$

де L - індикаторна робота циклу, кДж.

Таким чином, як впливає з аналізу формул (2.14) - (2.19), збільшення коефіцієнта наповнення та щільності свіжого заряду сприяють підвищенню індикаторного і ефективного ККД двигуна.

Паливна економічність двигуна оцінюється питомим індикаторним (g_i) та питомим ефективним (g_e) витратами палива, які знаходяться у зворотній залежності від індикаторного ККД:

$$g_i = \frac{3600}{H_u \eta_i},$$
$$g_e = \frac{3600}{H_u \eta_i \eta_M} = \frac{3600}{H_u \eta_e}, \text{ г/кВт год} \quad (2.20)$$

Таким чином, виконаний теоретичний аналіз показників ДВЗ показує, що наявність теплозахисного шару на деталях, що обмежують камеру згорання ДВЗ призведе до зниження температури підігріву заряду, порівняно з типовим поршнем і, відповідно, до підвищення коефіцієнта наповнення, що дозволить поліпшити експлуатаційні показники двигуна.

Висока температура поверхні покриття перш за все впливає на параметри повітряного заряду в циліндрі двигуна в процесі наповнення і стиснення.

В результаті більшого підігріву повітряного заряду в процесі стиснення за наявності покриття на деталях камери згорання, тиск стиснення може зрости.. Більш високі значення температури і тиску повітря в кінці процесу стиснення приводять до скорочення періоду затримки запалювання палива.

Теплозахисні покриття на деталях камери згорання змінюють і сам процес згорання. Відмічається більш м'яка робота двигунів і зниження максимальних тисків згоряють p_r . Кількісні показники зниження швидкості наростання тиску $dp/d\phi$ і p_r на різних двигунах різні і лежать в межах 25...30% для $dp/d\phi$ 4-12% для p_r [10].

Поліпшення процесу згорання і економічності від керамічних покриттів на головці циліндрів відзначають і деякі зарубіжні фірми [12, 13]. Наприклад, випробування головок циліндрів з керамічними покриттями на основі окису церію завтовшки 0,1-0,15 мм проведені фірмою «Дженерал-Моторс» на двигунах, показали, що за рахунок зменшення тепловідводу і випромінювання керамічного покриття поліпшуються процес згоряє і пускові якості двигуна кількість незгорілих вуглеводнів зменшується на 40%, істотно знижуються нагароутворення і спрацювання деталей циліндро-поршневої групи.

Максимальна температура газу з покриттям трохи вище, ніж без покриття, проте вона на 10° повороту колінчастого валу зміщена вбік в. м. т. Це говорить про те що тривалість третьої фази згорання скоротилася в два рази внаслідок підвищення швидкості згорання в основній фазі горіння. Наростання температури газів після запалювання до T_r по куту повороту колінчастого валу з покриттям відбувається швидше, ніж без покриття, але більш плавно при запалюванні. Фактично точку відриву кривої запалювання з покриттям важко відшукати.

Процес від передполумєневих реакцій до запалювання розвивається плавно. В передполумєневий період він швидшає, потім при запалюванні сповільнюється, а в основній фазі згорання знову швидшає. Характерним для головки циліндрів з покриттям є і то що максимальна інтенсивність свічення співпадає з максимальною швидкістю згорання і кінцем подачі палива. Всі ці чинники показують, що основний процес згорання палива закінчується до моменту T_r . Більш круто падає температура газів, до 40° повороту колінчастого валу - догорання закінчується. Завдяки такій зміні процесу згорання, догорання з покриттям завершується швидше, ніж без покриття. Саме такий процес згорання за наявності покриття на головці циліндрів і забезпечує поліпшення економічності двигунів і їх більш м'яку роботу.

Про зміну процесу згоряння з покриттям можна судити і по збільшенню показника характеру згоряння, запропонованого І. І. Вібе [14, 17]. На номінальному режимі при $\varphi_{\text{вип}} = 19^\circ$ повороту колінчастого валу показник m з покриттям збільшується з 0,1 до 0,3, тобто в три рази. Параметр m відображає характер зміни в часі відносної густини ефективних центрів в процесі згоряння, а отже, і хід ефективної хімічної реакції окислення. Цей параметр правильно визначає характер протікання процесу згоряння з покриттям. Дійсно, з дослідів відомо, що чим вище m , тим м'якше процес згоряння; за наявності покриття на головці ми спостерігаємо це на всіх двигунах.

Аналіз результатів дослідження ефективності теплоізолюючих покриттів по робочому процесу і економічності на трьох різних за розміром, швидкохідністю і типом сумішоутворенню двигунах показує що основний вплив на ефективність покриттів надають температурний режим в камері згоряє, правильно вибрані регулювання по моменту подачі палива в циліндр і тип сумішоутворенню. Якщо покриття помірно підвищує температурний режим в камері згоряння, то процес згоряння і економічність поліпшуються.

Таким чином, теплозахисні покриття на деталях камери згорання знижують температури деталей, жорсткість роботи двигуна автомобіля і максимальний тиск газів у циліндрі. Все це сприяє зменшенню теплових і механічних навантажень на деталі, збільшенню строку служби двигунів автомобілів, підвищує можливості по подальшому його форсуванні.

Розділ 3

Дослідження впливу теплофізичних (теплозахисних) покриттів на ефективні параметри двигунів

3.1. Аналітичний розрахунок показників двигуна з теплозахисними покриттями

Для оцінки впливу теплозахисних покриттів на параметри двигуна був виконаний тепловий розрахунок бензинового двигуна вантажного автомобіля середньої вантажопідйомності.

Початковими умовами розрахунку були: ефективна потужність, число циліндрів, тактність двигуна, номінальні оберти колінчастого валу, ступінь стискування. Розрахунок виконувався з використанням програмного продукту MahCAD [18]. Тепловий розрахунок виконувався для чотирьох режимів роботи двигуна.

Повний розрахунок наведено в Додатку А. Для порівняння результатів та оцінки ефективності використання теплозахисних покриттів розрахунок виконувався у двох варіантах: як для двигуна з теплозахисними покриттями камери згорання так і без покриттів (базовий двигун).

Тепловий розрахунок двигуна з камерою згорання захищеною теплозахисними покриттями

Вихідні данні:

ефективна потужність двигуна $N_e := 130$
частота обертання колінчастого вала $n := 3300$
число циліндрів $i := 4$
розташування циліндрів - рядне
система охолодження - рідинна
ступінь стиску $\varepsilon := 6.5$

В процесі розрахунку було внесено корегування для визначення таких параметрів як температура в кінці такту стискування,

Температура в кінці впуску з урахуванням підвищення температури за дії теплозахисного покриття

$$T_{a1} := \frac{T_{a01} \cdot (T_0 + \Delta T01)}{T_0 + \Delta T1} \quad \Delta T01 := 40 \quad T_{a1} = 376.317$$

$$T_{a2} := \frac{T_{a02} \cdot (T_0 + \Delta T02)}{T_0 + \Delta T2} \quad \Delta T02 := 45 \quad T_{a2} = 394.298$$

$$T_{a3} := \frac{T_{a03} \cdot (T_0 + \Delta T03)}{T_0 + \Delta T3} \quad \Delta T03 := 50 \quad T_{a3} = 398.975$$

$$T_{a4} := \frac{T_{a04} \cdot (T_0 + \Delta T04)}{T_0 + \Delta T4} \quad \Delta T04 := 52 \quad T_{a4} = 402.541$$

коефіцієнту наповнення

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_{v1} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T1} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz1} \cdot \varepsilon \cdot P_{a1} - \phi_0 \cdot P_{r1}) \quad \eta_{v1} = 0.891$$

$$\eta_{v2} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T2} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz2} \cdot \varepsilon \cdot P_{a2} - \phi_0 \cdot P_{r2}) \quad \eta_{v2} = 0.783$$

$$\eta_{v3} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T3} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz3} \cdot \varepsilon \cdot P_{a3} - \phi_0 \cdot P_{r3}) \quad \eta_{v3} = 0.849$$

$$\eta_{v4} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T4} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz4} \cdot \varepsilon \cdot P_{a4} - \phi_0 \cdot P_{r4}) \quad \eta_{v4} = 0.843$$

тиску в кінці такту стискання

Тиск в кінці процесу

$$P_{c1} := P_{a1} \cdot \varepsilon^{n_{11}} \quad P_{c1} = 1.418 \quad \text{МПа}$$

$$P_{c2} := P_{a2} \cdot \varepsilon^{n_{21}} \quad P_{c2} = 1.323 \quad \text{МПа}$$

$$P_{c3} := P_{a3} \cdot \varepsilon^{n_{31}} \quad P_{c3} = 1.285 \quad \text{МПа}$$

$$P_{c4} := P_{a4} \cdot \varepsilon^{n_{41}} \quad P_{c4} = 1.241 \quad \text{МПа}$$

температура в кінці процесу стискання

$$\begin{aligned}
T_{f1} &:= 692 \\
T_{c1} &:= T_{c01} \cdot \frac{T_{a1}}{T_{f1}} \cdot \varepsilon^{n_{11}-1} & T_{c1} &= 985.936 \\
T_{f2} &:= 706 \\
T_{c2} &:= T_{c02} \cdot \frac{T_{a2}}{T_{f2}} \cdot \varepsilon^{n_{21}-1} & T_{c2} &= 1143.427 \\
T_{f3} &:= 703 \\
T_{c3} &:= T_{c03} \cdot \frac{T_{a3}}{T_{f3}} \cdot \varepsilon^{n_{31}-1} & T_{c3} &= 1071.1 \\
T_{f4} &:= 704 \\
T_{c4} &:= T_{c04} \cdot \frac{T_{a4}}{T_{f4}} \cdot \varepsilon^{n_{41}-1} & T_{c4} &= 1195.117
\end{aligned}$$

Для виконання порівняльного аналізу розрахунки параметрів представлено у вигляді графіків (рис. 3.1 -3.3).

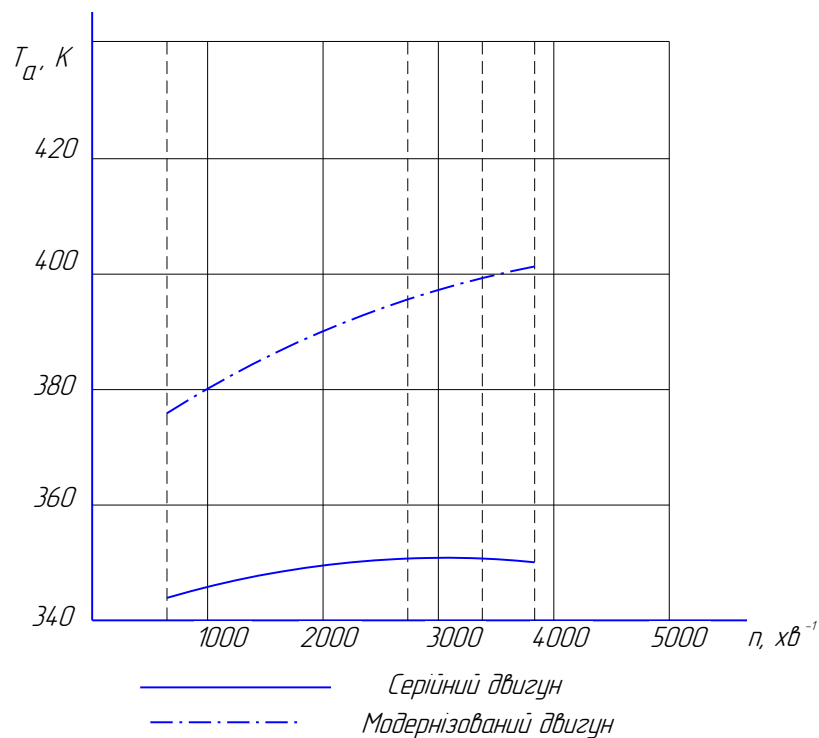


Рисунок 3.1 – Температура в кінці такту впускання

Розрахункова температура в кінці такту впуску внаслідок використання теплозахисних покриттів збільшується на різних режимах від 8 до 13%.

Тиск в кінці такту стиснення підвищується від 8 до 20%, температура в кінці такту стиснення підіймається від 100 до 180 К.

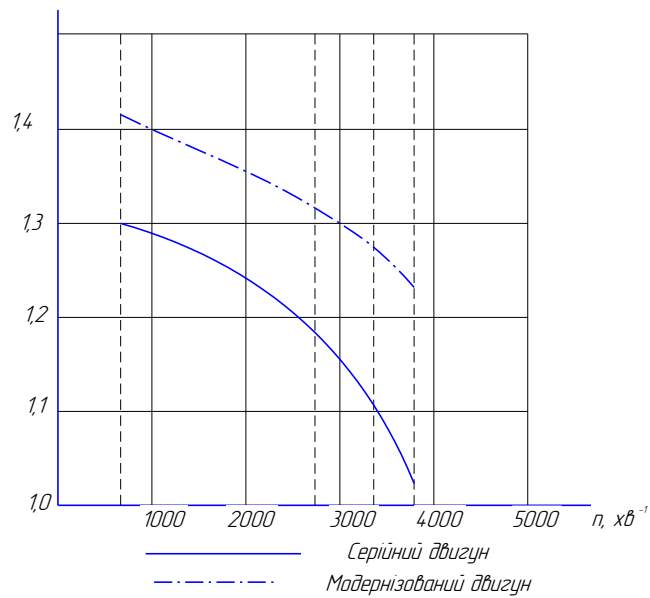


Рисунок 3.2 – Тиск в кінці такту стиснення

Температура в кінці такту стиснення (рис. 3.3) у двигунах з теплозахисними покриттями збільшується від 15 до 30%.

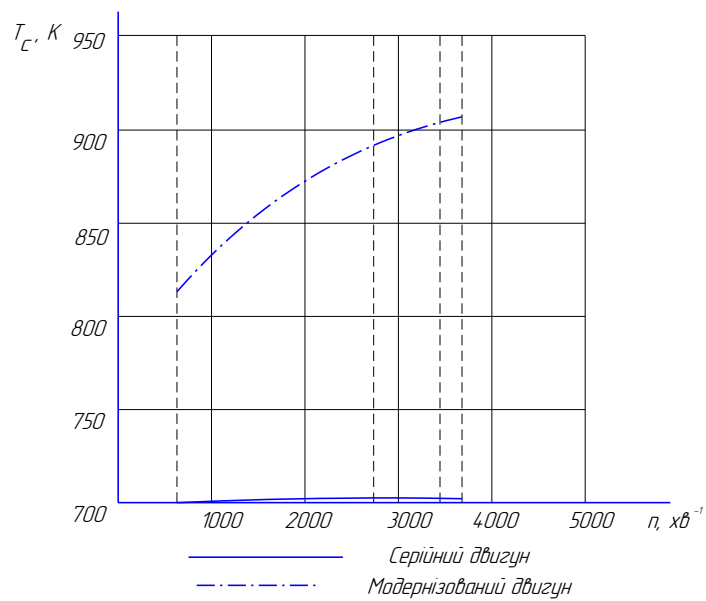


Рисунок 3.3 - Температура в кінці такту стиснення

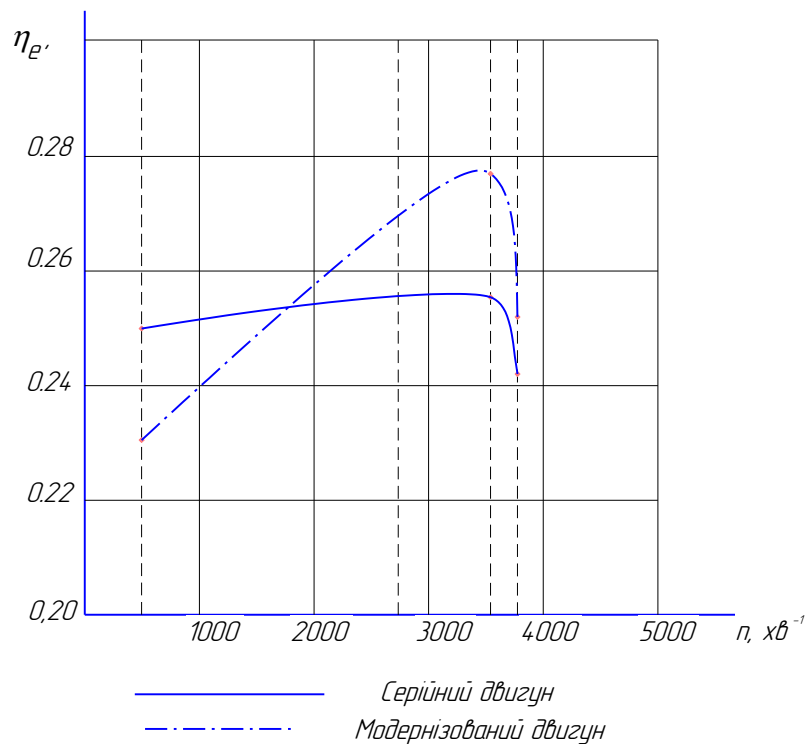


Рисунок 3.4 - Зміна ефективного ККД на різних режимах роботи двигуна

Внаслідок змін параметрів робочого циклу двигуна відмічається підвищення ККД на номінальному режимі на 11%, проте на режимі холостого ходу ККД нижчий на 8% (рис. 3.4).

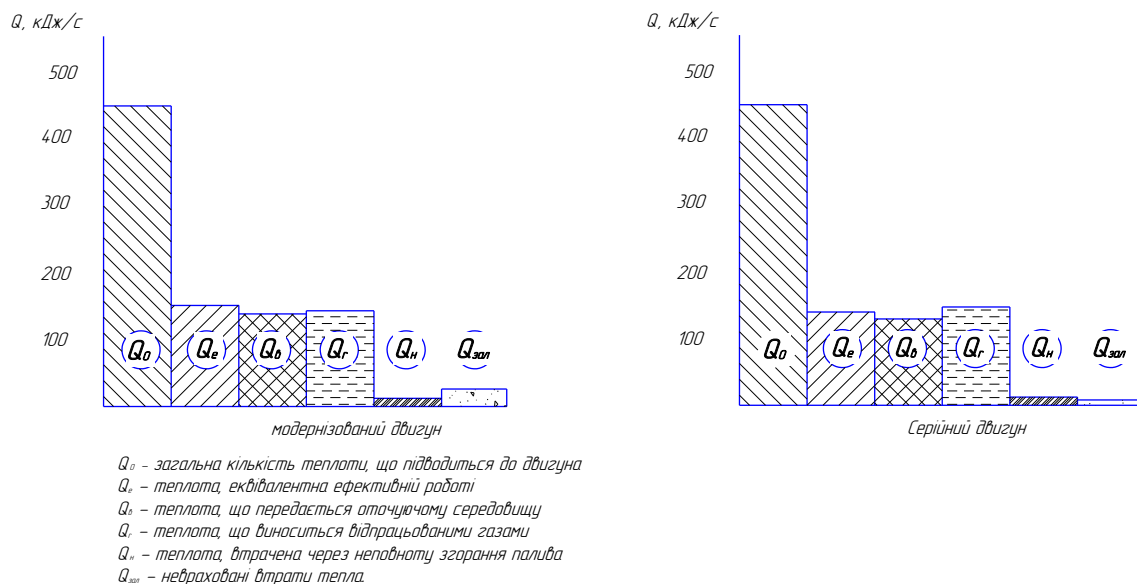


Рисунок 3.5 - Баланс теплоти на номінальному режимі роботи двигуна

Баланс теплоти для серійного та модернізованого двигуна вказує на певне перерозподілення теплоти, наприклад дещо зростає теплота, що використовується на ефективну роботу (рис. 3.5).

