

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з природничих,  
технічних і гуманітарних наук у 2018/2019 навчальному році

Спеціальність – «Енергетичне машинобудування»

**«Дослідження теплового стану циліндрової  
гільзи швидкохідного дизеля»**

Шифр роботи: «Гільза»

Харків 2018

## АНОТАЦІЯ

В роботі представлені результати проміжного стану науко-дослідної дипломної роботи, в якій поставлена і вирішується задача оптимізації теплового стану циліндрової гільзи швидкохідного дизеля, зокрема отримання оптимального температурного профілю робочої поверхні гільзи. Оптимальний температурний профіль поліпшує умови роботи спряження гільза-поршень, досягається при певних температурах необхідна в'язкість моторного мастила, зменшується механічні витрати на тертя. Запропоновано для вирішення поставленої задачі заміну матеріалу серійної гільзи на алюмінієвий сплав зі зносостійким корундовим покриттям робочої поверхні, теплоізоляція зовнішньої поверхні гільзи емалевим прошарком. Представлені результати моторних та безмоторних експериментів. В розрахунках використовується математична модель на основі методу скінчених елементів.

### **Мета роботи**

Метою роботи є покращення експлуатаційних двигуна.

### **Задачі дослідження**

**Об'єкт досліджень** – циліндрова гільза швидкохідного автотракторного дизеля.

**Предмет досліджень** – теплонапружений стан гільзи.

**Наукова новизна** – використання алюмінієвих сплавів з корундовим покриттям для оптимізації теплового стану гільзи

### **Практичне значення**

Поліпшення економічних показників автотракторного дизеля

### **Структура та обсяг роботи**

Робота складається з вступ, 3 розділи та висновків. Повний обсяг роботи складає: 38стр, 9 рисунків, 4 таблиці, 17 літературних джерел.

### **КЛЮЧОВІ СЛОВА:**

ДИЗЕЛЬНИЙ ДВИГУН, ЦИЛІНДРОВА ГІЛЬЗА, БЛОК, КАМЕРА ЗГОРЯННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

## Зміст

|   |    |
|---|----|
| <b>АНОТАЦІЯ</b> .....   | 2  |
| <b>ВСТУП</b> .....  | 4  |
| 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ НДР .....                              | 6  |
| 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ГІЛЬЗИ.....         | 16 |
| 2.1 МОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ.....                                       | 16 |
| 2.2 ОПИС БЕЗМОТОРНОГО ЕКСПЕРЕМЕНТУ .....                            | 20 |
| 3 РОЗРАХУНКОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЦИЛІНДРОВОЇ ГІЛЬЗИ ..... | 27 |
| 3.1 ЗАГАЛЬНИЙ ОПИС МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ .....                        | 27 |
| 3.2 ЗАДАННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ.....                                     | 29 |
| 3.3 РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТНС ДОСЛІДНОЇ ГІЛЬЗИ ..... | 31 |
| ВИСНОВКИ.....   | 35 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....  | 36 |

## ВСТУП

Характерною особливістю циліндрових гільз сучасних автотракторних та інших типів ДВЗ, що підтверджується численними моторними випробуваннями, є значний перепад температури по висоті робочої поверхні – дзеркала. В залежності від рівня форсування двигуна температури можуть змінюватися від 250 – 300 °С у верхній частині гільзи, наближеній до камери згоряння, до 80 – 90 °С, в нижній частині, охолоджуваній рідинним охолоджувачем (вода або антифриз). С точки зору забезпечення оптимальних умов тертя, які визначаються і залежать від в'язкості моторного мастила при заданій робочій температурі дзеркала гільзи, такі температури як у верхній, так і у нижній частинах гільзи не є оптимальними.

Погіршення умов тертя призводить до зростання механічних витрат, зниження ефективних показників двигуна в цілому. Як засвідчив проведений аналіз літературних джерел, поліпшенню ефективних показників, зменшенню механічних витрат по циліндро – поршневій групі сприятимуть вирівнювання температури по висоті робочої поверхні гільзи та наближення їхніх значень до рівня 160 – 170 °С.

Крім того, слід зазначити, що значні температурні градієнти по висоті гільзи сприяють виникненню додаткових термічних напружень. Зниження таких напружень стає особливо актуальним для ДВЗ з високим рівнем форсування за температурами циклу.

Таким чином, виникає задача перерозподілу підведених і відведених теплових потоків, вирівнювання температур по висоті гільзи та досягнення оптимального рівня. З огляду на зростаючі вимоги до рівня показників по економічності та надійності сучасних автотракторних дизелів з високим рівнем форсування по літровій потужності, поставлена в науково-дослідній роботі задача – оптимізації теплового стану гільзи автотракторного ДВЗ є актуальною.

В представленому дослідженні ставляться і розглядаються наступні задачі:

- експериментальний та розрахунковий аналіз теплового стану серійної чавунної гільзи, можливості поліпшення теплового стану;
- експериментальний та розрахунковий аналіз теплового стану дослідної гільзи з алюмінієвого сплаву з корундовим покриттям робочої поверхні;
- розробка практичних рекомендацій з оптимізації теплового стану гільзи.

## 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ НДР

Дослідженню теплонапруженого стану (ТНС) циліндрових втулок (гільзи) розрахунковими і експериментальними методами присвячені загальновідомі роботи проф. Чайнова М.Д., проф. Д'яченка М.Х., проф. Шеховцова А.Ф. [1,2,4]. Розв'язання задач ТНС з використанням методу скінчених елементів (МСЕ) для деталей ДВЗ, в тому числі і для циліндрових гільз, детально розглядаються в роботах [3,5].

Так в публікації [4] розглядаються результати розрахунково-експериментального дослідження ТНС гільзи циліндра тракторного дизеля 4ЧУ12/14 (СМД-18Н), яка також є об'єктом аналізу і в представленій науково-дослідній роботі. В публікації [4] розглянуто ТНС гільзи на усталених і перехідних режимах скидання-накидання навантажень. Для уточнення граничних умов (ГУ) задачі теплопровідності було проведено відповідні моторні випробування. Гільза препарована термопарами в 16 – ти контрольних точках, рознесених по висоті робочої поверхні. Для розрахункового моделювання ТНС гільзи була побудована віссесетрична математична модель (ММ) на основі МСБ. Розрахунки та експеримент дозволили виділити найбільш напружені ділянки гільзи, а також підтвердили висновки що до суттєвої нерівномірності розподілу температур по висоті гільзи від  $270^{\circ}\text{C}$  у верхній частині до  $95-100^{\circ}$  в її нижній частині. Розглядалися режими від холостого ходу до номінального ( $N_e=73,6$  кВт,  $n=1800\text{хв}^{-1}$ ). Для уточнення ТНС, ГУ задачі механіки та перевірки адекватності ММ крім термометрії гільзи була проведена також тензометрія, тензодатчики були закріпленні на зовнішній поверхні гільзи за допомогою контактного зварювання. Для реєстрації температури і деформацій при нестационарних навантаженнях використовувалася тензометрична система СИИТ-3. Швидкодія такої системи складала 20 вимірювань за секунду, тобто на контроль всіх температур в 16-ти контрольних точках, як і такої ж

кількості деформацій було затрачено менше 2 сек. При моделюванні температурного поля гільзи були застосовані ГУ другого і третього роду.

В роботі проф. Є.І Третяка [5] була сформульована задача оптимізації теплового стану циліндрової втулки судового дизеля 6ЧН26/34, викладені можливі підходи та алгоритми проведення такої оптимізації розрахунковим методом. Характерні вимоги при цьому зводились до обмеження температур дзеркала в зоні першого компресійного кільця при положенні поршня в ВМТ, до досягнення по можливості постійної температури по висоті робочої поверхні в межах 160-170°C. Формулювання задачі оптимізації при розробці одного з алгоритмів, було пов'язане, як відзначається в [5], з необхідністю призначення обмежень на температуру дзеркала гільзи. Одним з варіантів вибору допустимої температури гільзи стало компромісне рішення, яке б враховувало, по перше, залежність коефіцієнта тертя  $f$  спряженні поршневі кільця – гільза ( $f_{m*n}$ , при  $t_{ц}=180-220^{\circ}\text{C}$ ) та, по-друге, працездатність гільзи з досвіду експлуатації судових ДВЗ ( $t_{ц} = 160-170^{\circ}\text{C}$ ). В якості оптимальної була прийнята температура  $t_{ц} \leq 165^{\circ}\text{C}$  по всій висоті дзеркала гільзи. Для реалізації цієї умови запропоновано зменшення охолоджуваного поясу. Поставлена задача розв'язувалась методом послідовних наближень [5].