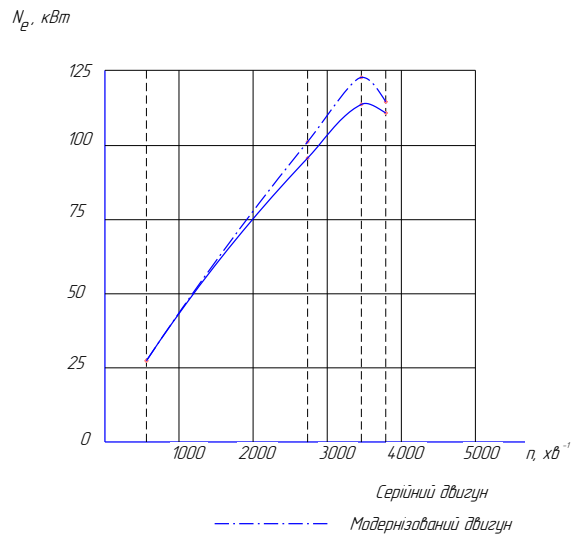


Рисунок 3.6 - Зміна ефективної потужності залежно від частоти обертання колінчастого валу

Ефективна потужність двигуна на номінальному режимі підвищується на 7-8% (рис. 3.6).

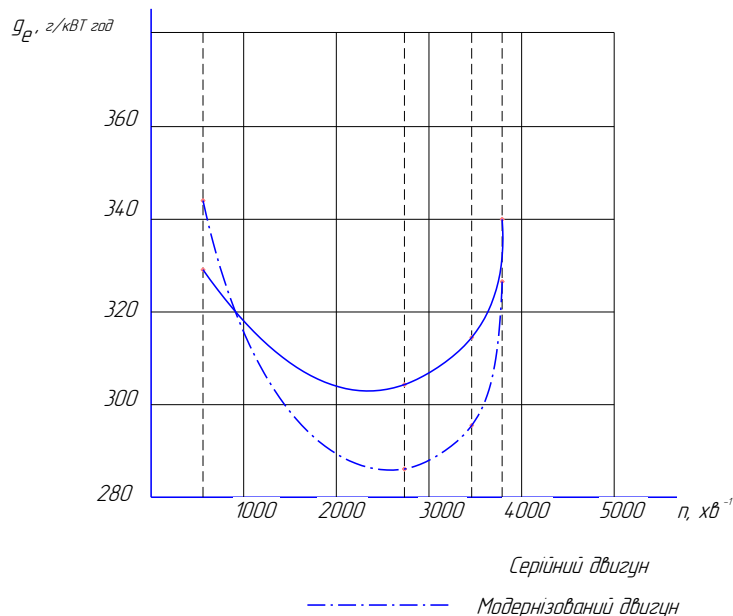


Рисунок 3.7 – Залежність ефективної питомої витрати палива від обертів колінчастого валу

Також спостерігається зниження питомої ефективної витрати палива на 6% (рис. 3.7) і погодинної витрати палива на 7% (рис. 3.8).

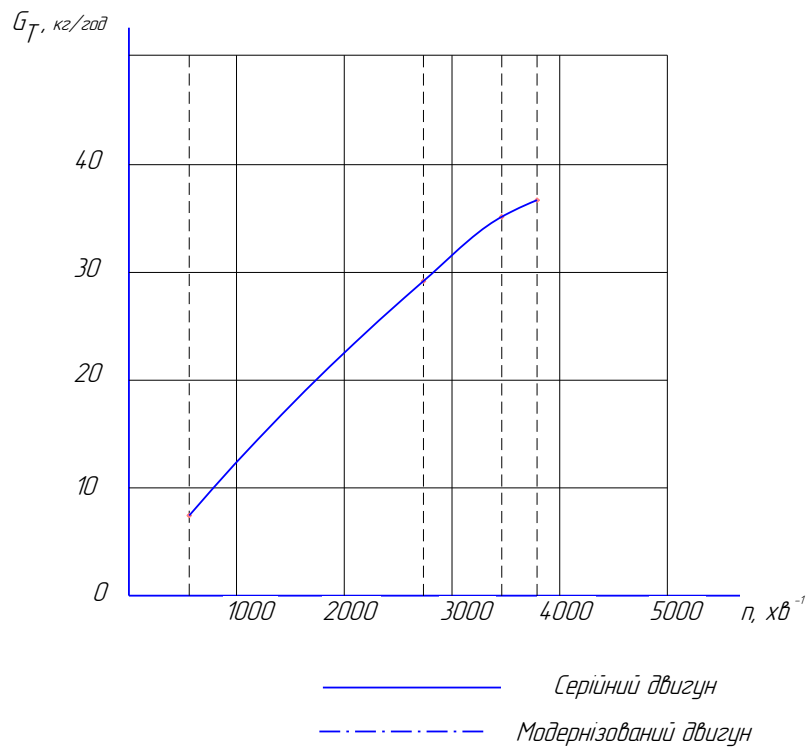


Рисунок 3.8 - Залежність погодинної витрати палива від обертів двигуна

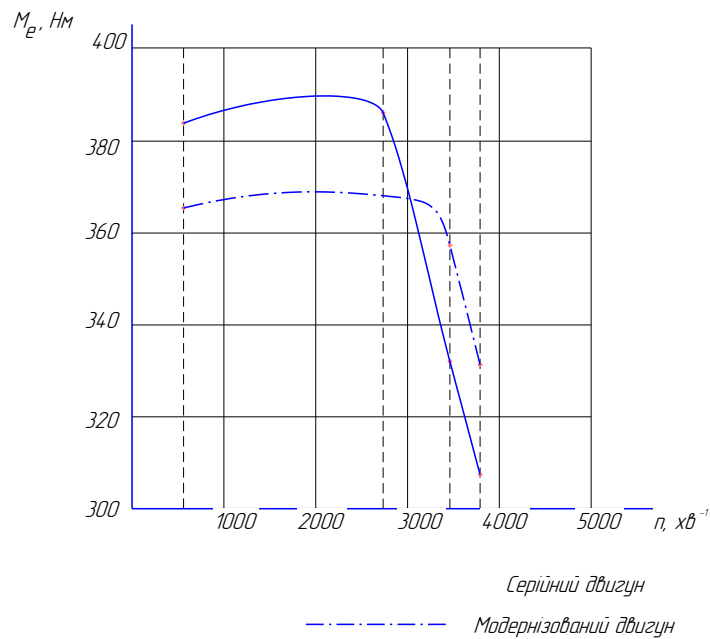


Рисунок 3.9 - Зміна крутного моменту від обертів двигуна

Крутний момент двигуна на номінальну режимі підвищується на 8%, проте на режимі холостих обертів та середніх навантажень спостерігається менші значення крутного моменту у двигунів з теплозахисними покриттями.

3.2. Вибір матеріалу та методу нанесення теплозахисних покриттів

Оптимальними методами нанесення теплофізичних (теплозахисних) покриттів є методи газотермічного напилювання [22].

Процес високотемпературного напилювання покриттів складається з трьох стадій.

1. Утворення активних дисперсних частинок матеріалу, що напилюється в генераторах високотемпературних газових струменів. Залежно від типу і конструкції генератора (плазмотрон, газополум'яний пальник, електродуга металізатор, детонаційна установка, високочастотний генератор, індукційні генератори і т. д.), форми що вводиться в нього матеріалу, газового середовища, теплофізичних і енергетичних умов на виході з генератора формується високотемпературний струмінь, що несе в собі частинки матеріалу, що напилюється.

2. Транспортування матеріалу, що напилюється. Процес постачання матеріалу функціонально пов'язаний з характеристиками першої стадії, що має і свої особливості, пов'язані з фізичними властивостями середовища, через яке він здійснюється (склад середовища, тиск, температура, дистанція напилювання), а також з характеристиками струменя (розподілом температур, швидкостей частинок, відстань струменя), фізико-хімічними процесами, які протікають в матеріалі в процесі транспортування (хімічна взаємодія з середовищем і взаємодія компонентів матеріалу).

3. Формування покриття. Процес формування покриття починається з моменту удару частинки об поверхню субстрату і адгезії частинки до поверхні. Залежно від технологічних чинників формування покриттів протікає як дискретне з'єднання частинок, що створюють багатошарову гетерогенну структуру, закріплену на підкладці і з нею взаємодіючу.

Характеристики кожної подальшої стадії залежать від попередньої, а умови формування покриття і його основні властивості - адгезія - залежать також і від фізичного стану основного матеріалу.

Процес високотемпературного напилювання є складовою частиною всього процесу нанесення захисного покриття, що включає в себе елементи технологічної

підготовки поверхні, що покривається, матеріали напилювання і підкладки, проведення процесу напилювання і подальшої обробки напиленого виробу (термічної, механічної) [20, 21].

У газоелектричних процесах для створення високотемпературного потоку використовують теплову дію електричної дуги, плазмового струменя, індукційного нагрівання струмами високої частоти та інші.

Газоелектричні методи напилювання - одні з найбільш поширених способів отримання металевих покриттів поверхонь нанесенням на ці поверхні розплавленого металу. «Сутність процесу - метал, розплавлений дугою або палим газом і розпорошений струменем стисненого повітря, покриває поверхню деталі, що відновлюється.

Залежно від джерела розплавлення металу розрізняють *електродугове, плазмове та детонаційне* напилювання» [22].

Застосовуючи газоелектричні методи напилювання необхідно враховувати, що шар, нанесений на поверхню деталі, не підвищує її міцності. Тому застосовувати ці способи для відновлення деталей з ослабленим перерізом не слід. При відновленні деталей, що знаходяться під дією динамічних навантажень, а також деталей, що працюють при терті без мастильних матеріалів, необхідно знати, що зчеплення напиленого шару з основним металом деталі недостатня.

Газополуменеве напилювання. При газополуменовому напилюванні високотемпературний потік створюється при згоранні палих газів (ацетилену, водню, метану та інш.) в атмосфері кисню або повітря [26]. Температура полум'я горючих газів у суміші з киснем — 2000...3200 °С, у суміші з повітрям — 500...900°С.

Апарати для газополуменового напилювання в залежності від виду матеріалу, що напилюється, існують двох типів: дротяні і порошкові.

Основними елементами газополуменових пальників є соплова система, пристрій подачі дроту або порошку, привід цього пристрою (повітряна турбіна, пневматичний або електричний двигун), елемент управління, з'єднання подачі пального газу і стисненого повітря (кисню), корпус з рукояткою (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Схема газополуменевого нанесення покриття

Пальники можуть бути ручними та машинними. У дротяних пальниках використовується дріт діаметром від 1,5 до 5,0 мм. Залежно від товщини дроту, що розпилюється, мають продуктивність в ручному режимі роботи для сталі і алюмінію від 1,5 до 8,5 кг/год; при напилюванні порошків карбіду вольфраму - 4...9, окису алюмінію - 1,5...3,0 кг/год.

Переваги газополуменевого напилювання - це висока дисперсність частинок, що розпилюються, незалежність від джерела струму, простота обслуговування, низька вартість обладнання. Недоліки - мала продуктивність і велика вартість матеріалів, що напилюються [20,26].

Основа процесу газополуменевого нанесення матеріалів - пластифікація порошку у високотемпературному джерелі тепла (ацетилено-кисневому полум'ї) та нанесення його газовими потоками на попередньо підготовлену зношену поверхню.

Переваги газополуменевого напилювання - це висока дисперсність частинок, що розпилюються, незалежність від джерела струму, простота обслуговування, низька вартість обладнання. Недоліки - мала продуктивність і велика вартість матеріалів, що напилюються [20,26].

Основа процесу газополуменевого напилювання матеріалів - пластифікація порошку у високотемпературному струмені (ацетилено-кисневому полум'ї) та

напилювання його високошвидкісними потоками на заздалегідь підготовлену зміцнювану поверхню.

Переваги газополуменевого нанесення порошкових матеріалів полягають у локальності обробки, незначному впливі на підкладку, можливості напилювання захисних покриттів на деталі значних розмірів, відсутність обмежень на спорідненість матеріалів покриття та підкладки, що дає можливість застосовувати значну номенклатуру ремонту зношених деталей.

Газополум'яне напилювання має переваги перед плазмовим - простота апаратури, низький рівень шуму. Головними недоліками методу є: вибухонебезпечні киснево-ацетиленові суміші, низька тепломісткість і швидкість закінчення струменів наявність окислювальної атмосфери і т.д.

«Залежно від призначення та матеріалу деталі, умов експлуатації, контактів поверхонь, що сполучаються, при відновленні деталей використовують наступні методи газополуменевого нанесення покриттів:

- без подальшого оплавлення - використовується для відновлення деталей зі зносом до 2,0 мм на бік без деформації, спотворення або зміни структури основного металу, що не піддаються в процесі експлуатації ударам, знакозмінним навантаженням, великому нагріванню;

- з одночасним оплавленням — використовується для відновлення деталей з місцевим зносом до 3...5 мм, що працюють при знакозмінних та ударних навантаженнях, виготовлених із сірого чавуну, конструкційних, корозійностійких сталей та ін.

- з подальшим оплавленням - дає можливість відновити деталі типу валу зі зносом до 2,5 мм на бік. Відновлені деталі стійкі проти корозії, зношування абразивного, дії високих температур » [22].

Технологічний процес газополуменевого методу нанесення покриттів складається з наступних етапів:

- нагрівання поверхні деталі до 200...250°C;
- нанесення підшару, що дає основу, необхідну для накладання основних шарів;

- нанесення основних шарів, що дозволяють одержати покриття з необхідними фізико-механічними властивостями.

На міцність зчеплення покриттів з основою впливають: спосіб підготовки поверхні та абразивний матеріал, що використовується при цьому; параметри струминної обробки; час витримки після обробки; наявність попереднього підігріву; застосування підшару; використання терморегулюючих порошків: спосіб розпилення; ефективна потужність полум'я; параметри процесу розпилення; склад матеріалу покриття (наявність поверхнево-активних добавок у покритті залежить і від обладнання, що застосовується, і від присадочних матеріалів).

Електродугове напилювання. Процес електродугового напилювання здійснюється спеціальним апаратом, що діє в такий спосіб. За допомогою протяжних роликів по напрямних наконечниках безперервно подаються два дроти, до яких підключено електричний струм. Електрична дуга, що виникає між дротом, розплавляє метал (рис. 3.11). Одночасно повітряним соплом в зону дуги надходить стиснутий газ під тиском 0,6 МПа. Велика швидкість руху частинок металу (120...300 м/с) і незначний час польоту, що обчислюється тисячними частками секунди, зумовлюють в момент удару об деталь її пластичну деформацію, заповнення частинками пор поверхні деталі, зчеплення частинок між собою і з поверхнею, внаслідок чого утворюється суцільне покриття. Послідовним нашаровуванням розплавленого металу можна отримати покриття.

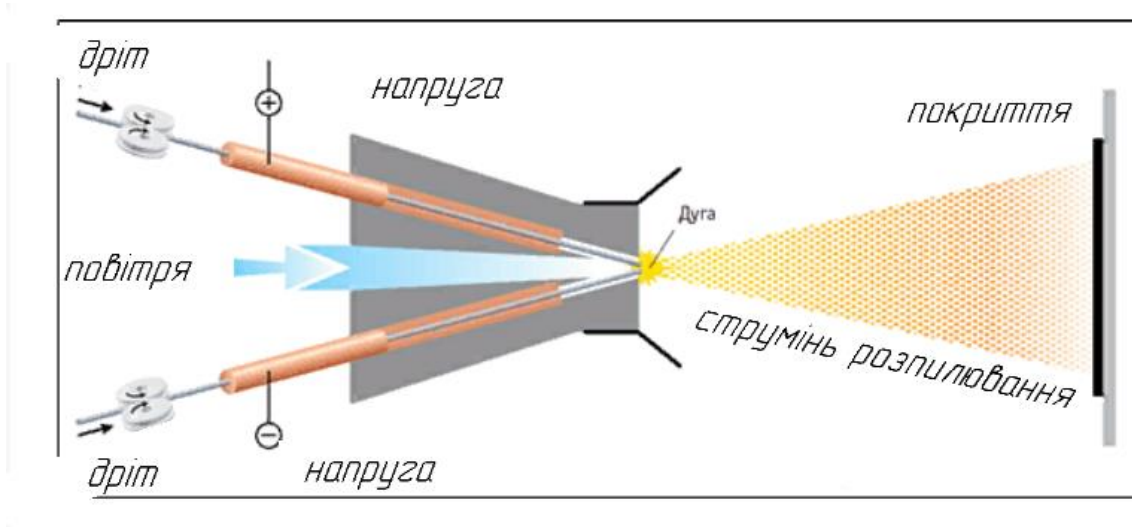


Рисунок 3.11 – Схема процесу електродугової металізації

Формування високотемпературного газового потоку при електродузі металізації здійснюється електричною дугою в потоці стислого повітря.

При подачі потенціалів на два дротяні електроди, що рухаються за допомогою спеціального механізму, дроту плавляться і розплавлені дисперсовані краплі металу повітряним струменем розпиляти на поверхню виробу. За рахунок термічної іонізації температура дуги досягає 6000°C . Швидкість витікання потоку залежить від тиску повітря і складає 100 - 300 м/с. Розмір відривних від краю розплавленого дроту частинок металу коливається в широких межах (1-100 мкм) а кількість їх дуже велика - для сталі воно складає 7000 крапель в секунду.

Порівняння напилювання електродуги і газополум'яної на вітчизняних апаратах показало відносну рівноцінність їх - по одних показниках газополум'яний спосіб краще, по іншим - гірше електродуги.

Особливістю електродугового напилювання є утворення кількох максимумів у струмені розпилення. Це пов'язано з тим, що струмінь стисненого повітря розсікається електродними дротами на два або три потоки, залежно від числа дротів, що подаються в осередок плавлення. У кожному із цих потоків утворюється своя вісь максимальної концентрації розпорошених частинок.

Живлення електричної дуги здійснюється змінним чи постійним струмом. Працюючи на постійному струмі дуга горить безупинно, на змінному струмі вона періодично відновлюється. При використанні постійного струму процес плавлення більш стабільний, дисперсність частинок і щільність покриттів, що одержуються вище, ніж при застосуванні змінного струму [22].

Установка для електродугової металізації включає електродуговий пальник (рис. 3.12), матеріал, що напилюється, у вигляді дроту і джерело електроживлення. Робоча напруга дорівнює 18...40 В, сила струму — 100... 140 А. Продуктивність електродугової установки вища, ніж при газополум'яному напилюванні, і становить: для сталі — 5...70, бронзи — 60...90, алюмінію - 3 ... 37, цинку - 10 ... 140 кг / год.



Рисунок 3.12 – Пальник для електродугової металізації

Напилений шар нестійкий до ударних, механічних, коливальних навантажень і до скручування.

Найбільші обсяги робіт із напилювання виконують переносними (ручними) пальниками ЕМ-3А, ЕМ-14 та верстатними - КДМ-2, ЕМ-6, ЕМ-12.

Твердість регулюється підбором вихідного матеріалу або режиму охолодження в процесі покриття.

Плазмове напилювання. Плазмове напилювання - це процес нанесення покриттів, при якому для розплавлення та перенесення матеріалу на поверхню деталі використовуються теплові та динамічні властивості плазмового струменя [22, 30].

Будову плазмотронів показано на рис. 3.13. Потрапляючи в плазмовий струмінь, порошок розплавляється і набуває певної швидкості польоту, яка досягає найбільшої величини на відстані 50... 80 мм від зрізу сопла плазмотрона. На цій відстані доцільно розташовувати деталь.

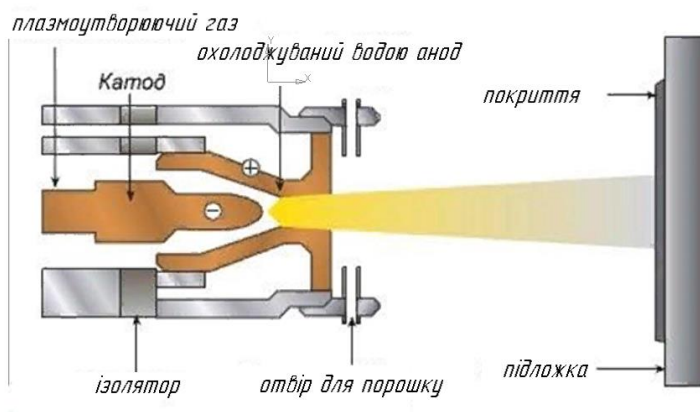


Рисунок 3.13 - Схема процесу плазмового напилювання

Переваги плазмового напилювання: цим способом вдається наносити покриття з усіх матеріалів, які не розкладаються та не випаровуються при звичайних температурах (окисли, нітриди, карбіди та багатокомпонентні матеріали, які називаються псевдосплавами); витрати на отримання азотної плазми вдвічі менші за вартість киснево-ацетиленового полум'я при еквівалентних виділеннях енергії; процес дозволяє повністю автоматизувати технологію; можливість нанесення покриттів на деталі різноманітної конфігурації (плоскі, криволінійні поверхні, тіла обертання).

При плазмовому напилюванні продуктивність плазмотронів становить від 2 до 20 кг/год. Однак, порівняно з електродуговим напилюванням плазмове має меншу продуктивність [21,26].

Комплекс обладнання для плазмового напилювання показано на рис. 3.14.

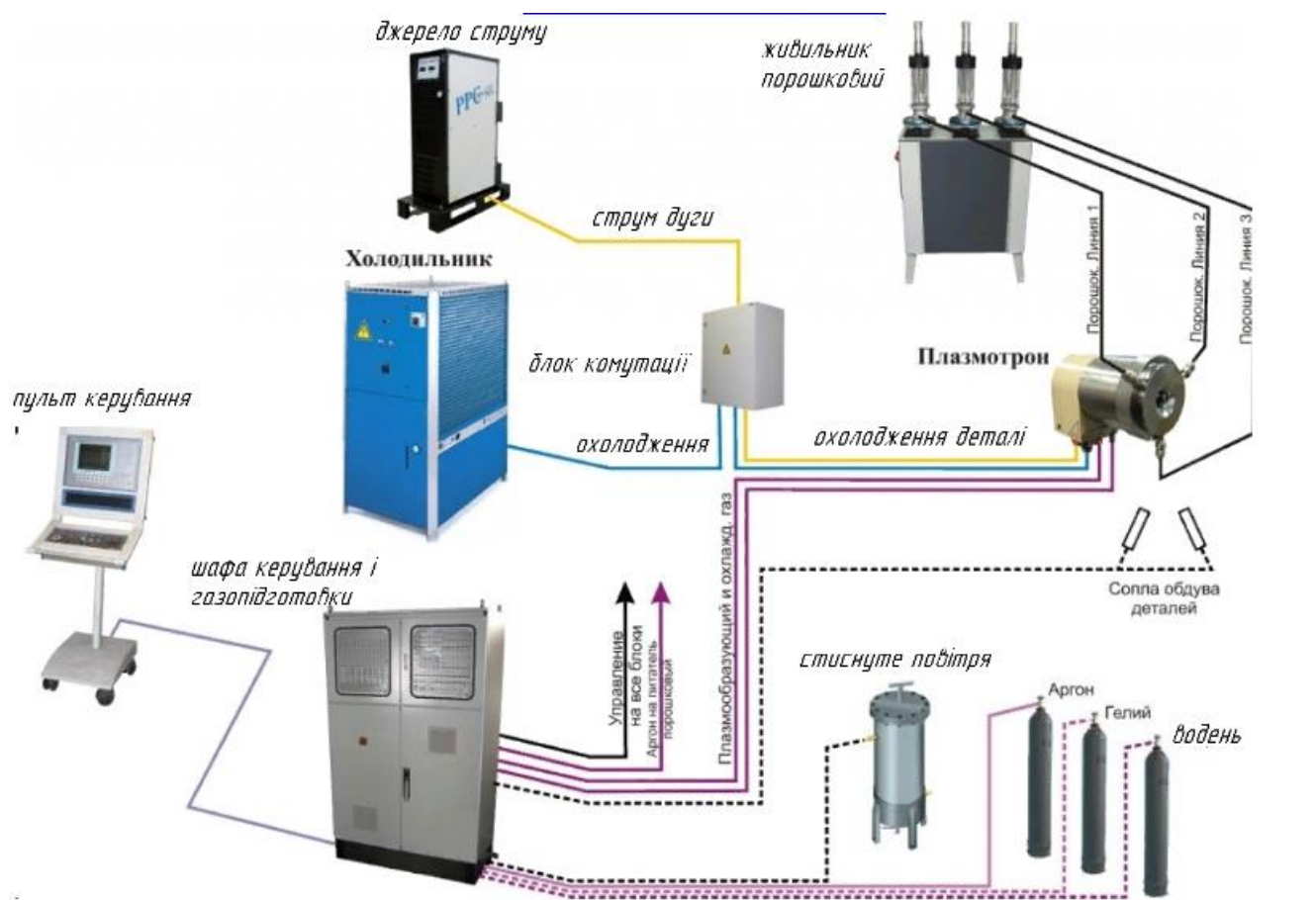


Рисунок 3.14 - Комплекс обладнання для плазмового напилювання.

Технологічний процес підготовки поверхонь при плазмовому напилюванні покриттів на циліндричні, а також фігурні та плоскі поверхні, зношування яких не перевищує 1,0...1,5 мм, передбачає наступні операції:

- очищення деталей від бруду, масляних та смолистих відкладень, а при нерівномірному їх зносі - механічну обробку для усунення нерівностей та надання поверхні правильної геометричної форми;
- сушіння деталей після промивання в сушильній шафі при температурі 80 ... 150 ° С або обдування стисненим повітрям;
- механічну обробку залежно від виду деталі та місця напилювання.

Напилені плазмові покриття мають підвищену твердість, крихкість і знижену теплопровідність через оксидні включення і пор у шарі покриття [20,21]. Негативний вплив має якість напиленого плазмового покриття і різниця в коефіцієнтах термічної напруги, що виникає в процесі напилювання. Все це визначає ряд особливостей подальшої обробки покриття. Застосування звичайних режимів у процесі механічної обробки призводить до виникнення тріщин, сколів та додаткових термічних напруг. Для механічної обробки плазмових покриттів необхідно використовувати алмазний інструмент. Приступати до чистової обробки деталей з плазмовим покриттям слід не раніше ніж через 24 години після напилювання у зв'язку з необхідністю повної релаксації внутрішньої напруги в деталях і покриттях. При правильному шліфуванні покриття не має виглядати глясовим або полірованим. Шліфування проводиться з подачею охолоджуючої рідини, що фільтрується (найкращим варіантом є вода з добавкою 5% емульсолу при витраті 0,6...0,85 л/хв).

Детонаційне напилювання. Детонаційні покриття формуються за допомогою ударних хвиль, що періодично ініціюються мікробибухами суміші кисню та ацетилену.

Установка детонаційного напилювання (рис. 3.15) складається з камери згоряння, виконаної спільно з водоохолоджуваною трубою-створом 5, електричної свічки 2, газопроводом по кисню та ацетилену 7, порошкового дозатора 4, джерела

струму 3. Деталі встановлюються на мішені на відстані 70... 150 мм від краю створа детонаційної гармати.

Технологія нанесення покриття полягає в наступному:

- подача кисню та ацетилену в камеру згоряння; подача дозованої кількості порошку, що напильюється, з живильника в потоці азоту; суміш кисню та ацетилену підпалюється електричною іскрою; вибух (виділяється велика кількість тепла); зростання тиск у трубці-стволі; постріл порошку з трубки-ствола у напрямку мішені.

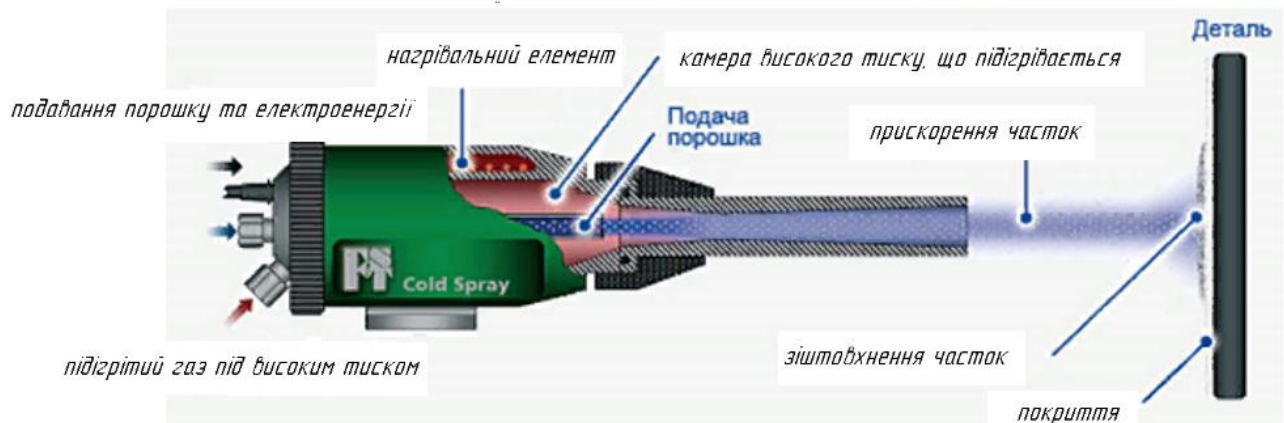


Рисунок 3.15 – Схема процесу детонаційного напильювання

В результаті вибуху і після нього до камери безперервно надходить азот, що захищає газові клапани від дії вибуху і очищає від продуктів згоряння стовбура та камеру згоряння.

Цикл вибуху триває 0,23, тобто, за секунду проводиться 3...4 вибухи.

При кожному вибуху на обмежену ділянку поверхні наноситься покриття завтовшки 6,3 мкм. Послідовним нанесенням порошку окремі ділянки створюються суцільні покриття. Зазвичай це досягається переміщенням деталі відносно каналу ствола.

У вибуховій хвилі газ стискається до тиску десятків атмосфер із температурою кілька тисяч градусів. Незважаючи на високі температури, що розвиваються в місці контакту частинок порошку з підкладкою, деталь не нагрівається до температури понад 200 °С.

Рівень шуму при роботі детонаційної установки - 140 дБ, що вище межі допустимої техніки безпеки (80 дБ). Тому установка поміщається в звуконепроникну камеру та керується оператором, розташованим за перегородкою.

Після досягнення детонаційною хвилею відкритого кінця ствола вона захоплює частинки, що напилуються, і у вигляді двофазного потоку (продукти детонації та частинки, що напилуються) рухається до мішені. Швидкість потоку на виході зі ствола становить 875 м/с, матеріал покриття викидається вибуховою хвилею на оброблювану поверхню зі надзвуковою швидкістю.

У двофазному потоці продукти детонації нагріваються і прискорюють частинки, що напилуються, які можуть плавитися і випаровуватися. Поблизу оброблюваної підкладки потік газу гальмується та розтікається вздовж поверхні. Покриття може формуватися з повністю розплавлених частинок і суміші розплавленого і нерозплавленого матеріалів. Висока швидкість в момент удару та висока температура в зоні взаємодії викликають приварювання та кристалізацію частинок порошку на поверхні підкладки.

На відміну від газополум'яних та плазмових методів детонаційні покриття формуються при більш високих швидкостях частинок та наявності більших непроплавлених частинок наприкінці двофазного потоку. Це призводить до ефектів ударного пресування та абразивної дії потоку на поверхню, в результаті чого можливе відділення частинок покриття від підкладки та збільшення щільності вже сформованого покриття [22].

Формування першого шару детонаційного покриття характеризується щільним приляганням до підкладки та відсутністю пір. Це пов'язано з плавленням мікрооб'ємів поверхні, що обробляється, перемішуванням матеріалу підкладки з покриттям, що сприяє утворенню міцного зв'язку. Незважаючи на низьку загальну температуру підкладки (200 ... 250 ° C), Контактна температура в окремих точках досягає температури плавлення сталі (1500 ° C).

Пори, що утворюються при напилуванні першого шару, при формуванні наступних шарів зменшуються об'ємом або зникають в результаті ефекту гарячого ударного пресування.

Двофазний потік ударної хвилі неоднорідний по довжині. нерозплавленого металу він мінімальний на початку потоку і максимальний наприкінці.

Внаслідок впливу непроплавлених частинок наприкінці двофазного потоку відбувається відділення верхніх шарів покриття (ефект абразивного відділення). Верхні шари покриття слабо пов'язані з матеріалом покриття через відсутність додаткового зміцнення при напилюванні наступних шарів і велику кількість нерозплавлених частинок.

Зносостійкість поверхневих шарів покриття завтовшки 10...30 мкм низька. Не вдається нанести твердосплавне покриття на гладку поверхню, що має високу твердість. Причиною цього є такі процеси:

- при напилюванні тверді нерозплавлені частинки (наприклад, карбід, вольфрам) впроваджуються у підкладку; інші частинки, потрапляючи на гарячий шар металу, проникають до нього, входячи до складу покриття;
- частинки карбіду, потрапляючи на впроваджені частинки карбіду, відскакують від неї і не беруть участь у формуванні покриття.

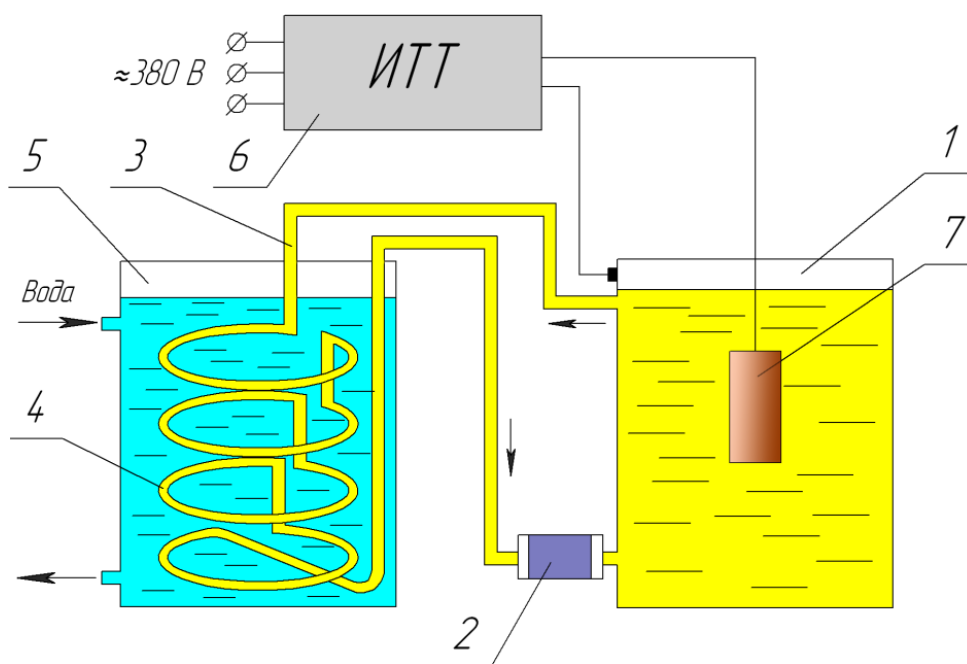
Товщина детонаційних покриттів зазвичай становить 40...220 мкм. Покриття складається з трьох зон: перехідна зона завтовшки 5...30 мкм визначає міцність зчеплення покриття з підкладкою; основна зона, товщина якої в залежності від призначення покриття становить 30...150 мкм; поверхнева зона товщиною 10...40 мкм зазвичай видаляється при довідкових операціях.

Детонаційними методами напилюють порошки чистих металів - Ni, Al, Mo, N, а також оксидів, карбідів, нітридів і т.д.

Мікродугове оксидування. Мікродугове оксидування (МДО) або плазмове-електролітичне оксидування (ПЕО) – це різновид електрохімічної та одночасно хіміко-термічної обробки металів [15]. При МДО поверхня вентильних металів перетворюється за допомогою електричних (мікродугових) розрядів на оксидний шар, який відрізняється від базового матеріалу значно вищими характеристиками [15]. Вентильними називають метали, оксиди яких мають асиметрію провідності, тобто мають вентильні властивості. Основні вентильні метали, що застосовуються в промисловості, - це алюміній, магній, титан, цирконій, тантал і деякі інші, а також їх

сплави. МДО дозволяє синтезувати робочі шари на основі оксидної кераміки та мінералів складного складу, які дуже складно одержати іншими способами [15].

У основі процесу МДО лежить процес анодного окислення (анодування) металів (рис. 3.16). Однак МДО відрізняється підвищеною напругою процесу (в діапазоні 300...1000 В) і використанням змінного струму (анодно-катодного процесу). Головна особливість анодно-катодного процесу полягає в тому, що катодні розряди, зберігаючи температуру, горять при менших напругах, оскільки оксидний шар, сформований в анодному розряді, має уніполярну провідність.