Для практичного розв'язання поставленої задачі в ході експериментальних випробувань проф. Є.І. Третяк розглядав три конструктивних варіанти циліндрової втулки: з тепловою ізоляцією нижнього поясу гільзи шляхом встановлення додаткової бандажної втулки і утворення повітряної, непротічної кільцевої порожнини; з тепловою ізоляцією у вигляді органосилікатного покриття; розділенням серійної порожнини охолодження шляхом встановлення ущільнюючої втулки і охолодження лише верхнього більш термічно навантаженого поясу. Для останнього з запропонованих варіантів були отримані в моторному експерименті найкращі результати, внаслідок поліпшення умов змащення при оптимальних температурах гільзи зниження ефективної витрати палива на експлуатаційних режимах роботи одноциліндрового відсіку двигуна

складало 2-4 г/(кВт год). Були також отримані позитивні результати що до кавітаційної стійкості гільзи [6].

Для підсилення теплоізолюючого ефекту в нижній переохолодженій частині гільзи автотракторного дизеля необхідно було при проведенні даної НДР визначитися з типом теплоізоляційного покриття зовнішньої поверхні гільзи, яка контактує з охолоджуючою рідиною. На основі проведеного аналізу теплофізичних властивостей, відомих технологій нанесення, практичного застосування для теплоізоляції деталей ДВЗ було обране емалеве покриття. Детальний аналіз властивостей такого покриття, його теплонапруженого стану при нанесенні на деталі ДВЗ знаходимо в роботі проф. А.Ф. Шеховцова [7]. Відзначається високий термічний опір такого покриття, що дозволяє помітно підсилити тепло ізолюючий ефект при порівняно незначній його товщині. Умовою доцільності використання емальованих деталей ДВЗ, враховуючи умови їхньої роботи, крім теплозахисного ефекту, є також прийнятна довговічність найбільш розповсюджені дефекти – це тріщино утворення в прошарку емалі, відшарування з поверхні деталі.

При цьому зі збільшенням товщини покриття його опір тріщино утворенню і відшаруванню з поверхні деталі помітно погіршується. Оптимальною товщиною, як відзначається в роботі [7], є значення  $\delta \leq 0,5$  мм.

Позитивні властивості емалевого покриття при його нанесенні на вироби з чавуну та інших металів, детальний опис технологій нанесення наведені в роботі проф. Брагіної Л.Л. [8]. Емалеве покриття має низький у порівнянні з чавуном коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda = 0.84-1.24$  Вт/(м.к)), міцно і надійно утримується на чавуні, має простий і технологічний спосіб нанесення. Емалеве покриття наносять на металеві вироби у вигляді рівномірного прошарку певної товщини. Цей прошарок після термічної обробки має комплекс властивостей, які гарантують якість: заданою оптимальною товщиною, мінімальною різнотовщинністю по всій поверхні нанесення, суцільністю, міцністю [8].



В основу дослідження [9], в якому також вирішуються задачі оптимізації теплового стану циліндричної гільзи середньо обертового дизеля 6ЧН26/34 отримання раціонального профілю температури робочої поверхні гільзи по її висоті були покладені вже згадані розрахунково-експериментальні роботи [5,6], які проводилися на кафедрі ДВЗ НТУ ХПІ під керівництвом проф. Є.І. Третьяка у 80-х роках. Зі зростанням вимог до техніко-економічних показників сучасних середньообертових дизелів забезпечення оптимального теплового стану робочої поверхні гільзи стає більш актуальним і вимагає додаткових розрахунково-експериментальних досліджень.

В дослідженні [9] вирішувалися наступні задачі:

- аналіз впливу теплового стану гільзи на механічні витрати по двигуну, аналіз конструктивних засобів оптимізації теплового стану;
- розробка ММ теплонапруженого стану циліндрової гільзи середньообертового суднового дизеля на базі МСЕ та її уточнення на основі результатів експериментальних досліджень;
- розрахунковий аналіз ТНС гільзи, визначення впливу окремих конструктивних факторів на тепловий стан гільзи;
- розробка практичних рекомендацій, що до оптимізації теплового стану гільзи з точки зору зменшення витрат на тертя і викидів теплоти в систему охолодження.

Розроблена скінченоелементна модель дозволяє враховувати теплофізичні властивості матеріалів та покриття, складну геометрію, наявність охолодження та інших факторів.

В розрахунковій частині дослідження [9] розглядалися наступні варіанти:

- серійна циліндрова гільза дизеля 6ЧН26/34 з рідинним охолодженням нижнього і верхнього (з орбленням) поясів (варіант А);
- циліндрова гільза в серійному виконанні, але за відсутності рідинного охолодження нижнього поясу (варіант Б);

- циліндрова гільза з теплозахисними покриттям нижнього поясу, з рідинним охолодженням нижчого та верхнього поясу (варіант В);
- Циліндрова гільза з теплозахисним покриттям нижчого поясу та при відсутності рідинного охолодження як нижнього, так і верхнього поясів (варіант Г).

Для уточнення ГУ задачі теплопровідності були використані результати експериментів, проведених на дизелі 6ЧН26/34 на режимах  $N_e=147\text{кВт}$  при  $n=750\text{хв}^{-1}$  [5,6]. Зазначені експерименти засвідчили, що температурний стан серійної гільзи близький до переохолодження. Аналіз ТНС таких деталей в літературних джерелах зустрічається порівняно рідко, в більшості випадків розглядаються розрахунки ТНС для теплонапружених деталей з метою поліпшення показників надійності. Тому автори [9] при розробці ГУ задачі теплопровідності скористалися матеріалами дослідження [4], проведеному, як і в нашому випадку, для циліндрової гільзи автотракторного дизеля.

Порівняльний аналіз температурного стану робочої поверхні гільзи в роботі [9] проводиться по 7 – ми контрольних точках, які використовувалися для розміщення термопар і в моторних експериментах [5,6]. Оцінюється вплив окремих конструктивних заходів (варіанти Б,В,Г) на температурний стан гільзи.

Для варіанта А (серійна гільза) отримані розрахунком результати відрізняються від експериментальних по контрольних точках в межах 3 – 5 °С, що з урахуванням достатньої кількості контрольних точок, рознесених майже по всій висоті гільзи, свідчить про коректність завдання ГУ задачі теплопровідності. Температурний стан як робочої поверхні в зоні роботи компресійних кілець, так і гільзи в цілому, характеризується низьким рівнем температур. Порівняльний аналіз напружено – деформованого стану виявив значні резерви підвищення рівня форсування двигуна[9].

Запровадження відключення охолодження нижнього поясу (варіант Б) позначилося певним чином на температурні профілі робочої

поверхні гільзи в зоні роботи компресійних кілець. Найбільший суттєвий приріст температур від 110-140°C можна спостерігати в нижній частині гільзи, ефект майже непомітний у верхній, най більш найбільш напруженій частині (240-250°C). Відсутність охолодження нижнього поясу практично не позначилася на максимальних значеннях складових напруженого стану [9].

Нанесення теплоізоляційного емалевого прошарку товщиною 0.5мм на поверхню нижнього охолоджуваного поясу за наявності рідинного охолодження цієї поверхні дозволило підняти температуру робочої поверхні на 10-20°C. Ефект більш помітний в нижній частині і послаблюється у верхній. Для даного варіанта було серед інших складових напруженого стану проаналізовані складові по товщині емалевого покриття, бо саме їх рівень визначає довговічність покриттям в експлуатації. Отримані напруження (15-20Мпа) далекі від критичних для емалі (80МПа), що підтверджує надійність покриття та можливість його практичного використання, зокрема у нашому випадку для оптимізації теплового стану циліндрової гільзи автотракторного дизеля [9].

Проведені розрахунки (варіанти Б,В) засвідчили недостатню ефективність окремо теплоізоляційного покриття і відключення охолодження нижнього поясу. В варіанті Г були змодельовані умови, направлені на більш суттєве обмеження тепловідведення і оптимізацію температурного профілю робочої поверхні гільзи. Моделювалося одночасне відключення охолодження на ділянках теплообміну нижнього і верхнього поясів і наявність тепло ізолюючого покриття нижнього поясу.