1 – ванна; 2 – насос; 3 – шланги; 4 – охолоджувач; 5 – емність; 6 – джерело струму; 7 – деталь;

Рисунок 3.16 – Схема мікродугового окисдування

Утворення першого шару покриття, нанесеного детонаційним напилюванням обумовлюється щільним приляганням до основи та відсутністю порожнин. Це пояснюється плавленням мікроб'ємів поверхневого шару, , перемішуванням матеріалу основи з МА серіалом покриття, що приводить до утворенню надійного зв'язку. З огляду на низьку загальну температуру основи (близько 200 ... 250 С), температура поверхні в окремих зонах досягає температури плавлення заліза (1500 С).

Пори, що мають місце при напилюванні першого шару покриття, при утворенні наступних шарів мають менші об'єми або взагалі відсутні через ефект гарячого ударного пресування.

Двофазний струмінь ударної хвилі має певну неоднорідність по довжині. Він має мінімальну довжину на початку потоку і більшу проявність наприкінці струменю.

Внаслідок дії непропавлених часток наприкінці двофазного потоку спостерігається відокремлення верхніх шарів покриття (тобто ефект абразивного відкоремлення). Верхні шари покриття слабо пов'язані з основним матеріалом покриття у зв'язку з відсутністю додаткового зміцнення при напилюванні послідовних шарів і велику кількість нерозпавлених частинок.

Відносна зносостійкість верхніх поверхневих шарів захисних покриттів завтовшки 10...30 мкм невисока. Складно наносити твердоспавне шар на гладку поверхню деталі, яка має високу твердість. Це пояснюється наявністю наступних процесів:

- при напилюванні тверді нерозпавлені частинки (наприклад, кераміка, карбіди, вольфрам) впроваджуються у проміжний шар покриття; інші частинки, потрапляючи на гарячий шар матеріалу, впроваджуються до нього, формуючи таким чином захисне покриття;

- тверді частинки карбіду, потрапляють напередньо впроваджені частинки , відскакують від них і не приймають участь у утворенні покриття.

Товщина детонаційних покриттів зазвичай становить 40...220 мкм. Покриття складається з трьох зон: перехідна зона завтовшки 5...30 мкм визначає міцність зчеплення покриття з підкладкою; основна зона, товщина якої в залежності від призначення покриття становить 30...150 мкм; поверхнева зона товщиною 10...40 мкм зазвичай видаляється при довідкових операціях.

Детонаційними методами напилюють порошки чистих металів - Ni, Al, Mo, N, а також оксидів, карбідів, нітридів і т.д.

Мікродугове оксидування (МДО). «Цей метод має також назву плазмове-електролітичне оксидування і являє собою технологічний варіант електрохімічної ,

а також хіміко-термічної обробки металів» [15]. При МДО поверхня вентильних металів змінюється під дією електричних (невеликих мікродугових) розрядів на оксидний шар, який має відмінності від базового матеріалу деталі значно вищими характеристиками [15]. «Вентильними металами є такі, , оксиди яких володіють асиметрією електричної провідності, тобто характеризуються вентильними властивостями. Основні вентильні метали, що застосовуються в промисловості, - це алюміній, магній, титан, цирконій, тантал і деякі інші, а також їх сплави. МДО дозволяє синтезувати робочі шари на основі оксидної кераміки та мінералів складного складу, які дуже складно одержати іншими способами» [15].

У основі процесу МДО лежить процес анодного окислення (анодування) металів (рис. 3.16). Однак МДО відрізняється підвищеною напругою процесу (в діапазоні 300...1000 В) і використанням змінного струму (анодно-катодного процесу). Головна особливість анодно-катодного процесу полягає в тому, що катодні розряди, зберігаючи температуру, горять при менших напругах, оскільки оксидний шар, сформований в анодному розряді, має уніполярну провідність.

«Дослідники відзначають, що у більшості випадків тривалість горіння мікродугового розряду може становити від кількох мікросекунд до десятків мілісекунд при температурах від 3000 К до 15000 К» [15]. «При цьому виникають активні процеси масообміну та масопереносу, що призводить до осадження в оксидний шар компонентів електроліту. Застосування підвищеної напруги та змінного струму призводить до підвищення температури формування оксидного шару. У разі МДО алюмінієвих сплавів завдяки підвищеним температурам в оксидному шарі утворюється високоміцна фаза оксиду алюмінію - $\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд), що забезпечує високі функціональні характеристики оксидних шарів.

Дослідження властивостей оксидних шарів показують, що МДО може застосовуватися для обробки поверхні деталей, що працюють в умовах екстремальних навантажень та агресивних впливів. Твердість оксидних шарів, що досягається, доходить до 1500...2000 МПа (за шкалою Віккерса), товщина – до 300 мкм, пористість варіюється від 5 до 50%» [15].

Основними перевагами методу МДО у порівнянні з традиційними способами зміцнення поверхні виробів з алюмінієвих сплавів (газотермічним напилюванням, гальванічним осадженням та ін.) є:

1. відносна простота та невисока вартість обладнання для реалізації процесу МДО;
2. невисока вартість та недифіцитність хімічних реактивів-компонентів для створення електролітів для виконання процесу;
3. екологічна безпека процесу;
4. відсутність високих вимог щодо первинної підготовки поверхні перед виконанням процесу оксидування;
5. можливість обробки оксидуванням деталей, що мають приховані, та складні за профілем і важкодоступні поверхні завдяки хорошій здатності електроліту, що розсіює і проникає.

Головні обмеження у застосуванні МДО зумовлені недостатньо високою продуктивністю процесу (особливо при обробці ливарних алюмінієво-кремнієвих сплавів), суттєвими енерговитратами на реалізацію процесу та труднощами у підтримці його стабільності при обробці великої кількості деталей (через деградацію електроліту), що призводить до неоднорідності фізичних властивостей оксидних шарів, що отримуються в результаті обробки.

Технологія виконання мікродугового оксидування на сьогодні досить гарно відпрацьована, і використовується в першу чергу, для алюмінієвих сплавів, що деформуються [15]. Разом з тим, напрямки розвитку та широкого промислового використання технології оксидування саме алюмінієво-кремнієвих сплавів із вмістом кремнію від 5% і вище, які широко застосовуються в авто- та двигунобудуванні [17] для виготовлення блоків циліндрів, поршнів, головок блоків циліндрів і інших деталей, існує низка проблем.

Відомі дослідження [13, 14–17] показують, що алюмінієво-кремнієві сплави виявляють ряд специфічних особливостей при їх обробці методом МДО і не властивих алюмінієвим сплавам, що деформуються. Основною особливістю і суттєвою проблемою, що ускладнює обробку силумінів методом МДО, є кремній,

що входить до складу сплаву. Включення кремнію межі «сплав – оксидний шар» супроводжуються локальними дефектами оксидного шару. В результаті оксидний шар на силумінах значною мірою складається з муліта, силіманіту і низькотемпературних фаз оксиду алюмінію, а вміст високотемпературної фази корунду, якій властиві високі твердість і зносостійкість, порівняно невелика.

На цьому етапі розвитку технології МДО силумінів у відкритих джерелах пропонується кілька шляхів вирішення зазначеної проблеми. Відомі варіанти попередньої обробки поверхні силумінів різними методами [15] для поліпшення якості оксидних шарів, які отримують методом МДО. Наприклад, у роботі [15] пропонується попередньо протравлювати поверхні деталей із силумінів за допомогою азотної та плавикової кислот, а вже після цього здійснювати оксидування. В результаті даної попередньої обробки поверхонь у оксидних шарів, сформованих на них, отримується більший вміст корунду, муліту та гамма-оксиду алюмінію, а вміст аморфної фази зменшується. Крім того, така обробка сприяє підвищенню товщини оксидних шарів, що досягається, приблизно в 1,5 рази (при постійних параметрах МДО-процесу) та підвищення енергоефективності МДО-процесу. Однак, застосування операції хімічного травлення підвищує тривалість технологічного процесу, а реактиви (розчини сильних кислот), що використовуються, є шкідливими і накладають підвищені вимоги в галузі охорони праці та подальшої утилізації цих розчинів.

У роботі [15] як можливий варіант вирішення проблеми оксидування силумінів запропоновано виконувати їх попереднє анодування, а сам процес оксидування здійснювати після нього при досить високих густинах струму - близько 50 А/дм². В результаті за допомогою такої технології можливе одержання досить товстих оксидних шарів (50...70 мкм і більше), що складаються з корунду, муліту, гамма-оксиду алюмінію та оксиду кремнію, а середня мікротвердість складає близько 500..600 МПа за шкалою Віккерса. Незважаючи на досить високі характеристики, структура оксидних шарів, показана в роботі [17], має множинні дефекти (пори, тріщини, розшарування), а зафіксовані характеристики мають суттєвий розкид. Крім того, попереднє анодування і подальша обробка МДО при

густині струму навколо 50 А/дм² призводять до суттєвих тимчасових та енергетичних витрат, що не дозволяє говорити про ці рішення як про перспективні для масового виробництва.

Відомі спроби застосування цирконій- компонентів електролітів [27] для МДО силумінів. Дослідники виявили, що продуктивність обробки в такому електроліті дещо вища, ніж у традиційних лужно-силікатних розчинах, – швидкість формування оксидного шару, що досягається, становить близько 1–1,5 мкм/хв. Крім того, в оксидному шарі виявлені різні фази оксиду цирконію, які мають хороші механічні властивості. Однак, цей досвід швидше поодинокий та масових даних про практичні ефекти такого підходу не виявлено.

В цілому, слід зазначити, що результати відомих досліджень не дозволили кардинально вирішити проблему недостатньої продуктивності технології МДО силумінів при сумісному підвищенні їх якості та властивостей. Експлуатаційні характеристики оксидних шарів на силумінах не досягли значень, одержуваних на алюмінієвих сплавах, що деформуються. Отже, звичайним підбиранням електричних параметрів та оптимізацією складу стандартних електролітів, а також використанням початкової обробки матеріалів перед оксидуванням проблему оксидування силумінів вирішити не вдалося. Для забезпечення конкуренції технології МДО із застосуванням способів зміцнення поверхні силумінів необхідні нові варіанти вирішення проблеми.

Одним із шляхів є керування структурою алюмінієво-кремнієвого сплаву, оскільки саме кремній сплав є причиною поганої якості оксидних шарів на силумінах. Саме при реалізації даного підходу вперше виявлено ефекти, що виникають при МДО силумінів, та зумовлюють якість оксидного шару.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що, керуючи структурою алюмінієво-кремнієвих сплавів у значному діапазоні вмісту кремнію (від 5 до 24%) з використанням термічної обробки, можливо суттєво підвищити якість та властивості оксидних шарів [17,29,30].

Однак, ні управління структурою оксидованого силуміну, ні покращення складів електролітів і електротехнічних параметрів процесу МДО не дозволили на

даний момент досягти продуктивності обробки алюмінієво-кремнієвих сплавів і високих якостей одержуваних на них оксидних покриттів аналогічних тим, які отримуються на алюмінієвих сплавах, що деформуються, і кремнію.

На даний час можливо стверджувати, що відомі рішення в галузі технології оксидування для обробки силумінів (підбір електротехнічних характеристик, складу електроліту та концентрації його складових) вичерпали свої можливості та не забезпечують отримання необхідної продуктивності синтезу, високої якості та експлуатаційні характеристики оксидних шарів, отже потрібен новий підхід у цьому питанні.

Можливим підходом до вирішення зазначених проблем є використання електролітів-суспензій з введенням добавок нанорозмірних частинок в електроліт при МДО силумінів на основі базових відомих електролітів, що зарекомендували себе.

Таким чином, зважаючи на проведений аналіз методів нанесення покриттів, вважаємо що для нанесення теплозахисних покриттів на поверхні деталей, що обмежують камеру згорання, доцільно використовувати плазмовий метод напилювання порошкових матеріалів.

3.3 Характеристика плазмового напилювання, як способу нанесення теплозахисних покриттів

Отримання високотемпературних газових струменів в плазмотронах здійснюється іонізацією одноатомних (аргон, гелій) і дисоціацією і іонізацією двоатомних (водень, азот) газів, а також метану. Нейтральний газ, що подається в дуговий розряд плазмотрона перетворюється на квазінейтральний іонізований газ - плазму. При закінченні плазмового струменя через сопло плазмотрона вона примусово стискається, її температура може досягати $50\ 000^{\circ}\text{C}$ при вмісті заряджених частинок (електронів і іонів) до 10^9 - 10^{10} з тепломісткістю 7000-30000 ккал/кг. Формується плазмовий струмінь в газорозрядному проміжку між вольфрамовим охолоджуваним катодом і мідним водоохолоджуваним анодом. Стиснення плазмового струменя відбувається у вузькому каналі сопла, з якого вона

закінчується з високою швидкістю, іноді перевищуючої звукову. При введенні в газорозрядний проміжок або в канал сопла розпилений матеріал проходить вищеперелічені стадії напилювання і формує покриття [22].

Процес плазмового напилювання характеризується наступними перевагами в порівнянні з іншими видами напилювань.

1. Висока температура плазмового струменя дозволяє розплавляти і напилювати будь-які матеріали, які не розкладаються і плавляться конгруентно.
2. Безокисна атмосфера дозволяє напилювати матеріали, що легко окислюються, і зменшує окислення оброблюваних виробів.
3. Висока кінетична енергія і ентальпія плазмового струменя дозволяють одержувати покриття з високою густиною (до 99%) і адгезійною міцністю з основним матеріалом.
4. Висока продуктивність процесу напилювання забезпечується швидкістю теплопередачі, в 20-50 разів перевищуючої теплопередачу при газополум'яному напилюванні і в 3-5 разів - при електродуговому.
5. Оброблювана поверхня практично не схильна термічному впливу через низьку температуру нагріву (100- 200°C).
6. Високотемпературний плазмовий потік дозволяє отримувати сплави різних металів і кераміки, наносити багат шарові і пакетні покриття, композиційні покриття із заданими властивостями.
7. Енергетичні характеристики плазмотронів можна варіювати в широких межах стосовно вимог технології.

Високотемпературний газовий потік генерується також в спеціальному газополум'яному пальнику, куди поступає потік горючого газу (ацетилен, пропан, бутан, метан, водень, окисел вуглецю і інші гази) і окислювача (кисень). Продукти згорання плавлять аксіальний дротяний або порошковий матеріал, який подається і який після розплавлення видувається стислим повітрям потік якого концентрично розташований навкруги газополуменевого струменя.

Найбільшою теплотворною здатністю володіє суміш кисню і ацетилену (1:1): температура полум'я 3200°C , тепловий ефект 13,5-103 ккал/м³ (азотна плазма 1011 ккал/м³). Швидкість закінчення газового струменя складає 100-150 м/с.

Конструктивні особливості сучасних генераторів високотемпературних струменів дозволяють вводити в них матеріали у вигляді порошків, проволоч, гнучких шнурів. Умови подачі і розпилення порошкових матеріалів, що здійснюються в газополум'яних і плазмових пальниках, вимагають, щоб дисперсність порошків лежала у вузьких межах. Залежно від типу, конструкції і потужності пальників розмір порошку може знаходитися в межах 20-200 мкм причому форма повинна бути якомога ближче до сферичної, що покращує умови подачі і продуктивність напилювання. Останнім часом повідомляється про можливість напилювання дрібнодисперсійними металевими порошками (1...5 мкм), що дозволяють одержувати високоякісні покриття з низькими пористістю і шорсткістю. Порошки для напилювання можуть бути виготовлені з металів, сплавів, керамічних і пластичних матеріалів, різних сумішей (наприклад, металокерамічних), а також з композиційних матеріалів [26].

Широке розповсюдження отримали також дротяні матеріали: металеві дроти, стрижні з кераміки або керметів, у тому числі на органічній зв'язці, композитні проволочки, виготовлені з металевої оболонки і порошкоподібні або дротяного наповнювача, дротяні джгути, запресовані або залиті рідким металом.

Докладний аналіз типів напилюваних матеріалів, проведений Р. Клеманом, показує, що дротяні матеріали мають ряд переваг перед порошковими. В першу чергу потрібно відзначити продуктивність, повну розплавлюваність, можливість одночасного транспортування матеріалів, різних по робочих властивостях, сипучості, густині, дисперсності і т.д. До нових типів матеріалів відноситься гнучкий шнур, в якому в якості дуже тонкої оболонки використовується органічна плівка, яка, згоряючи, не залишає продуктів піролізу. Очевидно, цей тип матеріалів є найбільш технологічним і перспективним.

На сьогоднішній час існує багато видів матеріалів для нанесення теплозахисних покриттів, які мають різні хімічні та фізико-механічні властивості. Розглянемо основні з них.

3.4 Матеріали для плазмового напилювання теплозахисних покриттів

Металічні матеріали та сплави. Найбільше розповсюдження у нас і за кордоном отримало напилювання електродуги і газополум'я з проволок наступних металів, сплавів і псевдосплавів: алюміній, олово, мідь, цинк, залізо, нікель, латунь, бронза, сталь, сплави алюміній-олово, мідь-свинець, алюміній-залізо і ін. Ці матеріали напилюються на деталі, що працюють в умовах тертя і зносу (поршні, колінчасті вали, підшипники), тому найважливішими властивостями цих покриттів є твердість, зносостійкість і антифрикційні характеристики (коефіцієнт тертя, навантаження задирання), а також адгезійна міцність [30, 31].

При напилюванні металів формуються покриття, властивості яких значно відрізняються від властивостей вихідних матеріалів.

Напилювання у високотемпературному газовому середовищі, що містить кисень і азот, при швидкому охолодженні напилюваних частинок на поверхні виробу приводить до газонасичення металів до декількох відсотків, зміні хімічного складу вихідного матеріалу через вигорання, зниження густини через виникнення пористості, зменшення міцності і пластичності (іноді на порядок). Самі загальні причини, визначаючі зміну властивостей матеріалів при напиленні, слідуючі.

1. Взаємодія розпиляного матеріалу з атмосферними газами, що супроводжується зміною хімічного складу початкового матеріалу і газонасичення.

2. Поява в покритті меж нового типу, відмінних від звичайних меж зерен в металах і сплавах ослабленим зв'язком між частинками і шарами і підвищеним вмістом оксидів і інших фаз.

3. Поява пористості як наслідок способу формування гетерогенної структури з розплавлених частинок шляхом їх подальшого укладання, що супроводжується деформацією при ударі і інтенсивною кристалізацією.

4. Зміна тонкої структури і будови металу внаслідок появи гартівних і пересичених структур.

5. Виникнення мікро - і макронапруг в покритті.

При електрометалізації і газополум'яному напилюванні розжарені частинки металів, досягаючи поверхні, формують покриття в основному з механічним адгезійним зв'язком. Міцність на відрив алюмінієвих, сталевих, олов'яних покриттів і покриттів з псевдосплавів надзвичайно низька і складає від декількох кгс/см² до декількох десятків кгс/см². Автори ряду робіт затверджують, що міцність зчеплення газополуменевого покриття вище електродуги. Проте в інших дослідженнях показано, що більш високотемпературне напилювання електродуги при правильній схемі формування покриття дає міцність зчеплення (100-200 кгс/см²) до двох разів вище за газополум'яний. Плазмове напилювання металів приводить до ще більшого збільшення міцності зчеплення. Це свідчить про наявність розвинутої хімічної взаємодії покриття і основи при плазмовому напилюванні.

Густина металевих покриттів при електродузі і газополум'яному напилюванні знижується на 3-20% унаслідок пористості. Зносостійкість і антифрикційні властивості металевих покриттів значно вище, ніж властивості напилюваних металів. Для різних умов випробувань, навантажень, мастил і пар тертя зносостійкість підвищується в 1,5-3 рази. В наш час газо - і електрометалізація чистих низькоплавких металів все рідше застосовується для підвищення зносостійкості і відновлення зношених деталей, але отримання антифрикційних покриттів з псевдосплавів поки що виправдано [32,33].

Металеві матеріали і покриття напилюються на різні підшари, з якими забезпечується те, що механічне зачіпляє (фізична взаємодія) напилювання електродуги алюмінію і тугоплавких металів на певних режимах роботи електродуги металізатора приводить до утворення хімічної взаємодії із сталевією і титановією основою.

Проте у ряді випадків допустима термічна активація покриття і деталі до температур плавлення покриття. В цих випадках використання ефекту самофлюсування покриттів дозволяє підвищити адгезійну міцність на порядок за

рахунок повного протікання дифузійних процесів за всією площею адгезійного контакту.

Керамічні та керметні матеріали. Використовування теплозахисних покриттів в умовах циклічної зміни температур і тиску з одночасним впливом вібрацій, а також зміна теплового стану при пуску і зупинці двигуна пред'являють до матеріалів покриттів високі вимоги. Матеріали повинні бути жаростійкими, тугоплавкими, покриття з них повинні протистояти високим тепловим і механічним навантаженням.

В машинобудуванні застосовують для нанесення теплозахисних покриттів тугоплавкі оксиди і в першу чергу окис алюмінію і двоокис цирконію.

Керамічні покриття в основному напильють плазмовим або газополум'яним методом з порошків, стрижнів і гнучких шнурів.

Разом з окислом алюмінію широко використовується для напильовання двоокис цирконію; через низькотемпературні поліморфні перетворення, що приводять при охолодженні покриттів до значних змін питомого об'єму (до 7%), доводиться стабілізувати двоокис цирконію окислом кальцію. Твердий розчин ZrO_2 - CaO (5%) стабільний і володіє у край низькою теплопровідністю - більш ніж в два рази меншого окису алюмінію. Аналіз властивостей напильених оксидних матеріалів у вигляді стрижнів і порошків показує, що по фізико-механічних характеристиках покриття з двоокису цирконію і окислу алюмінію придатні для використання в умовах дизеля.

Напильовання металокерамічних сумішей (керметів) приводить до формування більш щільної структури вододіючою з підвищеними механічними властивостями, причому, якщо в процесі напильовання відбувається утворення шпинельних структур і протікання окислювально-відновних процесів, то є можливим отримання керметних покриттів з високими експлуатаційними характеристиками.

Основні труднощі при напильованні керметів полягають в забезпеченні однорідності і рівномірності транспортування матеріалу в пальник. Застосування механічної суміші металів і кераміки ускладнені природною сепарацією їх при

подачі в транспортуючий елементи пальника, а також погіршенням якості покриттів унаслідок різних швидкостей польоту частинок в потоці.

Роздільне транспортування металів і кераміки в пальник дозволяє ці труднощі, але ускладнює механізм подачі. Найбільш перспективним способом транспортування металокерамічних сумішей є застосування гнучкого шнура з незначним змістом мінеральної зв'язки. Наявність мінеральної зв'язки в керметі забезпечує повне розплавлення компонентів і отримання однорідних щільних покриттів.

Застосування конгломератних порошків одержуваних шляхом спікання дрібнодисперсної суміші порошків з подальшим дробленням або з використанням органічних зв'язок, дозволяє при рівномірній подачі в пальник одержувати однорідні покриття високої якості.

Композиційні матеріали. Аналіз методів отримання і властивостей різних матеріалів показує, що найперспективнішим для газополуменевого і плазмового напилювання є використання плакірованих порошків, тобто композиційних матеріалів, що складаються з основного ядра навкруги якого сформована одна або декілька тонких оболонок різних елементів, що приводить до капсуляції порошків. Формування таких оболонок (капсуляція) може здійснюватися хімічним осадженням елементів, розкладанням металовмісних з'єднань і вакуумним осадженням.

Найбільшу популярність здобув алюміній-нікелевий терморреагуючий матеріал, одержуваний хімічним осадженням нікелю на алюмінієвий порошок. Розвиток робіт по напиленню алюміній-нікелевих покриттів був викликаний тим, що в процесі напилювання при нагріві алюміній і нікель вступають в екзотермічну реакцію з утворенням алюмінатів нікелю.

Теплота екзотермічної реакції, підвищує ентальпію струменя, забезпечує термічну активацію процесу напилювання що приводить до підвищення адгезійної міцності алюмінатного покриття, що володіє високими жаростійкістю, зносостійкістю і корозійною стійкістю. Цінні якості покриттів з алюмінатів нікелю викликали інтерес до розробки різних способів отримання матеріалів. До них можна віднести спосіб попереднього електролітичного нікелювання з подальшим

нанесенням алюмінію дифузійним способом нанесення суміші порошків алюмінію і фтористого нікелю на поверхню з послідуєчим високотемпературним нагрівом, напилювання литого алюміній-нікелевого сплаву, напилювання порошків з різних сумішей нікелю і алюмінію. Всі ці способи не дозволили отримати покриття задовільної якості, а використання механічної суміші нікелю і алюмінію не дає повного виходу екзотермічній реакції через малу контактну площу компонентів суміші.

У зв'язку з цим у ряді робіт було запропоноване проводити напилювання з нікеле-алюмінієвого порошку.

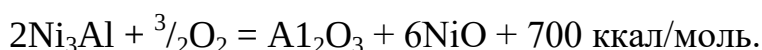
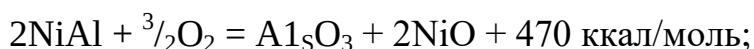
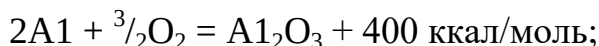
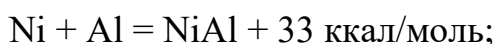
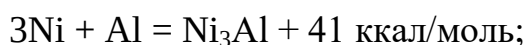
Запропонована велика кількість пар металів, що дають при напилюванні екзотермічні реакції (AlNi, AlCr, AlMo, AlNb, AlTi, AlV, AlW, а також замість Al використовуються В, Si, Ti і інші елементи). Такі реакції, як відомо можуть протікати між будь-якими металами з різною термодинамічною активністю. Найбільший тепловий ефект при екзотермічній реакції алюмінію можна отримати в системах Al-Ni, Al-Co, Al-Cu і ін. Проте щонайвищою швидкістю реакції володіє система Al-Ni, що обумовлене специфічною діаграмою стану цієї системи. В даний час вітчизняні технологія пропонує два основні способи отримання алюміній-нікелевого порошку - шляхом відновлення галогенідів нікелю різними хімічними відновниками у присутності стабілізаторів і шляхом контактного відновлення поверхнею алюмінієвого порошку солей нікелю. Другий спосіб, на наш погляд, більш технологічний і економічний, оскільки використовує дешеві реагенти (NiCl, NaCl, HF) і процес отримання порошку триває не більше 20 хвилин. До того ж, при контактному нікелюванні відсутній в нікелевому осаді фосфор, який завжди розчиняється при хімічному відновленні солей нікелю гіпофізом натрію.

Перспективи подальшого розвитку, удосконалення і широкого використання техніки високотемпературного розпилювання передбачається саме у використуванні композиційних порошкових або дротяних матеріалів. Створення теплозахисних, зносостійких, антизадирих і антифрикційних покриттів складного фазового складу, змінного по перетину з програмованою структурою і

властивостями найбільш ефективно може бути здійснено саме з використанням екзотермічно реагуючих композиційних матеріалів.

В процесі нагріву в потоці плазми біметалевого капсульованого порошку, що складається з алюмінієвого ядра і нікелевої оболонки, відбуваються процеси дифузії і перерозподілу мас, обумовлені кінетикою перемішування при зіткненні частинок. Аналіз теплових ефектів в алюміній-нікелевого порошку (Al - 20%, Ni - 80%) при повільному нагріві показав, що при 640° C, відбувається бурхлива реакція взаємодії нікелю з алюмінієм. При цьому алюмінієве ядро дифузувало в нікелеву оболонку з утворенням інтерметаліда (дуже крихкого і твердого), а також відбувалося часткове окислення алюмінію і нікелю практично без спікання порошку. Це свідчить про протікання екзотермічних реакцій. Швидкості таких реакцій залежать від енергії активації, а також від концентрації активованих поверхонь. Чим вище температура і менше енергія активації при значній площі зіткнення активованих частинок, тим швидше протікають екзотермічні реакції в алюміній-нікелевому порошку.

При нагріві протікають наступні реакції:



Виходячи з того, що окислюється незначна маса алюмінію і інтерметалідів, внесок енергії утворення інтерметалідів в баланс екзотермічної реакції значно переважає над внеском окислювальних реакцій. Окрім реакції утворення алюмінідів велика вірогідність утворення інтерметалідів. При ізотермічному нагріві теплові ефекти утворення алюмінідів наступні: NiAl₃ - 153 кДж/моль; NiAl₃ - 354 кДж/моль; NiAl - 119 кДж/моль; Ni₃Al - 157 кДж/моль.

Вивчення теплового балансу екзотермічної реакції при напиленні порошку Al на мідну, алюмінієву, залізну і інші підшари показало, що незалежно від підшару порошку у момент удару об підкладку складає ~150 кДж/моль (або ~40 ккал/моль), що вище повної ентальпії молібдену, що дає високу адгезію. Температура чи

частинок на відстані 150 мм від зрізу сопла складає 1640 С максимальна температура частинки, що дає максимальну адгезію.

Проаналізувавши всі вищеперелічені матеріали їх властивості та економічні показники, для підвищення ефективних показників двигуна шляхом нанесення теплозахисного покриття на головку циліндрів оберемо композиційний матеріал оксид молібдену товщиною 50 мкм, який наноситься на підшар нікелю товщиною 150-200 мкм.

3.5 Безпека виконання робіт при нанесенні теплозахисних покриттів

Безпечне виконання робіт при нанесенні покриттів газотермічним напилюванням доцільне лише при вірному поводженні з технологічним обладнанням, а також при виконанні всіх необхідних умов з техніки безпеки.

Можливо зазначити наступні небезпечні чинники для робітників, що працюють на обладнанні плазмового напилювання:

- значний шум високої частоти;
- значне світлове (ультрафіолетове) та інфрачервоне випромінювання;
- наявність небезпеки отримання травми від рухомих деталей;
- наявність небезпеки від застосування балонів зі стиснутим (до 150 атм.) та скрапленим (наприклад природний газ) газами та ін.

До виконання робіт на обладнанні для газотермічного напилювання покриттів можливо допускати робітників старше 18 років, які пройшли медичне обстеження, вміють працювати на обладнанні та мають достатньо високу кваліфікацію з електробезпеки.

Плазмовий струмінь, що створюється плазмотроном з високою швидкістю, створює значний рівень шуму з частотою від 2 до 20 кГц, зокрема в значній близькості до установки рівень шуму може отримувати значення 115 –125 дБ. Щоб захистити органи слуху робітника від цього шуму слід застосовувати навушники — так звані антифони, які здійснюють захист органів слуху від дії високочастотного шуму і надають можливість чути розмову. При використанні таких навушників

можливо отримати рівень шуму не більше 70 — 80 дБ і виконувати роботи безпечно для організму за певний проміжок часу.

При плазмовому методі напилюванні можуть виділятися аерозолі (дим і пар) від матеріалів у вигляді окисних і нітридних з'єднань (зокрема при роботі з азотом), а також озон і деякі окиси азоту. При використанні газоповітряних плазмових установок, що застосовують як пальний газ, наприклад пропан — бутан, можуть бути отримані також оксиди вуглецю. Для забезпечення захисту оператора від аерозолів, небезпечних токсичних газів і шкідливого пилу процес напилювання проводять в камерах (боксах) для металізації, що обладнанні потужною витяжною вентиляцією. В якості окремих заходів робітник застосовує для захисту органів дихання респіратор типу «Пелюстка» або захисну маску. Система витяжної вентиляції повинна виконувати видалення всіх типів аерозолів, що виділяються, а також пилу, оксидів азоту, вуглеводнів і озону. Для того щоб запобігти забрудненню навколишнього середовища частками напилюваного порошку і збільшити економічність процесу вентиляційне обладнання може бути устатковане циклонами, що затримують порошкоподібні частини напилюваного матеріалу. Затриманий порошок може бути повторно використаний для наступного напилювання.

Плазмовий факел, що має температуру від 5 до 20 тисяч градусів, являється інтенсивним джерелом виділення інфрачервоного і ультрафіолетового випромінювання. Активність інфрачервоної радіації на відстані 0,5 м від сопла плазмотрона складає (6—25) Вт/. Тому, при плазмовому напилюванні деталей передпліччя робітників необхідно захищати наруківниками, не захищені ділянки шкіри шиї або грудей — слід закривати нагрудниками, виконаними з вогнестійкого матеріалу, а руки повинні бути захищені рукавицями виконаними з азбестової тканини. Для забезпечення захисту зору від світлового випромінювання слід використовувати зварювальні шоломи, що мають світлофільтри марки ТС-2 з товщиною скла 2 мм. Камеру для напилювання оснащують склом — світлофільтром типу ТС-2.

Плазмоутворюючі гази, що застосовуються для напилювання, утримуються або в балонах під високим тиском (допустимий до 150 атм.), наприклад, такі як азот,

аргон, гелій, або в балонах із скрапленим газом (пальні гази — зокрема пропан — бутан). Тому при їхній використанні слід дотримуватись норм безпеки робіт з ємностями високого тиску і ємностей з із скрапленими пальними газами. Останні слід зберігати на відстані не менше за 1 м від радіаторів опалювання і 5 м від відкритого полум'я. Балони необхідно ретельно закріпити та тримати у вертикальному положенні.

При здійсненні піскоструминної або дробоструминної обробки поверхні деталей може з'являтися пил, що може бути небезпечним для здоров'я. Тому, таку обробку, слід виконувати в спеціальних камерах, що мають потужну витяжну вентиляцію. Для затримання пилу використовують спеціальні пилевловлювачі — циклони. Це дає можливість захищати від запилення навколишнє середовище, а крупні фракції абразиву застосовувати повторно.

Висновки

1. В роботі проаналізовано існуючі методи підвищення ефективних показників автомобільних двигунів, і прийнято до дослідження, як один з перспективних методів – нанесення теплозахисних покриттів на деталі камери згорання.
2. Виконано аналітичний аналіз впливу нанесення теплозахисних покриттів на деталі камери згорання на ефективні показники двигуна. Встановлено, що в результаті більшого підігріву повітряного заряду в процесі стиснення за наявності покриття на деталях камери згорання, тиск стиснення може зрости.. Більш високе значення температури і тиску повітря в кінці процесу стиснення приводять до скорочення періоду затримки запалювання палива.
3. Було виконано тепловий розрахунок автомобільного бензинового двигуна. За результатами теплового розрахунку були отримані наступні результати:
 - розрахункова температура в кінці такту впуску внаслідок використання теплозахисних покриттів збільшується на різних режимах від 8 до 13%.
 - тиск в кінці такту стиснення підвищується від 8 до 20%, температура в кінці такту стиснення підіймається від 100 до 180 К.
 - температура в кінці такту стиснення у двигунах з теплозахисними покриттями збільшується від 15 до 30%.
 - внаслідок змін параметрів робочого циклу двигуна відмічається підвищення ККД на номінальному режимі на 11%, проте на режимі холостого ходу ККД нижчий на 8%.
 - ефективна потужність двигуна на номінальному режимі підвищується на 7-8%;
 - спостерігається зниження питомої ефективної витрати палива на 6% і погодинної витрати палива на 7%;
 - крутний момент двигуна на номінальному режимі підвищується на 8%, проте на режимі холостих обертів та середніх навантажень спостерігається менші значення крутного моменту у двигунів з теплозахисними покриттями.
4. Виконано аналіз можливих методів нанесення теплозахисних покриттів на деталі камери згорання двигунів. Найбільш сприйнятливим слід вважати метод плазмового напилювання.
5. Було вибрано обладнання нанесення покриття, матеріали та режими плазмового напилювання. Для підвищення ефективних показників двигуна шляхом нанесення теплозахисного покриття на головку циліндрів оберемо композиційний матеріал оксид молібдену товщиною 50 мкм, який наноситься на підшар нікелю товщиною 150-200 мкм.

Список використаної літератури

1. Говорущенко Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – Харьков: Вища школа. Издательство при Харьковском университете, 1984. – 312 с.
2. Дюмин И.Е. Современные методы организации и технологии ремонта автомобилей и тракторов / И.Е. Дюмин, В.А. Какуевецкий, А.С. Силкин. – К.: Техника, 1974. – 520 с.
3. Дудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів : підруч. / О. А. Дудченко. — Київ: Знання-Прес, 2003. — 511 с.
4. Епифанов Л.И. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей / Л.И. Епифанов, Е.А. Епифанова. – М.: "Форум-Инфра-М", 2002. – 420 с.
5. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов/А.И. Колчин, В.П. Демидов – 3-е изд. Перераб. и доп. – М.: Высш школа, 2003. – 496 с.
6. Автомобильные двигатели. Под ред. М.С. Ховаха. М.: Машиностроение, 1977 – 456 с.
7. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов - Л.: Машиностроение. 1978. - 119 с.
8. Дьяченко Н. Х., Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей, М.: Машиностроение, 1969 г, – 248 с
9. Канарчук В.Е. Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы, – Киев: Наук, Думка, 1978г, – 256 с,
10. Никитин М.Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей / М.Д. Никитин, А.Я. Кулик, Н.И. Захаров -Л.: Машиностроение. 1977. - 165с.
11. Фомин В.М. Системы химического воздействия на параметры рабочего цикла дизеля / В.М. Фомин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2004.- №6. - С. 10-12.
12. Чигиринова Н.М. Оксидные керамические покрытия - эффективная тепловая защита рабочих поверхностей деталей ЦПГ / Н.М. Чигиринова,

- В.В.Чигиринов, В.Е Чигиринов // Автомобильная промышленность. - 2004. - №6. - С. 30-34.
13. Шпаковский В.В., Линьков О.Ю. Анализ эффективности применения поршней с корундовым слоем для снижения расхода топлива / В.В.Шпаковский, О.Ю. Линьков // Авиационно-космическая техника и технология. - 2008. - №10 (57.) - С. 140-144.
 14. Valland H. A. Teoretikal analysis of thermal barriers in diesel engine cylinders /H. A. Valland, G.K. Wyspianski //Norwegian Marine Reasearh. - 1982. - 10, N0. 2,34.
 15. Каракозов, Э.С. Микродуговое оксидирование – перспективный процесс получения керамических покрытий [Текст] / Э.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барыкин // Сварочное производство. - 1993. - № 6. – С. 4-7.
 16. Гурвич И.Б, Долговечность автомобильных двигателей, – М.: Машиностроение, 1967 г, – 103 с,
 17. Walase F.J. Thermal barrier pistons and their effect on the performance of compound diesel engine cycles / Walase F.J., Kao T.K., Alekxan-der W.A., Cole A.C. and Tarabad M. - Detroit.: SAE, Mar. 1983. - Paper 830312.
 18. Автомобільні двигуни : метод. вказ. до виконання курс. пр. для студ. напрямку 6.070106 "Автомобільний транспорт" / уклад. : С. О. Магопець, М. В. Красота, О. В. Бевз [та ін.] ; М-во освіти і науки Укр., Кіровоград. нац. техн. ун-т. - Кіровоград : КНТУ, 2014. - 82 с.
 19. Марченко А.П. Экспериментальные исследования рабочего процесса в камере сгорания ДВС с теплоизолированным поршнем / А.П. Марченко, В. В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. -2010. - №2. - С. 49-53.
 20. Парсаданов И.В. Влияние гальваноплазменной обработки поверхности поршня на механические потери в автотракторном дизеле / И.В. Парсаданов, В.В. Шпаковский, И.Н. Карягин, С.Ю.Белик // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. Тем. вып. «Транспортное машиностроение». - 2010. - Вып. 38. - С. 88-91.