Виключення охолодження на ділянці верхнього поясу з оребренням значно посилило ефект зростання температури поверхні у верхній частині гільзи на ділянці тертя до 160-165°C, при цьому спостерігаємо також приріст температур і по нижній частині поверхні да 145-155°C [9].

Проведене розрахункове дослідження [9] підтвердило можливість отримати на найбільш напружених режимах середньообертового дизеля

температурний профіль робочої поверхні гільзи, близький до оптимального. Як основні засоби управління тепловим станом гільзи рекомендовано локальне рідинне охолодження та використання теплоізованого емалевого покриття.

Детальний аналіз впливу відомих конструктивних засобів на тепловий стан циліндрової гільзи дизеля 4ЧН12/14 з метою його оптимізації наведено в публікації [10].

Метою дослідження [10] було подальше вдосконалення конструкції циліндро-поршневої групи сучасних автотракторних дизелів, підвищення економічних показників при високому рівні надійності.

В роботі вирішувалися наступні задачі:

- аналіз та вибір серед відомих, практично вже реалізованих конструктивних рішень для ефективного регулювання процесів теплопідведення та тепловідведення до циліндрової гільзи автотракторного дизеля;
- розрахункове моделювання ТНС гільзи з елементами теплоізоляції внутрішньої та зовнішньої поверхонь, з комбінаційно таких рішень.

Дослідження [10] мало розрахунковий характер, скінченоелементна ММ теплонапруженого стану гільзи дизеля 4ЧН12/14 для номінального режиму ( $N_e = 73.6 \text{ кВт}$   $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$ ) було побудована на основі результатів експериментальної термометрії гільзи. Цей моторний експеримент розглядається в публікації [4].

В проведеному розрахунковому моделюванні ТНС гільзи розглядалися такі конструктивні варіанти:

1. Серійна гільза, виготовлена з чавуну СЧ21-40.
2. В серійній гільзі, в верхній її частині над першим компресійним кільцем при положенні поршня в ВМТ виконується розточення, в розточення запресоване кільце висотою 13мм і радіальною товщиною 3мм. Кільце виготовлене з жароміцної сталі з високим коефіцієнтом теплопровідності,

наприклад зі сталі ЭИ-69 або ж нирезисту. Коефіцієнти теплопровідності  $\lambda$  зазначених матеріалів в робочому діапазоні температури суттєво менші, ніж у основного матеріалу гільзи: для сталі ЭИ-69- $\lambda=17-21\text{Вт}/(\text{м}^*\text{к})$ , для чавуну СЧ21-40- $\lambda=40-50\text{Вт}/(\text{м}^*\text{к})$ . Кільце встановлювалося з середнім натягом 0.092мм.

3.В даному варіанті для регулювання теплових потоків, крім вставного кільця у верхній частині, передбачалося нанесення теплоізоляційного емалевого покриття  $\delta=0.5\text{мм}$  на зовнішній поверхні гільзи, яка безпосередньо контактує з охолоджуючою рідиною.

4.Для посилення тепло ізолюючого ефекту, крім ізоляції зовнішньої бічної поверхні, теплозахисний прошарок товщиною  $\delta=0.5\text{мм}$  нанесений на бічну поверхню вставного кільця.

5.Для обмеження тепловідведення від вставного кільця зі сталі ЭИ-69 в гільзу зовнішня контактна поверхня кільця зменшена за рахунок виконання проточення з утворенням повітряної порожнини між кільцем і гільзою. Для теплообмінних поверхонь утвореної порожнини задається нульовий тепловий потік.

6.Вставне кільце з проточеним по зовнішній поверхні (варіант 5) зі сторони камери згоряння захищене теплоізоляційним прошарком емалі товщиною  $\delta=0.5\text{мм}$ , радіальна товщина кільця зменшена від 3,0 до 2,5мм для нанесення емалі. При цьому зовнішня бічна поверхня гільзи, що контактує з охолоджуючою рідиною, також теплоізолювана.

Для проведення порівняльного аналізу на робочій поверхні гільзи були виділені в контрольних точках, рознесених по висоті гільзи [10].

Результати розрахунків свідчать про наступне:

1.Температурне поле серійної гільзи відзначається значною нерівномірністю по висоті гільзи в зоні роботи компресійних кілець – від  $250^{\circ}\text{C}$  у верхній частині до  $120^{\circ}\text{C}$  у нижній. Середня частина робочої поверхні переохолоджена до  $125^{\circ}\text{C}$ .

2. Розміщення у верхній частині гільзи вставного кільця зі сталі ЭИ-69 призводить до зростання температури до  $300^{\circ}\text{C}$ , але вже на внутрішній (зі сторони камери згоряння) поверхні самого кільця. При цьому температура робочої поверхні гільзи в зоні тертя майже не знижується.

3. Поєднання вставного кільця з теплоізоляцією зовнішньої поверхні гільзи смаленим прошарком призводить до незначного зростання температури ( $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$ ) у верхній частині гільзи. Теплоізоляція суттєво впливає на температурний профіль робочої поверхні, відзначається зростання температури в середній частині поверхні тертя від  $125^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ . При цьому максимальна інтенсивність напружень в прошарку теплоізоляції становить  $76,5\text{ МПа}$ , близька до критичних значень ( $80\text{ МПа}$ ).

4. Емалеве покриття вставного кільця призводить до суттєвого (на  $100\text{-}150^{\circ}\text{C}$ ) зростання у верхній частині гільзи на поверхні самого кільця. Напруження по прошарку емалі ( $90\text{ – }120\text{ МПа}$ ), що засвідчує недоцільність цього варіанта.

5. Виконання проточення по зовнішній бічній поверхні вставного кільця призводить до незначного зростання температури ( $15\text{-}30^{\circ}\text{C}$ ) на внутрішній поверхні кільця (зі сторони КЗ), спостерігається також незначне ( $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$ ) зниження температур в точках поблизу вставного кільця.

6. Критичні напруження по смоловому прошарку, варіант не має практичного застосування.

Проведене дослідження [10] ТНС циліндрової гільзи автотракторного дизеля підтвердило недоцільність використання вставного кільця, виготовленого з матеріалу з низькою теплопровідністю для оптимізації температурного профіля гільзи.

Проведений аналіз літературних джерел підтвердив актуальність даної науково-дослідної роботи, в той же час показав, що використовуючи лише відомі конструктивні рішення (тепло ізолююче покриття в верхній частині циліндрової гільзи, кільцеві вставки з матеріалів з більш низьким коефіцієнтом теплопровідності, ніж у матеріалу гільзи) не можна досягти

бажаного результату – вирівняти температури робочої поверхні чавунної гільзи по висоті, досягли на робочій поверхні оптимального рівня температур.

Вирівнюванню температури по висоті гільзи перешкоджає насамперед низький коефіцієнт теплопровідності чавуну СЧ-21-40. При виконанні НДР було також проаналізовано досвід конструювання автотракторних ДВЗ зарубіжними виробниками [11], в цих конструкціях в багатьох випадках використовуються циліндрові гільзи з алюмінієвих сплавів, захищені на робочій поверхні зносостійким покриттям, наприклад корундовим. Підбором товщини покриття, яке створює певний тепловий бар'єр, а також тепловідведення в систему охолодження, гільза підтримується в певному температурному діапазоні, обмежується її розширення від нагрівання.

В наступних розділах НДР розглядаються результати експериментального і розрахункового моделювання теплового стану циліндрових гільз автотракторних ДВЗ, виготовлених з алюмінієвого сплаву і захищеним корундовим покриттям.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ГІЛЬЗИ

### 2.1 МОТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ

Метою проведення моторного випробування на дизелі 4ЧН12/14 було уточнення ММ теплового стану циліндрової гільзи, удосконалення методики обробки експериментальної інформації. Отримані результати, уточнення ММ передбачалося використати для розрахункового моделювання теплового стану дослідного зразка циліндрової гільзи, виготовленої з алюмінієвого сплаву. Дослідження було проведене на одному з моторних стендів на кафедрі ДВЗ НТУ «ХПІ».

При проведенні моторного експерименту використовувалася серійна гільза дизеля 4ЧН12/14, препарована хромель-алюмелієвими термопарами. Контрольні термопари розміщувалися на відстані  $1 \pm 0.1$  мм від робочої поверхні гільзи. Для оснащення гільзи в її стінці були виконані глухі отвори діаметром  $4 \pm 0.5$  мм, термопара фіксувалася в капсулі конічної форми, який з натягом був закарбований в глухий отвір в стінці циліндрової гільзи. Діаметр хромель – алюмелєві електродів складав 0.3 мм, діаметр кульки спаю 0.7-0.8 мм. В експерименті було задіяно 4 термопари, схема її розміщення представлена на рис.2.1.