21. Парсаданов И.В. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня на выбросы твёрдых частиц с отработавшими газами дизеля / И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. - 2009. - №2. - С. 97-100.
22. Наплавка и напыление. Хасуи А., Моригаки О. Перевод с японского: Попов В.Н.; редакторы: Степин В.С., Шестеркин Н.Г. Машиностроение. Москва. 1985 - 240 с.
23. Шпаковский В.В. Оснащение дизелей маневровых тепловозов поршнями с корундовым слоем для повышения эффективной мощности после текущего ремонта / В.В. Шпаковский // Сб. научн. Трудов. - Х.: УКРГАЖТ. - 2009. - Вып. 108. - С. 56-60.
24. Шпаковский В.В. Электреты в двигателях внутреннего сгорания / В.В. Шпаковский, О.Ю. Линьков, В.В. Осейчук // Авиационно-космическая техника и технология. - 2008. - №9 (56). - С.125-128.
25. Шпаковский В.В. Влияние частично-динамической теплоизоляции на температурное состояние поверхности поршня / В.В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 2. С. 92-95.
26. Ильющенко, А. Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, С. П. Кундас и др. – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.
27. May U. Technology potential of ceramic piston pins / U. May, F. Stromberger, J. Kohl et al. // MTZ. – 2008. – No. 5. – P. 46–51.
28. Шерепова, Н.В. Теоретический и экспериментальный анализ сопротивления термоударам деталей камер сгорания из конструкционной керамики / Н.В. Шерепова, С.А. Захаров // Двигателестроение. – 1991. – № 6. – С. 40-42.
29. Cho J.E. Surface & Coatings Technology / J.E. Cho, S.Y. Hwang, K.Y. Kim, 200 (2006) 2653– 2662.
30. Grigoriev, S.N. Modification of the structure and properties of high-speed steel by combined vacuum-plasma treatment / S.N. Grigoriev, A.S. Metel, S.V. Fedorov, // Metal Sci. Heat Treat., 2012, vol. 54, pp. 8-12.

31. Di Girolamo G. Microstructure and Wear Behavior of Plasma-Sprayed Nanostructured WC–Co Coatings / G. Di Girolamo, L. Pilloni, G. Pulci et al. // Journal of the American Ceramic Society, 92 [5] (2009) 1118–1124.
32. Cherkasova, N.Yu. Increase of exploitation parameters of cutting ceramic plates by surface mechanical and ion-plasma treatment / N.Yu. Cherkasova, M.A. Volosova, // Stanki Instrum., 2012, no. 12, pp. 19-23.
33. Sarwar, M. Characteristics and machining performance of TiN and TiAlN coatings on a milling cutter / M. Sarwar, J. Haider, // AIP Conf. Proc., 2010, no. 1315, pp. 1005-1010.
34. Аулін В.В. Деякі аспекти наукової діяльності кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету/Збірник наукових матеріалів Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту», Кропивницький, ЦНТУ, 2019 - с. 14-28.

ДОДАТОК А

Тепловий розрахунок двигуна з камерою згорання захищеною теплозахисними покриттями

Вихідні данні:

ефективна потужність двигуна	$N_e := 130$
частота обертання колінчастого вала	$n := 3300$
число циліндрів	$i := 4$
розташування циліндрів - рядне	
система охолодження - рідинна	
ступінь стиску	$\varepsilon := 6.5$

1. Тепловий розрахунок двигуна.

1.1. Вибір швидкісних режимів роботи двигуна.

Для карбюраторного двигуна у відповідності з рекомендаціями [1] приймаємо наступні режими його роботи

1.) Режим мінімальної частоти обертання колінчастого валу

$$n_{\min} := 650 \text{ об/хв}$$

2.) Режим максимального крутного моменту

$$n_M := (0.4) \cdot n \quad n_{MM} := 2800 \text{ об/хв}$$

3.) Режим максимальної потужності

$$n_N := n \quad n_N = 3300 \text{ об/хв}$$

4.) Режим, що відповідає максимальній швидкості автомобіля

$$n_{\max} := 1.0435 \cdot n_N \quad n_{\max} = 3443.55 \text{ об/хв}$$

$$n_1 := n_{\min} \quad n_2 := n_M \quad n_3 := n_N \quad n_4 := n_{\max}$$

1.2. Вибір палива для двигуна

Для двигуна з $\varepsilon = 6,5$ приймаємо бензин марки АИ-76

$$C_w := 0.855 \quad H_w := 0.145 \quad m_T := 115 \quad S_w := 0 \quad O := 0 \quad H_u := 43930 \text{ кДж/кг}$$

1.3. Визначення параметрів робочого тіла.

Теоретична необхідна кількість повітря для згорання 1 кг палива

$$L_0 := \frac{1}{0.208} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \quad L_0 = 0.517 \text{ кмоль/кг пал}$$

$$l_0 := \frac{1}{0.23} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot H - O \right) \quad l_0 = 14.957 \text{ кмоль/кг пал}$$

Кількість паливної суміші на кожному з режимів роботи двигуна:

$$\alpha_1 := 0.86 \quad \alpha_2 := 0.94 \quad \alpha_3 := 0.96 \quad \alpha_4 := 0.96$$

$$M_{11} := \alpha_1 \cdot L_0 + \frac{1}{m_T} \quad M_{11} = 0.453 \text{ кмоль пал. сум/кг пал.}$$

$$M_{12} := \alpha_2 \cdot L_0 + \frac{1}{m_T} \quad M_{12} = 0.495 \text{ кмоль пал. сум/кг пал.}$$

$$M_{13} := \alpha_3 \cdot L_0 + \frac{1}{m_T} \quad M_{13} = 0.505 \text{ кмоль пал. сум/кг пал.}$$

$$M_{14} := \alpha_4 \cdot L_0 + \frac{1}{m_T} \quad M_{14} = 0.505 \text{ кмоль пал. сум/кг пал.}$$

Загальна кількість окремих компонентів згоряння при $K := 0.5$

1.) для режиму $n_{\min} = 1000$ об/хв

$$M_{1\text{CO}_2} := \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1 - \alpha_1}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{1\text{CO}_2} = 0.051 \text{ кмоль CO}_2/\text{кг пал.}$$

$$M_{1\text{CO}} := 2 \cdot \frac{1 - \alpha_1}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{1\text{CO}} = 0.02 \text{ кмоль CO/кг пал.}$$

$$M_{1\text{H}_2\text{O}} := \frac{H}{2} - 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha_1}{(1 + K)} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{1\text{H}_2\text{O}} = 0.062 \text{ кмоль H}_2\text{O/кг пал.}$$

$$M_{1\text{H}_2} := 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha_1}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{1\text{H}_2} = 0.01 \text{ кмоль H}_2/\text{кг пал.}$$

$$M_{1\text{N}_2} := 0.792 \cdot \alpha_1 \cdot L_0 \quad M_{1\text{N}_2} = 0.352 \text{ кмоль N}_2/\text{кг пал.}$$

Загальна кількість продуктів згоряння для першого режиму

$$M_{21} := M_{1\text{CO}_2} + M_{1\text{CO}} + M_{1\text{H}_2\text{O}} + M_{1\text{H}_2} + M_{1\text{N}_2} \quad M_{21} = 0.496 \text{ кмоль пр. згор/кг пал.}$$

Перевірка :

$$M_{21} := \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.792 \cdot \alpha_1 \cdot L_0 \quad M_{21} = 0.496 \text{ кмоль прод. згор/кг пал.}$$

2.) для режиму n_2, n_3, n_4

$$M_{2\text{CO}_2} := \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1 - \alpha_2}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{2\text{CO}_2} = 0.063 \text{ кмоль CO}_2/\text{кг пал.}$$

$$M_{2\text{CO}} := 2 \cdot \frac{1 - \alpha_2}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{2\text{CO}} = 0.009 \text{ кмоль CO/кг пал.}$$

$$M_{2\text{H}_2\text{O}} := \frac{H}{2} - 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha_2}{(1 + K)} \cdot 0.208 \cdot L_0 \quad M_{2\text{H}_2\text{O}} = 0.068 \text{ кмоль H}_2\text{O/кг пал.}$$

$$M2_{H2} := 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha2}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M2_{H2} = 0.004 \quad \text{кмоль } H_2/\text{кг пал.}$$

$$M2_{N2} := 0.792 \cdot \alpha2 \cdot L_0$$

$$M2_{N2} = 0.385 \quad \text{кмоль } N_2/\text{кг пал.}$$

Загальна кількість продуктів згорання:

$$M_{22} := M2_{CO2} + M2_{CO} + M2_{H2O} + M2_{H2} + M2_{N2}$$

$$M_{22} = 0.529 \quad \text{кмоль пр. згор./кг пал.}$$

Перевірка:

$$M_{22} := \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.792 \cdot \alpha2 \cdot L_0$$

$$M_{22} = 0.529 \quad \text{кмоль прод. згор./кг пал.}$$

$$M3_{CO2} := \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1 - \alpha3}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M3_{CO2} = 0.066 \quad \text{кмоль } CO_2/\text{кг пал.}$$

$$M3_{CO} := 2 \cdot \frac{1 - \alpha3}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M3_{CO} = 0.006 \quad \text{кмоль } CO/\text{кг пал.}$$

$$M3_{H2O} := \frac{H}{2} - 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha3}{(1 + K)} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M3_{H2O} = 0.07 \quad \text{кмоль } H_2O/\text{кг пал.}$$

$$M3_{H2} := 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha3}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M3_{H2} = 0.003 \quad \text{кмоль } H_2/\text{кг пал.}$$

$$M3_{N2} := 0.792 \cdot \alpha3 \cdot L_0$$

$$M3_{N2} = 0.393 \quad \text{кмоль } N_2/\text{кг пал.}$$

Загальна кількість продуктів згорання:

$$M_{23} := M3_{CO2} + M3_{CO} + M3_{H2O} + M3_{H2} + M3_{N2}$$

$$M_{23} = 0.537 \quad \text{кмоль пр. згор./кг пал.}$$

Перевірка:

$$M_{23} := \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.792 \cdot \alpha3 \cdot L_0$$

$$M_{23} = 0.537 \quad \text{кмоль прод. згор./кг пал.}$$

$$M4_{CO2} := \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1 - \alpha4}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M4_{CO2} = 0.066 \quad \text{кмоль } CO_2/\text{кг пал.}$$

$$M4_{CO} := 2 \cdot \frac{1 - \alpha4}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M4_{CO} = 0.006 \quad \text{кмоль } CO/\text{кг пал.}$$

$$M4_{H2O} := \frac{H}{2} - 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha4}{(1 + K)} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M4_{H2O} = 0.07 \quad \text{кмоль } H_2O/\text{кг пал.}$$

$$M_{H_2} := 2 \cdot K \cdot \frac{1 - \alpha_4}{1 + K} \cdot 0.208 \cdot L_0$$

$$M_{H_2} = 0.003$$

кмоль H₂/кг пал.

$$M_{N_2} := 0.792 \cdot \alpha_4 \cdot L_0$$

$$M_{N_2} = 0.393$$

кмоль N₂/кг пал.

Загальна кількість продуктів згорання:

$$M_{24} := M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2}$$

$$M_{24} = 0.537$$

кмоль пр. згор./кг пал.

Перевірка:

$$M_{24} := \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.792 \cdot \alpha_4 \cdot L_0$$

$$M_{24} = 0.537$$

кмоль прод. згор./кг пал.

1.4 Визначення параметрів навколишнього середовища і залишкових газів.

Для двигуна без наддуву приймаємо [1]

$$P_0 := 0.1 \text{ МПа} \quad T_0 := 293 \text{ К}$$

Температуру залишкових газів приймаємо (рис.1) для режимів:

$$n_1 \quad \alpha=0,85 \quad T_{r12} := 950 \text{ К}$$

$$n_2 \quad \alpha=0,92 \quad T_{r22} := 1000 \text{ К}$$

$$n_3 \quad \alpha=0,94 \quad T_{r32} := 1040 \text{ К}$$

$$n_4 \quad \alpha=0,93 \quad T_{r42} := 1050 \text{ К}$$

Тиск залишкових газів для номінального режиму

$$P_{rN} := 1.18 \cdot P_0 \quad P_{rN} = 0.118$$

$$A_p := (P_{rN} - P_0 \cdot 1.035) \cdot \frac{10^8}{n_N^2 \cdot P_0} \quad A_p = 1.331$$

$$P_{r1} := P_0 \cdot (1.035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot n_1^2) \quad P_{r1} = 0.104$$

$$P_{r2} := P_0 \cdot (1.035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot n_2^2) \quad P_{r2} = 0.114$$

$$P_{r3} := P_0 \cdot (1.035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot n_3^2) \quad P_{r3} = 0.118$$

$$P_{r4} := P_0 \cdot (1.035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot n_4^2) \quad P_{r4} = 0.119$$

1.5. Визначення параметрів процесу впуску.

$$R_B := 287 \text{ Дж/кг град} \quad \omega_{bn} := 100 \text{ м/с} \quad j := \beta^2 + \xi \quad j := 2.5$$

$$\rho_0 := \frac{P_0 \cdot 10^6}{R_B \cdot T_0} \quad \rho_0 = 1.189 \text{ кг/м}^3$$

$$A_n := \frac{\omega_{bn}}{n_N} \quad A_n = 0.03$$

Врати тиску для першого режиму при $n_1=1000$ об/хв

$$\Delta P_1 := \frac{j \cdot A_n^2 \cdot n_1^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \quad \Delta P_1 = 0.001 \text{ МПа}$$

$$P_{a1} := P_0 - \Delta P_1 \quad P_{a1} = 0.099 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_2 := \frac{j \cdot A_n^2 \cdot n_2^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \quad \Delta P_2 = 0.011 \text{ МПа}$$

$$P_{a2} := P_0 - \Delta P_2 \quad P_{a2} = 0.089 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_3 := \frac{j \cdot A_n^2 \cdot n_3^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \quad \Delta P_3 = 0.015 \text{ МПа}$$

$$P_{a3} := P_0 - \Delta P_3 \quad P_{a3} = 0.085 \text{ МПа}$$

$$\Delta P_4 := \frac{j \cdot A_n^2 \cdot n_4^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \quad \Delta P_4 = 0.016 \text{ МПа}$$

$$P_{a4} := P_0 - \Delta P_4 \quad P_{a4} = 0.084 \text{ МПа}$$

Підігрів заряду і коефіцієнт залишкових газів

$$\phi_0 := 1 \quad \Delta T_N := 8 \quad \phi_{doz1} := 0.95 \quad \phi_{doz2} := 0.96 \quad \phi_{doz3} := 1.08 \quad \phi_{doz4} := 1.093$$

$$A_T := \frac{\Delta T_N}{(110 - 0.0125 \cdot n_N)} \quad A_T = 0.116$$

Підігрів заряду (вимірюється в градусах цельсія)

$$n_1=1000 \text{ об/хв} \quad \Delta T_1 := A_T \cdot (110 - 0.0125 \cdot n_1) \quad \Delta T_1 = 11.855$$

$$n_1=2160 \text{ об/хв} \quad \Delta T_2 := A_T \cdot (110 - 0.0125 \cdot n_2) \quad \Delta T_2 = 8.727$$

$$n_1=5400 \text{ об/хв} \quad \Delta T_3 := A_T \cdot (110 - 0.0125 \cdot n_3) \quad \Delta T_3 = 8$$

$$n_1=5670 \text{ об/хв} \quad \Delta T_4 := A_T \cdot (110 - 0.0125 \cdot n_4) \quad \Delta T_4 = 7.791$$

Коефіцієнт залишкових газів для різних режимів

$$\gamma_{r1} := \frac{T_0 + \Delta T_1}{T_{r12}} \cdot \frac{\phi_0 \cdot P_{r1}}{\epsilon \cdot \phi_{doz1} \cdot P_{a1} - \phi_0 \cdot P_{r1}} \quad \gamma_{r1} = 0.065$$

$$\gamma_{r2} := \frac{T_0 + \Delta T_2}{T_{r22}} \cdot \frac{\phi_0 \cdot P_{r2}}{\epsilon \cdot \phi_{doz2} \cdot P_{a2} - \phi_0 \cdot P_{r2}} \quad \gamma_{r2} = 0.078$$

$$\gamma_{r3} := \frac{T_0 + \Delta T_3}{T_{r32}} \cdot \frac{\phi_0 \cdot P_{r3}}{\epsilon \cdot \phi_{doz3} \cdot P_{a3} - \phi_0 \cdot P_{r3}} \quad \gamma_{r3} = 0.071$$

$$\gamma_{r4} := \frac{T_0 + \Delta T4}{T_{r42}} \cdot \frac{\phi_0 \cdot P_{r4}}{\varepsilon \cdot \phi_{doz4} \cdot P_{a4} - \phi_0 \cdot P_{r4}} \quad \gamma_{r4} = 0.072$$

Температура в кінці впуску

$$T_{a01} := \frac{T_0 + \Delta T1 + \gamma_{r1} \cdot T_{r12}}{1 + \gamma_{r1}} \quad T_{a01} = 344.51 \text{ K}$$

$$T_{a02} := \frac{T_0 + \Delta T2 + \gamma_{r2} \cdot T_{r22}}{1 + \gamma_{r2}} \quad T_{a02} = 351.984 \text{ K}$$

$$T_{a03} := \frac{T_0 + \Delta T3 + \gamma_{r3} \cdot T_{r32}}{1 + \gamma_{r3}} \quad T_{a03} = 350.121 \text{ K}$$

$$T_{a04} := \frac{T_0 + \Delta T4 + \gamma_{r4} \cdot T_{r42}}{1 + \gamma_{r4}} \quad T_{a04} = 350.958 \text{ K}$$