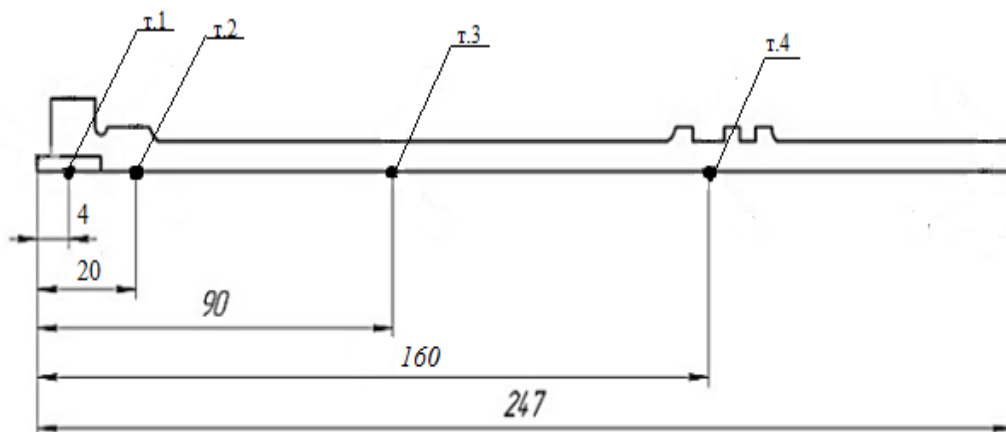


Рисунок 2.1 – Схема розміщення термопар



При проведенні моторного експерименту паралельно з отриманням температурних характеристик вирішувалася також і задача перевірки на надійність розробленого пристрою для обробки інформацію в цифровій формі [12]. Слід зазначити, що аналогічні пристрої вже використовувалися при проведенні безмоторних експериментів.

Проведення моторних експериментів у порівнянні з безмоторними ставить більш жорсткі вимоги до реєструючої апаратури, в тому числі і такої, яка здійснює запас у цифровій формі. Серед чинників які ускладнюють обробку сигналу від первинних датчиків, можна назвати підвищені температурні, вібрації, руйнівну дію палива та мастила при тривалій експлуатації такої апаратури на двигуні.

Для реєстрації сигналу від термопар використали пристрій на основі мікроконтролера з можливістю одночасної реєстрації значень температур від 16-ти термопар. Структурна схема пристрою представлена на рис.2.2 [12].

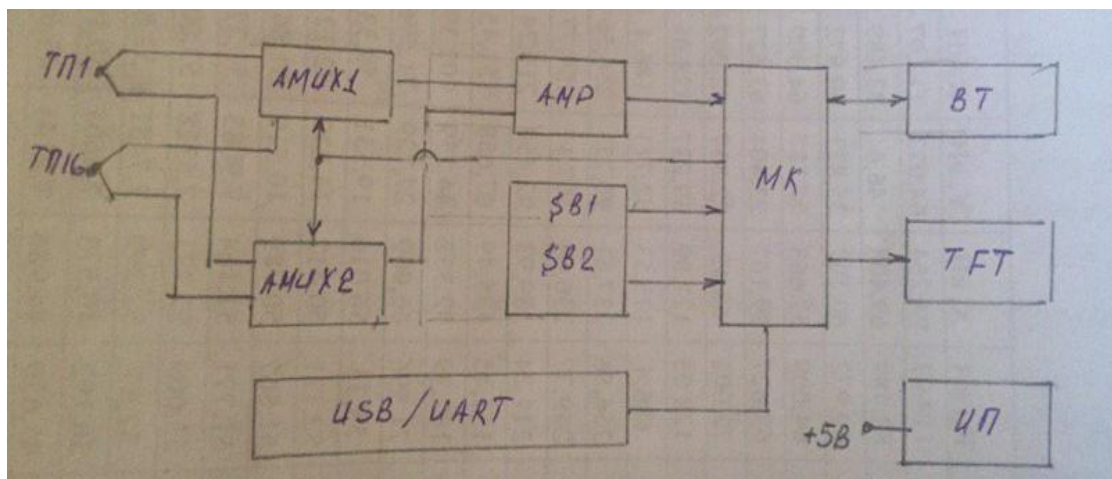


Рисунок 2.2 – Структурна схема пристрою для реєстрації температури: ТП1-ТП16 – хромель – алюмелеві термопари; AMUX1, AMUX2 – аналогові мультиплекси; AMP – вимірювальний підігрівач; SB1,SB2 – кнопка управління; МК – мікроконтролер; USB/UART – контролер послідовної передачі даних; BT – модуль бездротової передачі даних; TFT – рідкокристалевий дисплей; УП – джерело живлення.

В якості вимірювального підсилювача застосовано спеціальний підсилювач сигналу від термопар AD8495 (розробник фірма Analog Devic) – це прецизійний інструментальний підсилювач з інтегрованою системою компенсації «холодного» спаю термопар. Він формує вихідний сигнал високого рівня ( $5\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ ), безпосередньо сприймає сигнал від термопар, використовуючи цю умову комбінацію джерела опорної напруги, яка відповідає температурі танення льоду, і попередніх відкаліброваного підсилювача.

Підсилювач AD8495, крім підсилення сигналу від хромель – алюмелевих термопар, має застосування в термопарах з вимірюванням температури в градусах Цельсія, в універсальних компенсаторах «холодного» спою, при вимірюванні температура відпрацьованих газів та каталітичних перетворювачах [12].

Під управлінням мікроконтролера здійснюється циклічна комутація термопар на вході підсилювача з послідуочим аналого-цифровим перетворенням вихідної напруги, яка відповідає температурі в контрольній точці гільзи. В циклі комутації термопар і перетворення сигналів в цифровій передбачена певна затримка, яка необхідна для відновлення нормального сигналу після комутації і роботи АЦП.

Основним елементом реєструючої системи є мікроконтролер ATmega 328 з відповідними характеристиками. Мікроконтролер по черзі підключає термопару через мультипроцесор до підсилювача AD8495 і перетворює вихідну напругу в значення температури. За цикл комутації термопар в пам'яті мікроконтролера формується масив значень температур по кожній термопарі. В кінці циклу опитування термопар вся ця інформація виводиться на дисплей для відображення, а також може бути передана по каналу бездротового зв'язку Bluetooth. Передбачення можливість для оператора за допомогою кнопок управління SB1, SB2 призначати періодичність опитування, наприклад через кожні 0,5с, 1с, 5с,10с. Оператор також має

можливість вибірково виводити на дисплей всі 16 каналів ( температурних характеристик), окремо групи каналів (1-4) [12].

Для реєстрації температурних характеристик в проведеному експерименті застасоване ПК(ноутбук) зі встановленим модулем Bluetooth. В середовищі лабораторної інструментальної техніки LabVIEW було створено віртуальний інструмент для прийому інформації від вимірювального блоку з наступною графічною візуалізацією та накопиченням інформації у вигляді текстового файлу.

В проведеному експерименті з термометрію гільзи опитування термопар 1-4 проводилося через 1с. Запис температурних характеристик, необхідних для уточнення ГУ задачі теплопровідності було проведено на усталених і перехідних режимах. Зокрема на режимах номінальної потужності ( $N_e=73,6$  кВт,  $n=1800\text{хв}^{-1}$ ) для контрольних точок були отримані такі значення: точка 1- $262^\circ\text{C}$ ; точка 2- $185^\circ\text{C}$ ; точка 3- $128^\circ\text{C}$ ; точка 4- $130^\circ\text{C}$ . На рис 2.3, як приклад використання реєструючої системи для запису перехідних процесів накиду – скидання навантаження, наведені температурні характеристики: накид навантаження для  $n_{\text{хх}}=1500\text{хв}^{-1}$ ;  $p_{\text{т}}=0$  кгс  $\rightarrow n=1500\text{хв}^{-1}$ ,  $p_{\text{т}}=45\text{кГс}$ ; скидання навантаження в зворотньому напрямку [12].

Для кожного з процесів тривалість запису характеристик становить 15хв (для стабілізації температур)

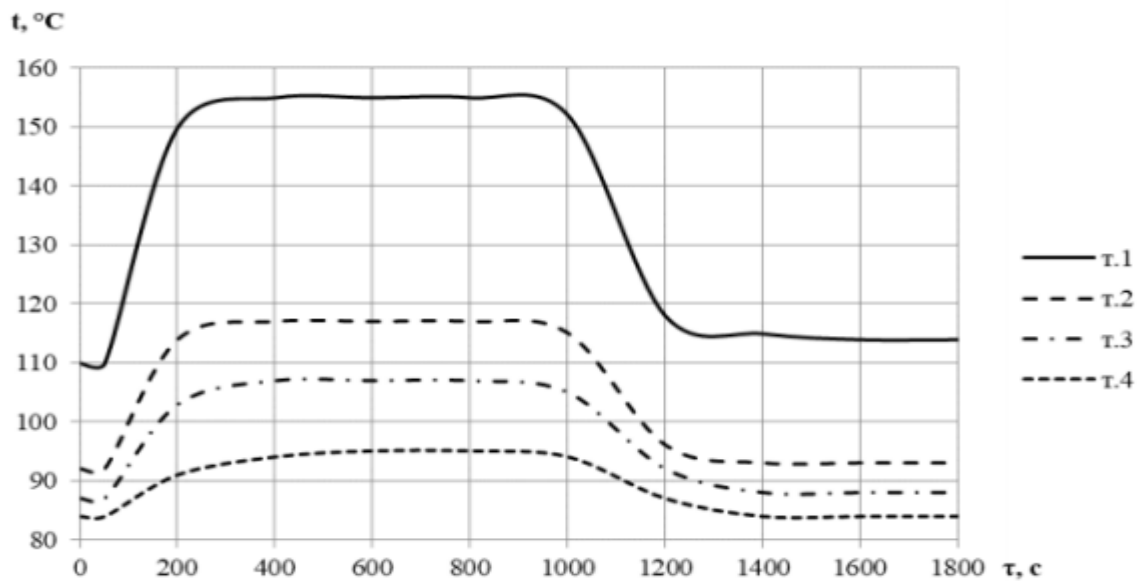


Рисунок 2-3 – Температурні характеристики для контрольних точок 1-4 на перехідних режимах

## 2.2 ОПИС БЕЗМОТОРНОГО ЕКСПЕРЕМЕНТУ

Безмоторні експерименти при проведенні досліджень теплового і напруженого деформованого стану деталей ДВЗ успішно використовувалися багатьма вітчизняними і зарубіжними дослідженнями. Аналіз результатів таких експериментів, опис окремих методів знаходиться в роботі [13].

Так проф. Г.Б. Розенбліт на безмоторних стендах вивчав вплив параметрів масляного охолодження на тепловий стан поршня дизеля Д100. З цією метою поршень, препарований термопарами, поміщався в соляний розчин з температурою до 900°C і нагрівався таким чином до експлуатаційних температур. Через поршень прокачувалося мастило, контролювалося його параметри на вході і виході, а також його витрати. Таким чином були отримані залежності теплового стану поршня, кількість відведеної з охолоджувачем теплоти від швидкості охолоджувача, близький до реального нам працюючому двигуні.

На кафедрі ДВЗ НТУ «ХП» під керівництвом проф. Шеховцова А.Ф. та проф. Абрамчука Ф.І. були розроблено ряд оригінальних стендів для фізичного моделювання процесів накопичення пошкоджень в деталях КЗ

тракторних та комбайнових ДВЗ. Зокрема, для дослідження матеріалів деталей КЗ, враховуючи специфіку їх експлуатаційних режимів, було створено безматерний стенд, призначений для випробувань на термомеханічну втому і тривалу міцність.

Метою експериментального етапу дослідження [14] була оцінка ефективності ЛО циліндрової гільзи автотракторного дизеля стиснення повітрям, визначення енергетичних витрат для створення циркуляції охолодження, а також практична оцінка динаміки зміни температури верхнього поясу гільзи від моменту підведення охолоджувача до гільзи.

Об'єктом експериментального дослідження, як і у нашому випадку, була циліндрова гільза дизеля 4ЧН12/14. Моделювався номінальний режим роботи дизеля, були використані результати моторного експерименту на номінальному режимі, проводилося заздалегідь термометрія гільзи і були визначені максимальні температури нагріву гільзи (250-260°C).

Нагрівання гільзи з виходом на усталений тепловий режим здійснювалися за допомогою плавильної печі з регулюванням напруги автотрансформатором. Встановлювалася таким чином експлуатаційна температура верхнього поясу гільзи. Після цього в порожнину, утворену в верхній частині дослідної гільзи подавалося стиснення повітря. Динаміка процесу оцінювалася за часом охолодження гільзи від початкових значень (250-260°C) до повного температурного рівня для окремих контрольних точок ( місця розміщення термопар) в межах 100-150°C [14].

Схема безмоторного стенду, згаданому в роботі [14] і на якому проводилося випробування циліндрової гільзи з алюмінієвого сплаву в нашому експерименті, наведена на рис 2.4

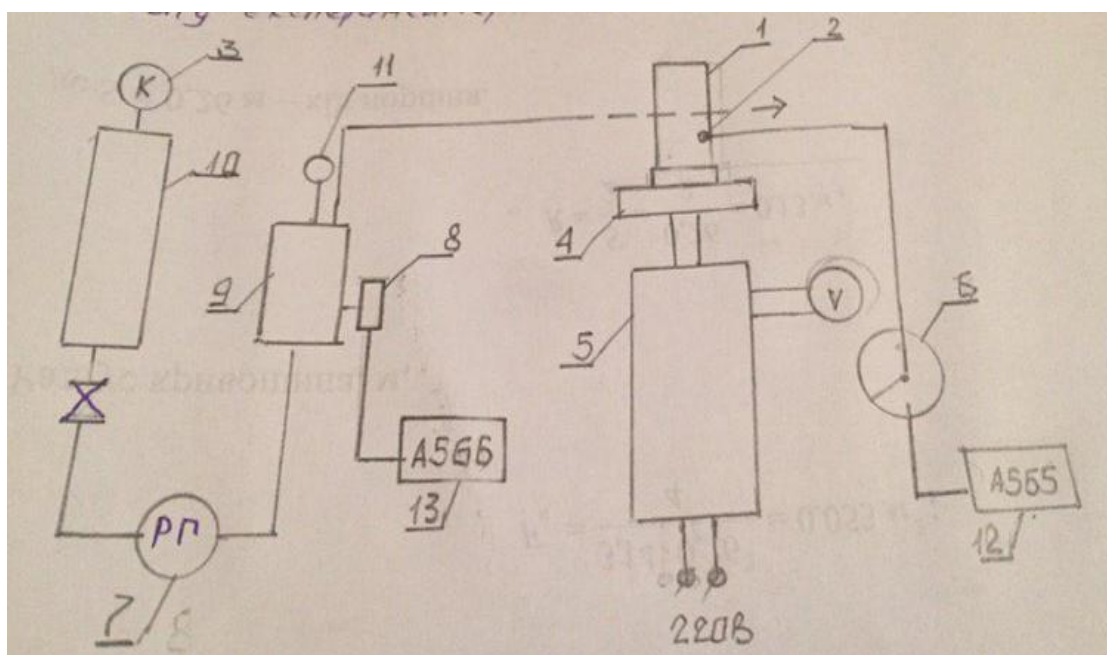


Рисунок 2.4 – Схема безмоторного стенду

Безмоторний стенд містить дослідну циліндрову гільзу 1, препаровану термопарами 2. Нагрівання гільзи 1 здійснюється за допомогою плавильної електропечі відкритого типу 4, підключеної до електромережі через автотрансформатор 5. Для нагрівання, як варіант, може використовуватися циліндричний нагрівальний елемент, який розміщується в гільзі. На схемі також показані: перемикач термопар 6, витратомір охолоджуючого повітря 7, термометр опору 8 для контролю температури охолоджуючого повітря, ресивер 9 з манометром 11, повітряний компресор 3, повітряний ресивер 10. Реєстрацій сигналів від термопар і термометра опору здійснюється відповідно цифровими вольтметрами 12 і 13.

Для проведення безмоторного дослідження, в якому планувалося в першому наближенні оцінити вплив більш високих коефіцієнтів теплопровідності алюмінієвого сплаву на температурне поле гільзи, а також тепло захисний ефект нанесеного на робочу поверхню корундового покриття, була за кресленнями серійної гільзи виготовлення дослідна зі сплаву Д16. Основні технологічні та теплофізичні властивості сплаву наведені в довіднику [15].