Температура в кінці впуску з урахуванням підвищення температури за дії теплозахисного покриття

$$T_{a1} := \frac{T_{a01} \cdot (T_0 + \Delta T01)}{T_0 + \Delta T1} \quad \Delta T01 := 40 \quad T_{a1} = 376.317$$

$$T_{a2} := \frac{T_{a02} \cdot (T_0 + \Delta T02)}{T_0 + \Delta T2} \quad \Delta T02 := 45 \quad T_{a2} = 394.298$$

$$T_{a3} := \frac{T_{a03} \cdot (T_0 + \Delta T03)}{T_0 + \Delta T3} \quad \Delta T03 := 50 \quad T_{a3} = 398.975$$

$$T_{a4} := \frac{T_{a04} \cdot (T_0 + \Delta T04)}{T_0 + \Delta T4} \quad \Delta T04 := 52 \quad T_{a4} = 402.541$$

Коефіцієнт наповнення:

$$\eta_{v1} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T1} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz1} \cdot \varepsilon \cdot P_{a1} - \phi_0 \cdot P_{r1}) \quad \eta_{v1} = 0.891$$

$$\eta_{v2} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T2} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz2} \cdot \varepsilon \cdot P_{a2} - \phi_0 \cdot P_{r2}) \quad \eta_{v2} = 0.783$$

$$\eta_{v3} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T_3} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz3} \cdot \varepsilon \cdot P_{a3} - \phi_0 \cdot P_{r3}) \quad \eta_{v3} = 0.849$$

$$\eta_{v4} := \frac{T_0}{T_0 + \Delta T_4} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{P_0} (\phi_{doz4} \cdot \varepsilon \cdot P_{a4} - \phi_0 \cdot P_{r4}) \quad \eta_{v4} = 0.843$$

1.6 Визначення параметрів процесу стиску.

$$n_1 = 650 \text{ об/хв} \quad n_2 = 2800 \text{ об/хв} \quad n_3 = 3300 \text{ об/хв} \quad n_4 = 3443.535 \text{ об/хв}$$

$$k_{11} := 1.3746 \quad k_{21} := 1.3743 \quad k_{31} := 1.3745 \quad k_{41} := 1.3744$$

$$n_{11} := 1.42 \quad n_{21} := 1.44 \quad n_{31} := 1.45 \quad n_{41} := 1.44$$

$$T_{a1} = 376.317 \quad T_{a2} = 394.298 \quad T_{a3} = 398.975 \quad T_{a4} = 402.541$$

Тиск в кінці процесу

$$P_{c1} := P_{a1} \cdot \varepsilon^{n_{11}} \quad P_{c1} = 1.418 \text{ МПа}$$

$$P_{c2} := P_{a2} \cdot \varepsilon^{n_{21}} \quad P_{c2} = 1.323 \text{ МПа}$$

$$P_{c3} := P_{a3} \cdot \varepsilon^{n_{31}} \quad P_{c3} = 1.285 \text{ МПа}$$

$$P_{c4} := P_{a4} \cdot \varepsilon^{n_{41}} \quad P_{c4} = 1.241 \text{ МПа}$$

Температура в кінці стиску

$$T_{c01} := T_{a1} \cdot \varepsilon^{n_{11}-1} \quad T_{c01} = 825.995 \text{ К}$$

$$T_{c02} := T_{a2} \cdot \varepsilon^{n_{21}-1} \quad T_{c02} = 898.476 \text{ К}$$

$$T_{c03} := T_{a3} \cdot \varepsilon^{n_{31}-1} \quad T_{c03} = 812.885 \text{ К}$$

$$T_{c04} := T_{a4} \cdot \varepsilon^{n_{41}-1} \quad T_{c04} = 917.258 \text{ К}$$

$$T_{f1} := 692$$

$$T_{c1} := T_{c01} \cdot \frac{T_{a1}}{T_{f1}} \cdot \varepsilon^{n_{11}-1}$$

$$T_{c1} = 985.936$$

$$T_{f2} := 706$$

$$T_{c2} := T_{c02} \cdot \frac{T_{a2}}{T_{f2}} \cdot \varepsilon^{n_{21}-1}$$

$$T_{c2} = 1143.427$$

$$T_{c3} := T_{c03} \cdot \frac{T_{a3}}{T_{f3}} \cdot \epsilon^{n_{31}-1} \quad T_{f3} := 703 \quad T_{c3} = 1071.1$$

$$T_{c4} := T_{c04} \cdot \frac{T_{a4}}{T_{f4}} \cdot \epsilon^{n_{41}-1} \quad T_{f4} := 704 \quad T_{c4} = 1195.117$$

Середня молярна теплоємність в кінці стиску

$$t_{c1} := T_{c1} - 273 \quad t_{c1} = 712.936 \quad C$$

$$t_{c2} := T_{c2} - 273 \quad t_{c2} = 870.427 \quad C$$

$$t_{c3} := T_{c3} - 273 \quad t_{c3} = 798.1 \quad C$$

$$t_{c4} := T_{c4} - 273 \quad t_{c4} = 922.117 \quad C$$

а) свіжої суміші

$$mC_{v1} := 20.6 + 0.002638 \cdot t_{c1} \quad mC_{v1} = 22.481 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

$$mC_{v2} := 20.6 + 0.002638 \cdot t_{c2} \quad mC_{v2} = 22.896 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

$$mC_{v3} := 20.6 + 0.002638 \cdot t_{c3} \quad mC_{v3} = 22.705 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

$$mC_{v4} := 20.6 + 0.002638 \cdot t_{c4} \quad mC_{v4} = 23.033 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

б) залишкових газів - визначаємо методом екстраполяції з використанням табл.4

$$mC_1 := 23.303 \quad mC_2 := 23.450 \quad \alpha_1 := 0.85$$

$$mC_{v1}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_1'}{0.05} \quad mC_{v1}''' = 23.332 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

$$mC_1 := 23.707 \quad mC_2 := 24.867 \quad \alpha_1 := 0.9$$

$$mC_{v2}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_1 - \alpha_1'}{0.05} \quad mC_{v2}''' = 22.779 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

$$\text{теплоємність продуктів згорання при} \quad t_{c1} = 712.936$$

$$tab1 := 500$$

$$mC_{v1}'' := mC_{v1}''' + (mC_{v2}''' - mC_{v1}''') \cdot \frac{t_{c1} - tab1}{100} \quad mC_{v1}'' = 22.154 \quad \text{кДж/кмоль град}$$

для другого режиму

$$mC_1 := 23.450 \quad mC_2 := 24.586 \quad \alpha_{11} := 0.9$$

$$mC_{v1}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{0.05} \quad mC_{v1}''' = 24.359 \text{ кДж/кмоль град}$$

$$mC_1 := 23.876 \quad mC_2 := 24.014 \quad \alpha_{11} := 0.9$$

$$mC_{v2}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{0.05} \quad mC_{v2}''' = 23.986 \text{ кДж/кмоль град}$$

теплоемність продуктів згорання при $t_{c2} = 870.427$

$$tabl := 400$$

$$mC_{v2}'' := mC_{v1}''' + (mC_{v2}''' - mC_{v1}''') \cdot \frac{t_{c2} - tabl}{100} \quad mC_{v2}'' = 22.607 \text{ кДж/кмоль град}$$

для третьего режима

$$mC_1 := 23.586 \quad mC_2 := 23.712 \quad \alpha_{11} := 0.95$$

$$mC_{v1}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{0.05} \quad mC_{v1}''' = 23.611 \text{ кДж/кмоль град}$$

$$mC_1 := 24.014 \quad mC_2 := 24.150 \quad \alpha_{11} := 0.95$$

$$mC_{v2}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{0.05} \quad mC_{v2}''' = 24.041 \text{ кДж/кмоль град}$$

теплоемність продуктів згорання при $t_{c3} = 798.1$

$$tabl := 400$$

$$mC_{v3}'' := mC_{v1}''' + (mC_{v2}''' - mC_{v1}''') \cdot \frac{t_{c3} - tabl}{100} \quad mC_{v3}'' = 25.323 \text{ кДж/кмоль град}$$

для четвертого режима $t_{c4} = 922.117$

$$mC_1 := 23.586 \quad mC_2 := 23.712 \quad \alpha_{11} := 0.95$$

$$mC_{v1}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_4 - \alpha_1}{0.05} \quad mC_{v1}''' = 23.611 \text{ кДж/кмоль град}$$

$$mC_1 := 24.44 \quad mC_2 := 24.586 \quad \alpha_{11} := 0.95$$

$$mC_{v2}''' := mC_1 + (mC_2 - mC_1) \cdot \frac{\alpha_4 - \alpha_1}{0.05} \quad mC_{v2}''' = 24.469 \text{ кДж/кмоль град}$$

теплоемність продуктів згорання при $t_{c4} = 922.117$

www tabl := 400

$$mC_{v4''} := mC_{v1'''} + (mC_{v2'''} - mC_{v1'''}) \cdot \frac{t_{c4} - \text{tabl}}{100} \quad mC_{v4''} = 28.091 \text{ кДж/кмоль град}$$

робочої суміші

$$mC_{v1'} := \frac{1}{1 + \gamma_{r1}} \cdot (mC_{v1} + \gamma_{r1} \cdot mC_{v1''}) \quad mC_{v1'} = 22.461$$

$$mC_{v2'} := \frac{1}{1 + \gamma_{r2}} \cdot (mC_{v2} + \gamma_{r2} \cdot mC_{v2''}) \quad mC_{v2'} = 22.875$$

$$mC_{v3'} := \frac{1}{1 + \gamma_{r3}} \cdot (mC_{v3} + \gamma_{r3} \cdot mC_{v3''}) \quad mC_{v3'} = 22.879$$

$$mC_{v4'} := \frac{1}{1 + \gamma_{r4}} \cdot (mC_{v4} + \gamma_{r4} \cdot mC_{v4''}) \quad mC_{v4'} = 23.371$$

1.7 Визначення параметрів процесу згорання.

Коефіцієнт молекулярної зміни

$$\mu_{01} := \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad \mu_1 := \frac{\mu_{01} + \gamma_{r1}}{1 + \gamma_{r1}} \quad \mu_{01} = 1.094 \quad \mu_1 = 1.088$$

$$\mu_{02} := \frac{M_{22}}{M_{12}} \quad \mu_2 := \frac{\mu_{02} + \gamma_{r2}}{1 + \gamma_{r2}} \quad \mu_{02} = 1.069 \quad \mu_2 = 1.064$$

$$\mu_{03} := \frac{M_{23}}{M_{13}} \quad \mu_3 := \frac{\mu_{03} + \gamma_{r3}}{1 + \gamma_{r3}} \quad \mu_{03} = 1.063 \quad \mu_3 = 1.059$$

$$\mu_{04} := \frac{M_{24}}{M_{14}} \quad \mu_4 := \frac{\mu_{04} + \gamma_{r4}}{1 + \gamma_{r4}} \quad \mu_{04} = 1.063 \quad \mu_4 = 1.059$$

Кількість теплоти, витраченої внаслідок хімічної неповноти згорання:

$$\Delta H_{u1} := 119950 \cdot (1 - \alpha_1) \cdot L_0 \quad \Delta H_{u1} = 8679.075 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta H_{u2} := 119950 \cdot (1 - \alpha_2) \cdot L_0 \quad \Delta H_{u2} = 3719.603 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta H_{u3} := 119950 \cdot (1 - \alpha_3) \cdot L_0 \quad \Delta H_{u3} = 2479.736 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta H_{u4} := 119950 \cdot (1 - \alpha_4) \cdot L_0 \quad \Delta H_{u4} = 2479.736 \text{ кДж/кг}$$

Теплота згорання робочої суміші

$$H_{\text{rob1}} := \frac{H_u - \Delta H_{u1}}{M_{11} \cdot (1 + \gamma_{r1})} \quad H_{\text{rob1}} = 73006.511 \quad \text{кДж/кмоль роб.сум}$$

$$H_{\text{rob2}} := \frac{H_u - \Delta H_{u2}}{M_{12} \cdot (1 + \gamma_{r2})} \quad H_{\text{rob2}} = 75460.823 \quad \text{кДж/кмоль роб.сум}$$

$$H_{\text{rob3}} := \frac{H_u - \Delta H_{u3}}{M_{13} \cdot (1 + \gamma_{r3})} \quad H_{\text{rob3}} = 76646.8 \quad \text{кДж/кмоль роб.сум}$$

$$H_{\text{rob4}} := \frac{H_u - \Delta H_{u4}}{M_{14} \cdot (1 + \gamma_{r4})} \quad H_{\text{rob4}} = 76606.475 \quad \text{кДж/кмоль роб.сум}$$

Середня мольна теплоємність продуктів згорання:

$$t_z := 8$$

$$mC_{\text{vCO2}} := 39.123 + 0.003349 \cdot t_z$$

$$mC_{\text{vCO}} := 22.49 + 0.00143 \cdot t_z$$

$$mC_{\text{vH2O}} := 26.67 + 0.004438 \cdot t_z$$

$$mC_{\text{vH2}} := 19.678 + 0.001758 \cdot t_z$$

$$M_{\text{N2}} := 21.951 + 0.001457 \cdot t_z$$

Коефіцієнт використання теплоти

$$n1=1000 \text{ об/хв} \quad \xi_{z1} := 0.95$$

$$n1=2160 \text{ об/хв} \quad \xi_{z2} := 0.96$$

$$n1=5400 \text{ об/хв} \quad \xi_{z3} := 0.97$$

$$n1=5670 \text{ об/хв} \quad \xi_{z4} := 0.96$$

Температура в кінці процесу згорання t_z визначається за рівнянням згорання:

Given

$$\xi_{z1} \cdot H_{\text{rob1}} + mC_{\text{v1}} \cdot t_{c1} - \mu_1 \cdot \frac{1}{M_{21}} \cdot \left[\begin{array}{l} M1_{\text{CO}} \cdot (22.49 + 0.00143 \cdot t_z) \dots \\ + M1_{\text{CO2}} \cdot (39.123 + 0.003349 \cdot t_z) \dots \\ + \left[M1_{\text{H2O}} \cdot (26.67 + 0.004438 \cdot t_z) \dots \right] \dots \\ + \left[M1_{\text{H2}} \cdot (19.678 + 0.001758 \cdot t_z) \right] \dots \\ + M1_{\text{N2}} \cdot (21.951 + 0.001457 \cdot t_z) \end{array} \right] \cdot t_z = 0$$

$$g1 := \text{Find}(t_z) \quad g1 = 2644.047$$

$$t_{z1} := g1$$

Given

$$\xi_{z2} \cdot H_{rob2} + m_{C_{v2}} \cdot t_{c2} - \mu_2 \cdot \frac{1}{M_{22}} \cdot \left[\begin{array}{l} M_{2CO} \cdot (22.49 + 0.00143 \cdot t_z) \dots \\ + M_{2CO2} \cdot (39.123 + 0.003349 \cdot t_z) \dots \\ + \left[M_{2H2O} \cdot (26.67 + 0.004438 \cdot t_z) \dots \right] \dots \\ + M_{2H2} \cdot (19.678 + 0.001758 \cdot t_z) \dots \\ + M_{2N2} \cdot (21.951 + 0.001457 \cdot t_z) \end{array} \right] \cdot t_z = 0$$

$$g2 := \text{Find}(t_z) \quad g2 = 2848.553$$

$$t_{z2} := g2$$

Given

$$\xi_{z3} \cdot H_{rob3} + m_{C_{v3}} \cdot t_{c3} - \mu_3 \cdot \frac{1}{M_{23}} \cdot \left[\begin{array}{l} M_{3CO} \cdot (22.49 + 0.00143 \cdot t_z) \dots \\ + M_{3CO2} \cdot (39.123 + 0.003349 \cdot t_z) \dots \\ + \left[M_{3H2O} \cdot (26.67 + 0.004438 \cdot t_z) \dots \right] \dots \\ + M_{3H2} \cdot (19.678 + 0.001758 \cdot t_z) \dots \\ + M_{3N2} \cdot (21.951 + 0.001457 \cdot t_z) \end{array} \right] \cdot t_z = 0$$

$$g3 := \text{Find}(t_z) \quad g3 = 2859.096$$

$$t_{z3} := g3$$

Given

$$\xi_{z4} \cdot H_{rob4} + m_{C_{v4}} \cdot t_{c4} - \mu_4 \cdot \frac{1}{M_{24}} \cdot \left[\begin{array}{l} M_{4CO} \cdot (22.49 + 0.00143 \cdot t_z) \dots \\ + M_{4CO2} \cdot (39.123 + 0.003349 \cdot t_z) \dots \\ + \left[M_{4H2O} \cdot (26.67 + 0.004438 \cdot t_z) \dots \right] \dots \\ + M_{4H2} \cdot (19.678 + 0.001758 \cdot t_z) \dots \\ + M_{4N2} \cdot (21.951 + 0.001457 \cdot t_z) \end{array} \right] \cdot t_z = 0$$

$$g4 := \text{Find}(t_z) \quad g4 = 2923.208$$

$$t_{z4} := g4$$

Приймаємо

$$t_{z1} = 2644.04^\circ \text{C} \quad t_{z2} = 2848.55^\circ \text{C}$$

$$t_{z3} = 2859.09^\circ \text{C} \quad t_{z4} = 2923.20^\circ \text{C}$$

Температура в кінці процесу згоряння

$$n1=1000 \text{ об/хв} \quad T_{z1} := t_{z1} + 273 \quad T_{z1} = 2917.047 \text{ K}$$

$$n1=2160 \text{ об/хв} \quad T_{z2} := t_{z2} + 273 \quad T_{z2} = 3121.553 \text{ K}$$

$$n1=5400 \text{ об/хв} \quad T_{z3} := t_{z3} + 273 \quad T_{z3} = 3132.096 \text{ К}$$

$$n1=5670 \text{ об/хв} \quad T_{z4} := t_{z4} + 273 \quad T_{z4} = 3196.208 \text{ К}$$

Теоретичний максимальний тиск згорання

$$P_{z1} := \frac{P_{c1} \cdot \mu_1 \cdot T_{z1}}{T_{c1}} \quad P_{z1} = 4.567 \text{ МПа}$$

$$P_{z2} := \frac{P_{c2} \cdot \mu_2 \cdot T_{z2}}{T_{c2}} \quad P_{z2} = 3.841 \text{ МПа}$$

$$P_{z3} := \frac{P_{c3} \cdot \mu_3 \cdot T_{z3}}{T_{c3}} \quad P_{z3} = 3.978 \text{ МПа}$$

$$P_{z4} := \frac{P_{c4} \cdot \mu_4 \cdot T_{z4}}{T_{c4}} \quad P_{z4} = 3.515 \text{ МПа}$$