Сплав застосовується для виготовлення різноманітних деталей, які працюють при температурах до 150°C. Сплав виплавляється в індукційних печах, деформується у холодному і в гарячому стані, випускається у вигляді широкої номенклатури (лист, плити, прутки, профілі, труба і т.д.). Температурний інтервал плавлення 500-638°C. Фізичні властивості сплаву Д16 в залежності від температури наведені в табл 2.1 [15].

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості сплаву Д16 в залежності від температури.

| $t, ^\circ\text{C}$ | $E \cdot 10^{-5}$<br>МПа | $G \cdot 10^{-4}$<br>МПа | $\lambda$<br>Вт/(м*к) | $C$<br>кДж/(кг*к) | $\alpha \cdot 10^6 \text{к}^{-1}$ |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 20                  | 0,72                     | 0,26                     | 117                   | -                 | 21,4                              |
| 100                 | 0,66                     | 0,24                     | 129                   | 0,922             | 22,7                              |
| 150                 | 0,64                     | 0,23                     | -                     | -                 | 23,8                              |
| 200                 | 0,61                     | 0,22                     | 146                   | 0,964             | 24,7                              |
| 250                 | 0,59                     | 0,20                     | -                     | -                 | -                                 |
| 300                 | 0,52                     | 0,17                     | 163                   | 1,13              | -                                 |

Густина сплаву при 20°C складає 2780 кг/м<sup>3</sup>.

На робочу поверхню гільзи було нанесено корундове покриття, товщина якого змінювалася по лінійному закону від  $\Delta=0,20\text{мм}$  у верхній частині гільзи до  $\Delta=0,125\text{мм}$  у нижній. Технологія нанесення покриття детального опису в роботі [16], отримала назву мікродугового оксидування.

Фізикомеханічні властивості корунда ( $\alpha \text{ Al}_2\text{O}_3$ ), з посиленням на роботу [17], наведені в табл. 2.2.

Дослідні гільзи були препаровані у 5-ти контрольних точках. Використовувалися хромель-алюмелеві термопари, діаметр електродів 0,3мм, діаметр кульки спаю -0,7-0,8мм. Кулька встановлюється в глухий отвір на

відстані 2мм від робочої поверхні гільзи і фіксувалася герметиком. Розміщення контрольних точок на дослідній гільзі показана на рис 2.5.

Перший з серії запланованих експериментів відбувався в такій послідовності: в гільзу встановлену у вертикальному положенні з опорою на верхню торцеву поверхню, поміщався циліндричний нагрівальний елемент (керамічний стрижень з обпмдкою – ніхромовим дротом). Торцева поверхня гільзи також була ізольована керамікою.

Таблиця 2.2 – Фізикомеханічні властивості корунду ( $\alpha$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в залежності від температури [17].

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho$<br>кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_p$ ,<br>МПа | $\sigma_c$ ,<br>МПа | $E \cdot 10^{-5}$ ,<br>МПа | $\lambda$<br>Вт/(мк) | $\alpha \cdot 10^6$<br>к <sup>-1</sup> | $C$<br>кДж/кг*к |
|---------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|--|-----------------|
| 20                  | 4000                        | 265                 | 2989                | 3,82                       | 34,2                 | 6,2                                    | 7,27            |
| 100                 | 4000                        | 255                 | 2849                | 3,80                       | 30,1                 | 6,25                                   | 6,39            |
| 200                 | 4000                        | 245                 | 2709                | 3,79                       | 25,6                 | 6,30                                   | 5,59            |
| 300                 | 3999                        | 235                 | 2500                | 3,78                       | 17,0                 | 6,40                                   | 4,740           |
| 400                 | 3999                        | 230                 | 2430                | 3,77                       | 7,11                 | 6,45                                   | 3,860           |

Перший з серії безмоторних експериментів мав оцінку теплоізолюваний ефект корундового покриття ( $\Delta=0,20-0,15\text{мм}$ ). Спочатку нагрівалася гільза без покриття. Для дотримання однакових умов проведення випробування фіксувалися і початкові умови: температура зовнішнього середовища  $t_0=12-13^\circ\text{C}$ ; напруга на автотрансформаторі  $U=50\text{В}$ .



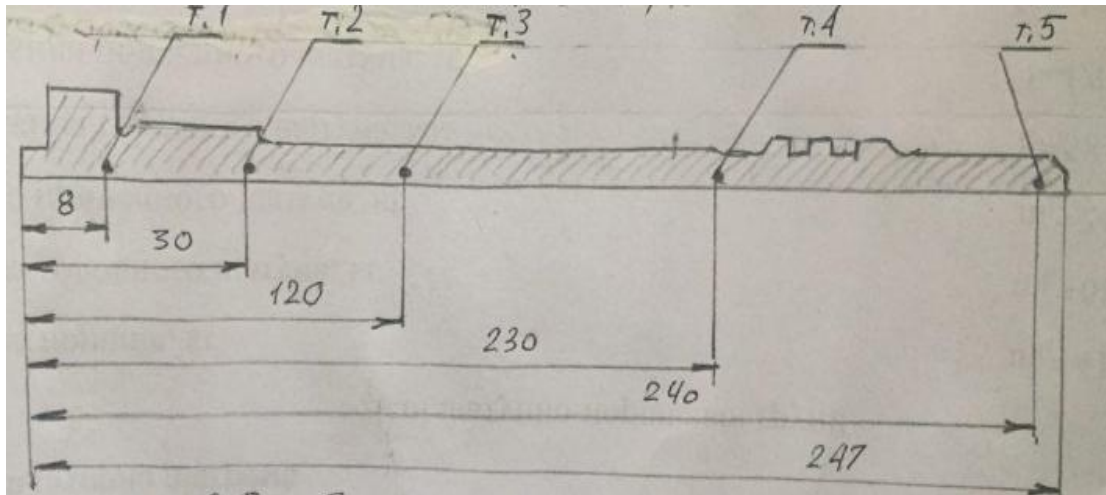


Рисунок 2.5 – Схема розміщення термопар на дослідних гільзах

Відстежувалася у часі динаміка наростання температури від початкової до досягнення певного усталеного рівня без змін напруги живлення. Потім в такій же послідовності досліджувалася гільза з корундовим покриттям. Фіксація температур проводилася через кожні 5хв, від початку нагрівання. Порівняльний аналіз динаміки змін температур не виявив суттєвої різниці для двох варіантів ( $\Delta t=10-15^{\circ}\text{C}$  – теплоізолюваний ефект покриття).

В табл. 2.3 зафіксована динаміка зміни температури в часі для контрольних точках 1-5 серійної гільзи. Розподіл температур в кожний з фіксованих моментів часу відзначається щільністю ( від 0,5 до 4 $^{\circ}\text{C}$ ), по всім контрольним точкам, що засвідчив в першу чергу значний вплив коефіцієнта теплопровідності матеріалів, в меншій мірі – вплив корундового покриття.

Таблиця 2.3 – Температурна характеристика дослідної гільзи (матеріал – сплав Д16),  $^{\circ}\text{C}$ .

| τ, хв  | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50    | 55    | 60    | 65  | 70    | 75    | 80    | 85    | 90    |
|--------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Точка1 | 12,1 | 43,6 | 65,4 | 80,3 | 91,4 | 99,9  | 105,2 | 107,7 | 108 | 109   | 111   | 111,8 | 113   | 113   |
| Точка2 | 12,0 | 43,9 | 65,8 | 80,6 | 91,7 | 100,3 | 105,3 | 108,1 | 109 | 110   | 111,4 | 112,2 | 113,4 | 114,2 |
| Точка3 | 13,0 | 43,0 | 64,6 | 79,3 | 91,7 | 100,3 | 105,3 | 107,1 | 108 | 108,9 | 110,4 | 111,2 | 112,4 | 113,2 |
| Точка4 | 12,1 | 40,7 | 61,4 | 75,6 | 86,6 | 95,1  | 100,8 | 103,4 | 104 | 105,2 | 106,7 | 107,6 | 108,9 | 109,7 |
| Точка5 | 12,5 | 40,4 | 60,7 | 75,0 | 85,8 | 94,3  | 100,1 | 102,7 | 103 | 104   | 105,9 | 106,8 | 108,1 | 109,0 |

Зниження усталених температур для точок 4 і 5 можна пояснити більшою радіальною товщиною стінки гільзи в місцях встановлення відповідних термопар. При проведенні другого з безмоторного експериментів для дослідних зразків гільзи передбачається зосередити теплопідведення зі сторони верхнього посадочного поясу гільзи, направивши основний тепловий потік впродовж гільзи. За різницею температур точок 1 і 5 можна в першому наближенні оцінити доцільність перспективність використання алюмінієвих сплавів для оптимізації температурного профілю робочої поверхні гільзи. З цією ж метою було проведено розрахунково моделювання теплового стану дослідних зразків циліндричної гільзи з корундовим покриттям. Результати дослідження розглядаються в наступному розділі.

### 3 РОЗРАХУНКОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЦИЛІНДРОВОЇ ГІЛЬЗИ

#### 3.1 ЗАГАЛЬНИЙ ОПИС МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Для моделювання ТНС циліндрової гільзи зі сплаву Д16, варіантів цієї гільзи з корундовим покриттям в представлений НДР використовується ММ, розроблена на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП». ММ уточнювала ся в ході експериментальних досліджень, посилення на цю модель знаходимо в публікаціях [13,14].

Розглядається конструкція циліндрової гільзи двигуна з рідинним охолодженням, для всіх розрахункових варіантів будується двовимірний віссиметричний модель. Підведення і відведення теплоти для всіх ділянок теплообмінної поверхні також передбачається віссиметричним.

Рішення задачі термонапруженості здійснюється за допомогою МСЕ з використанням програмного комплексу KROK, розроблено в ІПМаш АН України, та засобів моделювання ANSYS, можливості та позитивний досвід використання яких підтверджується в багатьох публікаціях.

Особливості побудови розрахункових алгоритмів зводиться до наступного. Розрахункова область являє собою меридіальний перетин віссиметричної деталі - гільзи, що може бути представлений як об'єднання окремих неоднорідних у загальному випадку підобластей, які можуть відрізнятися теплофізичними властивостями. Враховується залежність теплофізичних властивостей від температури.

Для задачі механіки ГУ задаються у вигляді переміщень та навантажень як у глобальній системі координат, так і у місцевій системі координат, вісами якої є дотична та нормаль до відповідної ділянки поверхні тіла.

На ділянках границі розрахункової області, що контактують за умовами роботи деталі зі спряженими деталями, вводиться в межах очікуваних ділянок контакту тонкий прошарок з контактних елементів, товщиною в

один скінченний елемент. Таким чином, контактуючі елементи об'єднують взаємодіючі підобласті в єдину систему, виконують функції реєстрації ділянки контакту та відриву. Такий підхід, по-перше, дозволяє моделювати різні умови роботи деталі на ділянках контакту (проковування, сухе тертя), по-друге, суттєво спрощує алгоритм рішення контактної задачі за допомогою МСЕ.

Для розв'язання задачі теплопровідності, яка може вирішуватися окремо, задають ГУ другого роду (температурний потік  $q$  на границі розрахункової області  $L$ ) та третього роду (температура середовища  $T(L)$ , коефіцієнти теплообміну  $\alpha(L)$ ). Задача теплопровідності пов'язана з задачею механіки суцільного середовища через умови контакту, які визначають в свою чергу умови теплообміну на контактних ділянках., а задача механіки враховує інформацію температурної задачі у вигляді температурного поля, в залежності від якого визначається з температурними деформаціями та механічними властивостями матеріалу в залежності від температури. Для врахування взаємного впливу задач теплопровідності та механіки виконується інтеграційний процес, у ході якого уточнюються рішення.

Для розрахунку температурного поля циліндрової гільзи в загальному випадку використовується відомі рівняння нестационарної теплопровідності

$$\text{div}[\lambda * \text{grad } T] - \rho C * dk \delta T / \delta \tau = 0$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$T$  – температура тіла;

$\rho, C$  – щільність та теплоємність матеріалу;

$\tau$  – час.

Для віссиметричної задачі теплопровідності при її розв'язанні на основі МСЕ може бути складений функціонал, мінімізацією якого знаходимо температурне поле деталі.

В нашому випадку розглядається стаціонарна задача теплопровідності (усталений тепловий режим), в загальному випадку, тобто при розгляді нестаціонарної задачі, алгоритм передбачає введення так званих управляючих функцій. Управляючі функції нумеруються у визначеному порядку та можуть бути задані, наприклад у вигляді таблиці у вихідних даних до розв'язання задачі. Управляючі функції для кожної теплообмінної поверхні меридіонального перетину задають закони зміну ГУ в часі. При використанні числових методів ефективність математичних моделювань в значній мірі залежить також від коректно заданих ГУ задач теплопровідності та механіки. При цьому уточнення ГУ в більшості випадків зводиться до послідовного, багаторазового виконання розрахунків теплового стану, перебування ГУ таким чином, що співпадання отриманих розрахунків і експериментів результатів і експериментом значень температур в контрольних точках. Чим більшою є кількість контрольних точок, тим більшою є імовірність призначених ГУ, точність роздробленої математичної моделі. В літературних джерелах зазначений процес уточнення ГУ позначається терміном «уточнення ГУ на основі розв'язання зворотної задачі теплопровідності». Такий підхід дає позитивні практичні результати, має широко розповсюдження.

### 3.2 ЗАДАННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ

При розробці ГУ задачі теплопровідності, уточнення ММ стаціонарного теплового стану циліндрової гільзи зі сплаву Д16 були використані результати моторних експериментів [4,12], проведених на дизелі 4ЧН12/14 з серійною гільзою (матеріал СЧ21-40). Схема задання ГУ задачі теплопровідності представлені на рис. 3.1. Схема розбиття теплообмінної поверхні на окремі ділянки (1-18) було використано для всіх розрахункових варіантів, так саме для всіх варіантів розглядається номінальний режим роботи дизеля ( $N_e=73,6\text{кВт}$ ,  $n=1800\text{хв}^{-1}$ ).

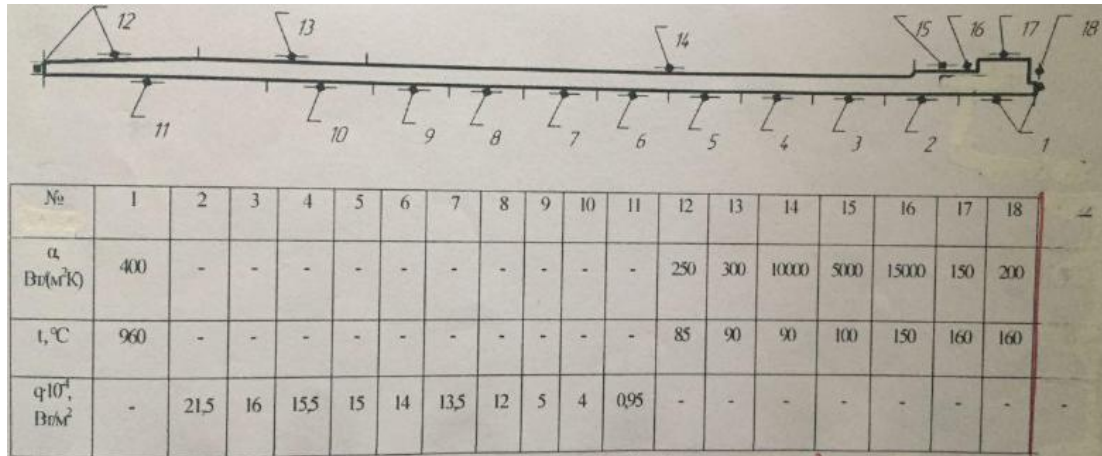


Рисунок 3.1 – Схема задання ГУ задачі теплопровідності

Вважаємо, що заміна матеріалу гільзи на сплав Д16 і використання в розрахункових варіантів корундового покриття не впливають на процеси теплообміну, а визначаються, як і для серійної гільзи, лише режимам навантаження. Для моделювання теплового стану гільзи використовуємо ГУ 2-го і 3-го роду.

При заданні ГУ задачі механіки на номінальному режимі враховуються сили тиску робочих газів (максимальний тиск  $p_z$ ), а також сила тиску  $p_a$ , яка виникає при заточуванні силових шпильок для герметизації спряження між головкою і блоком. Зазначена сила прикладена до торцевої поверхні верхнього посадочного поясу. Вважається також, що по верхньому і нижньому посадочним поясам гільзи встановлена з мінімальним зазором.