Дійсна величина максимального тиску згорання

$$n1=1000 \text{ об/хв} \quad P_{zd1} := 0.85 \cdot P_{z1} \quad P_{zd1} = 3.882$$

$$n1=2160 \text{ об/хв} \quad P_{zd2} := 0.85 \cdot P_{z2} \quad P_{zd2} = 3.265$$

$$n1=5400 \text{ об/хв} \quad P_{zd3} := 0.85 \cdot P_{z3} \quad P_{zd3} = 3.382$$

$$n1=5670 \text{ об/хв} \quad P_{zd4} := 0.85 \cdot P_{z4} \quad P_{zd4} = 2.988$$

Ступінь підвищення тиску

$$\lambda_{11} := \frac{P_{z1}}{P_{c1}} \quad \lambda_1 := 3.35$$

$$\lambda_{21} := \frac{P_{z2}}{P_{c2}} \quad \lambda_2 := 3.64$$

$$\lambda_{31} := \frac{P_{z3}}{P_{c3}} \quad \lambda_3 := 3.72$$

$$\lambda_{41} := \frac{P_{z4}}{P_{c4}} \quad \lambda_4 := 3.71$$

1.8. Визначення параметрів процесів розширення та випуску

$$n1'' := 1.25 \quad n2'' := 1.24 \quad n3'' := 1.23 \quad n4'' := 1.24$$

Тиск і температура в кінці процесу розширення

$$P_{B1} := \frac{P_{z1}}{\epsilon^{n1''}} \quad P_{B1} = 0.44 \text{ МПа} \quad T_{B1} := \frac{T_{z1}}{\epsilon^{n1''-1}} \quad T_{B1} = 1826.901 \text{ К}$$

$$P_{B2} := \frac{P_{z2}}{\epsilon^{n2''}} \quad P_{B2} = 0.377 \quad \text{МПа}$$

$$T_{B2} := \frac{T_{z2}}{\epsilon^{n2''-1}} \quad T_{B2} = 1991.918 \quad \text{К}$$

$$P_{B3} := \frac{P_{z3}}{\epsilon^{n3''}} \quad P_{B3} = 0.398 \quad \text{МПа}$$

$$T_{B3} := \frac{T_{z3}}{\epsilon^{n3''-1}} \quad T_{B3} = 2036.409 \quad \text{К}$$

$$P_{B4} := \frac{P_{z4}}{\epsilon^{n4''}} \quad P_{B4} = 0.345 \quad \text{МПа}$$

$$T_{B4} := \frac{T_{z4}}{\epsilon^{n4''-1}} \quad T_{B4} = 2039.557 \quad \text{К}$$

Перевірка раніше прийнятої температури залишкових газів

$$T_{r11} := \frac{T_{B1}}{\sqrt[3]{\frac{P_{B1}}{P_{r1}}}}$$

$$T_{r11} = 1129.743$$

$$t_{r1} := T_{r11} - 273$$

$$t_{r1} = 856.743$$

$$T_{r12'} := \frac{T_{B2}}{\sqrt[3]{\frac{P_{B2}}{P_{r2}}}}$$

$$T_{r12'} = 1336.628$$

$$t_{r2} := T_{r12'} - 273$$

$$t_{r2} = 1063.628$$

$$T_{r13} := \frac{T_{B3}}{\sqrt[3]{\frac{P_{B3}}{P_{r3}}}}$$

$$T_{r13} = 1357.965$$

$$t_{r3} := T_{r13} - 273$$

$$t_{r3} = 1084.965$$

$$T_{r14} := \frac{T_{B4}}{\sqrt[3]{\frac{P_{B4}}{P_{r4}}}}$$

$$T_{r14} = 1431.354$$

$$t_{r4} := T_{r14} - 273$$

$$t_{r4} = 1158.354$$

Похибка розрахунків

$$\Delta 1 := \frac{100 \cdot (T_{r11} - T_{r12})}{T_{r12}}$$

$$\Delta 1 = 18.92 \quad \%$$

$$\Delta 2 := \frac{100 \cdot (T_{r12'} - T_{r22})}{T_{r22}}$$

$$\Delta 2 = 33.663 \quad \%$$

$$\Delta 3 := \frac{100 \cdot (T_{r13} - T_{r32})}{T_{r32}}$$

$$\Delta 3 = 30.574 \quad \%$$

$$\Delta 4 := \frac{100 \cdot (T_{r14} - T_{r42})}{T_{r42}}$$

$$\Delta 4 = 36.319 \quad \%$$

3. Визначення інтегральних показників робочого циклу

Теоретичний середній інтегральний тиск

$$p_{1'} := \frac{P_{c1}}{\epsilon - 1} \cdot \left[\frac{\lambda_1}{n_{1''} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{1''}-1}} \right) - \frac{1}{n_{11} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{11}-1}} \right) \right] \quad p_{1'} = 0.957 \text{ МПа}$$

$$p_{2'} := \frac{P_{c2}}{\epsilon - 1} \cdot \left[\frac{\lambda_2}{n_{2''} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{2''}-1}} \right) - \frac{1}{n_{21} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{21}-1}} \right) \right] \quad p_{2'} = 1.013 \text{ МПа}$$

$$p_{3'} := \frac{P_{c3}}{\epsilon - 1} \cdot \left[\frac{\lambda_3}{n_{3''} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{3''}-1}} \right) - \frac{1}{n_{31} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{31}-1}} \right) \right] \quad p_{3'} = 1.026 \text{ МПа}$$

$$p_{4'} := \frac{P_{c4}}{\epsilon - 1} \cdot \left[\frac{\lambda_4}{n_{4''} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{4''}-1}} \right) - \frac{1}{n_{41} - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\epsilon^{n_{41}-1}} \right) \right] \quad p_{4'} = 0.975 \text{ МПа}$$

Середній інтегральний тиск

$$\phi_p := 0.96$$

$$n_1=1000 \text{ об/хв} \quad p_1 := \phi_p \cdot p_{1'} \quad p_1 = 0.919 \text{ МПа}$$

$$n_1=2160 \text{ об/хв} \quad p_2 := \phi_p \cdot p_{2'} \quad p_2 = 0.973 \text{ МПа}$$

$$n_1=5400 \text{ об/хв} \quad p_3 := \phi_p \cdot p_{3'} \quad p_3 = 0.985 \text{ МПа}$$

$$n_1=5670 \text{ об/хв} \quad p_4 := \phi_p \cdot p_{4'} \quad p_4 = 0.936 \text{ МПа}$$

Інтегральний коефіцієнт корисної дії η

$$H_u := 43.930$$

$$\eta_1 := \frac{p_1 \cdot l_0 \cdot \alpha_1}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_{v1}} \quad \eta_1 = 0.254$$

$$\eta_2 := \frac{p_2 \cdot l_0 \cdot \alpha_2}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_{v2}} \quad \eta_2 = 0.334$$

$$\eta_3 := \frac{p_3 \cdot l_0 \cdot \alpha_3}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_{v3}} \quad \eta_3 = 0.319$$

$$\eta_4 := \frac{p_4 \cdot l_0 \cdot \alpha_4}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_{v4}} \quad \eta_4 = 0.305$$

Інтегральна питома витрата палива

$$g_1 := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_1} \quad g_1 = 322.707 \text{ г/кВт год}$$

$$g_2 := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_2} \quad g_2 = 245.022 \text{ г/кВт год}$$

$$g_3 := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_3} \quad g_3 = 256.929 \quad \text{г/кВт год}$$

$$g_4 := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_4} \quad g_4 = 268.702 \quad \text{г/кВт год}$$

4. Ефективні показники двигуна.

Приймаємо хід поршня $V_{cp3} := 9$

$$p_{m3} := 0.034 + 0.0113 \cdot V_{cp3}$$

$$p_{e3} := p_3 - p_{m3}$$

Літраж двигуна

$$\tau := 4$$

Середній тиск механічних витрат

$$V_1 := \frac{30 \cdot \tau \cdot N_e}{p_{e3} \cdot n_N} \quad V_1 = 5.56' \text{ л}$$

Робочий об'єм циліндра

$$V_h := \frac{V_1}{i}$$

$$V_h = 1.391$$

$$V_{cp3} := 9$$

Діаметр циліндра при попередньо прийнятому ході поршня

$$k := 0.8$$

$$D := 100 \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_h}{\pi \cdot k}} \quad D = 130.34 \quad \text{мм} \quad \text{м/с}$$

$$S := k \cdot D$$

$$S = 104.272$$

Остаточно приймаємо

$$D := 130 \quad \text{мм} \quad \text{та} \quad S := 100$$

Основні параметри і показники двигуна на підставі прийнятих D і S складають:

$$F_p := \frac{\pi \cdot D^2 \cdot 10^{-2}}{4}$$

$$F_p = 132.732$$

$$V_{1v} := \frac{\pi \cdot D^2 \cdot S \cdot i}{4000000}$$

$$V_1 = 5.309$$

$$V_{1v} := \frac{V_1}{i}$$

$$V_h = 1.327$$

Середня швидкість поршня

$$V_{cp1} := \frac{S \cdot n_1}{30000}$$

$$V_{cp2} := \frac{S \cdot n_2}{30000}$$

$$V_{cp4} := \frac{S \cdot n_4}{30000}$$

$$V_{cp1} = 2.167$$

$$V_{cp2} = 9.333$$

$$V_{cp4} = 11.479$$

$$p_{M1} := 0.034 + 0.0113 \cdot V_{cp1} \quad p_{M1} = 0.058 \quad \text{МПа}$$

$$p_{M2} := 0.034 + 0.0113 \cdot V_{cp2} \quad p_{M2} = 0.139 \quad \text{МПа}$$

$$p_{M3} := 0.034 + 0.0113 \cdot V_{cp3} \quad p_{M3} = 0.136 \quad \text{МПа}$$

$$p_{M4} := 0.034 + 0.0113 \cdot V_{cp4} \quad p_{M4} = 0.164 \quad \text{МПа}$$

Середній ефективний тиск

$$p_{e1} := p_1 - p_{M1} \quad p_{e1} = 0.86 \quad \text{МПа}$$

$$p_{e2} := p_2 - p_{M2} \quad p_{e2} = 0.833 \quad \text{МПа}$$

$$p_{e3} := p_3 - p_{M3} \quad p_{e3} = 0.849 \quad \text{МПа}$$

$$p_{e4} := p_4 - p_{M4} \quad p_{e4} = 0.772 \quad \text{МПа}$$

Механічний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{M1} := \frac{p_{e1}}{p_1} \quad \eta_{M1} = 0.936 \quad \text{МПа}$$

$$\eta_{M2} := \frac{p_{e2}}{p_2} \quad \eta_{M2} = 0.857 \quad \text{МПа}$$

$$\eta_{M3} := \frac{p_{e3}}{p_3} \quad \eta_{M3} = 0.862 \quad \text{МПа}$$

$$\eta_{M4} := \frac{p_{e4}}{p_4} \quad \eta_{M4} = 0.825 \quad \text{МПа}$$

Ефективний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{e1} := \eta_1 \cdot \eta_{M1} \quad \eta_{e1} = 0.238$$

$$\eta_{e2} := \eta^2 \cdot \eta_{M2} \quad \eta_{e2} = 0.286$$

$$\eta_{e3} := \eta^3 \cdot \eta_{M3} \quad \eta_{e3} = 0.275$$

$$\eta_{e4} := \eta^4 \cdot \eta_{M4} \quad \eta_{e4} = 0.252$$

Ефективна питома витрата палива

$$g_{e1} := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_{e1}} \quad g_{e1} = 344.641$$

$$g_{e2} := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_{e2}} \quad g_{e2} = 286.036$$

$$g_{e3} := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_{e3}} \quad g_{e3} = 297.974$$

$$g_{e4} := \frac{3600}{H_u \cdot \eta_{e4}} \quad g_{e4} = 325.676$$

Ефективна потужність

$$N_{e1} := \frac{p_{e1} \cdot V_1 \cdot n_1}{30 \cdot \tau} \quad N_{e1} = 24.746 \quad \text{кВт}$$

$$N_{e2} := \frac{p_{e2} \cdot V_1 \cdot n_2}{30 \cdot \tau} \quad N_{e2} = 103.219 \quad \text{кВт}$$

$$N_{e3} := \frac{p_{e3} \cdot V_1 \cdot n_3}{30 \cdot \tau} \quad N_{e3} = 124.024 \quad \text{кВт}$$

$$N_{e4} := \frac{p_{e4} \cdot V_1 \cdot n_4}{30 \cdot \tau} \quad N_{e4} = 117.632 \quad \text{кВт}$$

Ефективний крутний момент

$$M_{e1} := \frac{30000 \cdot N_{e1}}{\pi \cdot n_1} \quad M_{e1} = 363.548 \quad \text{Нм}$$

$$M_{e2} := \frac{30000 \cdot N_{e2}}{\pi \cdot n_2} \quad M_{e2} = 352.024 \quad \text{Нм}$$

$$M_{e3} := \frac{30000 \cdot N_{e3}}{\pi \cdot n_3} \quad M_{e3} = 358.89 \quad \text{Нм}$$

$$M_{e4} := \frac{30000 \cdot N_{e4}}{\pi \cdot n_4} \quad M_{e4} = 326.205 \quad \text{Нм}$$

Погодинна витрата палива

$$G_{T1} := N_{e1} \cdot g_{e1} \cdot 10^{-3} \quad G_{T1} = 8.528 \quad \text{кг/год}$$

$$G_{T2} := N_{e2} \cdot g_{e2} \cdot 10^{-3} \quad G_{T2} = 29.524 \quad \text{кг/год}$$

$$G_{T3} := N_{e3} \cdot g_{e3} \cdot 10^{-3} \quad G_{T3} = 36.956 \quad \text{кг/год}$$

$$G_{T4} := N_{e4} \cdot g_{e4} \cdot 10^{-3} \quad G_{T4} = 38.31 \quad \text{кг/год}$$

Літрова потужність двигуна

$$N_l := \frac{N_{e3}}{V_l} \quad N_l = 23.36 \quad \text{кВт/л}$$

6. Тепловий розрахунок двигуна.

$$Q_{01} := Q_{e1} + Q_{B1} + Q_{r1} + Q_{h31} + Q_{3a11}$$

Загальна кількість тепла що вводиться в двигун $H_u := 43930$

$$Q_{01} := \frac{H_u \cdot G_{T1}}{3.6} \quad Q_{01} = 104070.67 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{02} := \frac{H_u \cdot G_{T2}}{3.6} \quad Q_{02} = 360278.307 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{03} := \frac{H_u \cdot G_{T3}}{3.6} \quad Q_{03} = 450962.968 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{04} := \frac{H_u \cdot G_{T4}}{3.6} \quad Q_{04} = 467487.307 \quad \text{Дж/с}$$

Теплота еквівалентна роботі для першого режиму роботи двигуна

$$Q_{e1} := 1000 \cdot N_{e1} \quad Q_{e1} = 24745.898 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{e2} := 1000 \cdot N_{e2} \quad Q_{e2} = 103218.799 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{e3} := 1000 \cdot N_{e3} \quad Q_{e3} = 124023.538 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{e4} := 1000 \cdot N_{e4} \quad Q_{e4} = 117632.046 \quad \text{Дж/с}$$

Теплота що передається охолоджувальному середовищу $C := 0.44 \quad m := 0.5$

$$Q_{B1} := C \cdot i \cdot (D \cdot 10^{-1})^{1+2 \cdot m} \cdot n_1^m \cdot \frac{H_u - \Delta H_{u1}}{\alpha_1 \cdot H_u} \quad Q_{B1} = 7075.659 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{B2} := C \cdot i \cdot (D \cdot 10^{-1})^{1+2 \cdot m} \cdot n_2^m \cdot \frac{H_u - \Delta H_{u2}}{\alpha_2 \cdot H_u} \quad Q_{B2} = 108813.906 \quad \text{Дж/с} \quad m := 0.65$$

$$Q_{B3} := C \cdot i \cdot (D \cdot 10^{-1})^{1+2 \cdot m} \cdot n_3^m \cdot \frac{H_u - \Delta H_{u3}}{\alpha_3 \cdot H_u} \quad Q_{B3} = 122211.284 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{B4} := C \cdot i \cdot (D \cdot 10^{-1})^{1+2 \cdot m} \cdot n_4^m \cdot \frac{H_u - \Delta H_{u4}}{\alpha_4 \cdot H_u} \quad Q_{B4} = 125641.005 \quad \text{Дж/с}$$

$$\text{Теплота що виноситься відпрацьованими газами при} \quad t_0 := 20 \quad mC_{v20} := 18.775$$

$$Q_{r1} := \frac{G_{T1}}{3.6} \cdot [M_{21} \cdot (mC_{v1}'' + 8.315) \cdot t_{r1} - M_{11} \cdot (mC_{v20} + 8.315) \cdot t_0] \quad Q_{r1} = 30077.289 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{r2} := \frac{G_{T2}}{3.6} \cdot [M_{22} \cdot (mC_{v2}'' + 8.315) \cdot t_{r2} - M_{12} \cdot (mC_{v20} + 8.315) \cdot t_0] \quad Q_{r2} = 140361.026 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{r3} := \frac{G_{T3}}{3.6} \cdot [M_{23} \cdot (mC_{v3}'' + 8.315) \cdot t_{r3} - M_{13} \cdot (mC_{v20} + 8.315) \cdot t_0] \quad Q_{r3} = 198268.344 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{r4} := \frac{G_{T4}}{3.6} \cdot [M_{24} \cdot (mC_{v4}'' + 8.315) \cdot t_{r4} - M_{14} \cdot (mC_{v20} + 8.315) \cdot t_0] \quad Q_{r4} = 237945.159 \quad \text{Дж/с}$$

Теплота втрачена зі-за неповноти згорання палива

$$Q_{h31} := \frac{\Delta H_{u1} \cdot G_{T1}}{3.6} \quad Q_{h31} = 20560.826 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{h32} := \frac{\Delta H_{u2} \cdot G_{T2}}{3.6} \quad Q_{h32} = 30505.177 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{h33} := \frac{\Delta H_{u3} \cdot G_{T3}}{3.6} \quad Q_{h33} = 25455.7 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{h34} := \frac{\Delta H_{u4} \cdot G_{T4}}{3.6} \quad Q_{h34} = 26388.457 \quad \text{Дж/с}$$

Невраховані втрати палива

$$Q_{3al1} := Q_{01} - (Q_{e1} + Q_{B1} + Q_{r1} + Q_{h31}) \quad Q_{3al1} = 21610.997 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{3al2} := Q_{02} - (Q_{e2} + Q_{B2} + Q_{r2} + Q_{h32}) \quad Q_{3al} := 22620 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{3al3} := Q_{03} - (Q_{e3} + Q_{B3} + Q_{r3} + Q_{h33}) \quad Q_{3al3} := 18995 \quad \text{Дж/с}$$

$$Q_{3al4} := Q_{04} - (Q_{e4} + Q_{B4} + Q_{r4} + Q_{h34}) \quad Q_{3al4} := 40119 \quad \text{Дж/с}$$