На номінальному режимі дизеля 4ЧН12/14, як показує розрахунки робочого процесу, максимальні значення тиску досягають  $p_z=9,5$ МПа. Розглядають механічні навантаження при знаходженні поршня на початку такту «розширення», поблизу ВМТ, в цей момент деталі ЦПГ сприймають максимальні навантаження. При визначенні розподілу тиску газів по висоті гільзи приймають до уваги поршневі кільця в газовій конструкції поршня дизеля 4ЧН12/14. Поверхня гільзи від її верхньої торцевої поверхні до першого компресійного кільця навантажена силою тиску газів  $p_1=p_z=9,5$ МПа.

Поверхня між 1-м і 2-м кільцями тиском  $p_2=0,5p_z=4,75\text{МПа}$ , який по лінійному закону зменшується, як показано на рис 3.2.

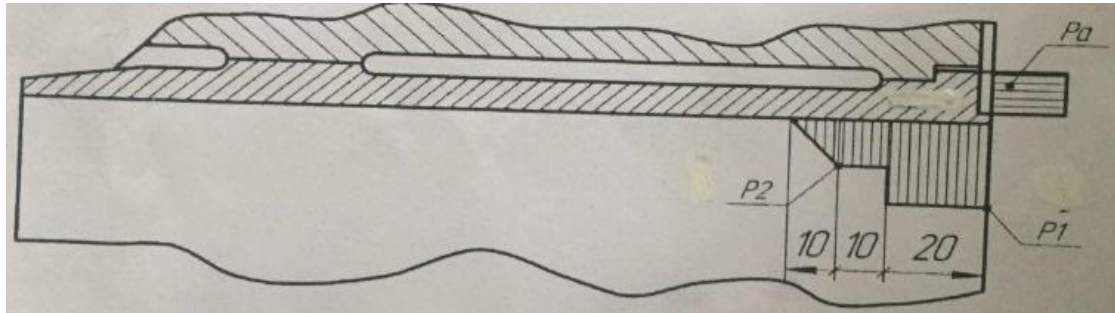


Рисунок 3.2 – Схема зада ГУ задачі механіки

Граничні умови, розроблені для серійної гільзи, цілком можуть бути застосовані і для дослідної з алюмінієвого сплаву.

### 3.3 РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТНС ДОСЛІДНОЇ ГІЛЬЗИ

Для проведення порівняльного аналізу температурного стану варіантів дослідної гільзи зі сплаву Д16, визначення впливу матеріалу, товщини покриття ( $\alpha \text{ Al}_2\text{O}_3$ ), були обрані наступні варіанти:

Варіант 1. Гільза, виготовлена за кресленнями серійної гільзи, як і решта варіантів без будь-якого тепло ізолюючого або ж зміцнюючого покриття. Така конструкція не може мати практичного застосування на ДВЗ, розглядається як суто теоретична модель для проведення порівняльного аналізу і визначення впливу корундового покриття на температурний стан гільзи.

Варіант 2. На робочій поверхні гільзи, по всій довжині нанесено корундове покриття товщиною 0,2мм. Таке ж покриття і такої товщини нанесено на зовнішню поверхню гільзи, яка контактує з охолоджуючою рідиною.

Варіант 3. На робочу і зовнішню поверхню в тих самих межах нанесене корундове покриття товщиною 0,3мм.

Варіант 4. Покриття на робочій поверхні змінюється по лінійному закону від 0,3мм у верхній частині до 0,2мм у нижній. На зовнішній поверхні товщина покриття становить 0,3мм.

Для проведення порівняльного аналізу варіантів 1-4 обрані контрольні точки 1-11 та внутрішній і зовнішній бічній поверхнях гільзи. Для порівняння результатів моделювання серійної гільзи (чавун СЧ21-40), які наведені в роботі [10], і дослідної гільзи збережене розміщення контрольних точок (рис 3.3).

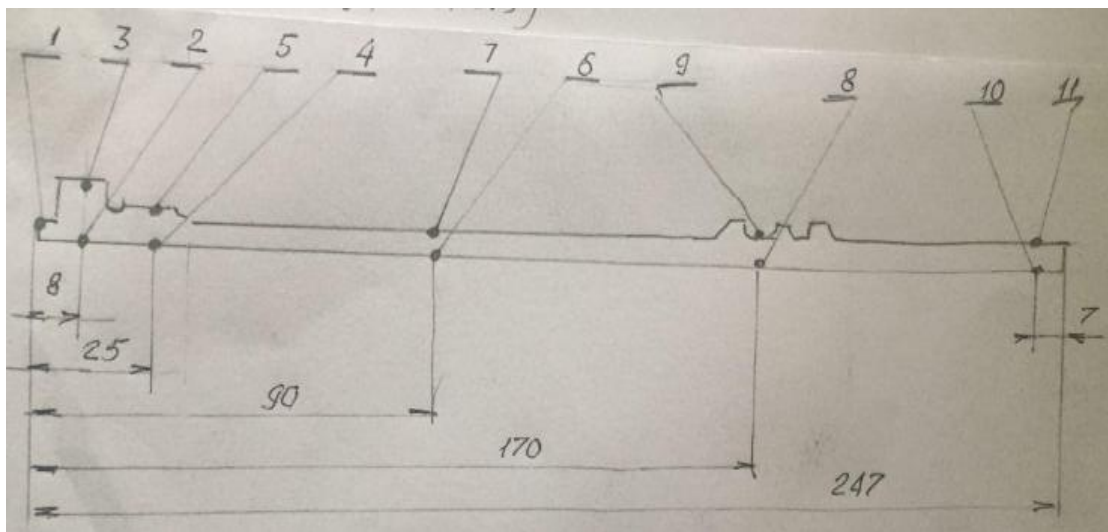


Рисунок 3.3 – Схема розміщення контрольних точок.

Розподіл температур в контрольних точках дослідної гільзи і, для порівняння, серійної представлено в табл. 3.1



Таблиця 3.1 – значення температур в контрольних точках дослідної і серійної гільзи, °С.

| № точки | 1   | 2   | 3   | 4   | Серійна гільза |
|---------|-----|-----|-----|-----|----------------|
| 1       | 214 | 217 | 219 | 219 | 278            |
| 2       | 200 | 202 | 203 | 203 | 250            |
| 3       | 179 | 120 | 120 | 120 | 202            |
| 4       | 158 | 160 | 161 | 160 | 182            |
| 5       | 140 | 140 | 141 | 140 | 139            |
| 6       | 112 | 114 | 114 | 114 | 125            |
| 7       | 102 | 102 | 102 | 102 | 102            |
| 8       | 124 | 123 | 123 | 123 | 138            |
| 9       | 122 | 121 | 121 | 121 | 134            |
| 10      | 118 | 118 | 118 | 118 | 120            |
| 11      | 118 | 118 | 117 | 117 | 119            |

Аналізуючи результати розрахунків, можна зробити такі попередні висновки щодо температурного поля гільзи. Використання алюмінієвого сплаву з більш високою теплопровідністю в робочому діапазоні температур, ніж у чавуну СЧ21-40, дозволили, за рахунок більш інтенсивного відведення теплоти від верхнього поясу гільзи, суттєва зменшити температура в цій найбільш термічно напруженій зоні (від 278 до 214°С). Зниження температур на 30-50°С відбулося також і у прилеглих зонах (точка 2,4) робочої поверхні. Слід зазначити, що цей позитивний результат досягнуто без будь яких інших засобів, зокрема локального охолодження цієї зони, використання додаткових теплозахисних елементів. В той же час теплоізоляційний ефект корундового покриття є мінімальним, оцінюється в межах 2-5°С. Можна розглядати таке покриття з товщиною 0,2-0,3мм лише як засіб захищення робочої поверхні від зношення.

Робоча зона тертя (від точки 4 до точки 8) залишається переохолодженою (158-102°С), особливо поблизу нижнього посадочного поясу. Вирішенням проблеми може бути застосування емалевого покриття

( $\lambda=0,80-0,85\text{Вт}/(\text{мК})$ ) замість корундового ( $17-34\text{Вт}/(\text{мК})$ ), збільшення товщини покриття до 0,5мм. Необхідне також внесення змін в конструкцію циліндрової гільзи і блоку циліндрів двигуна, а саме зменшення охолоджуваної поверхні, підняття нижнього посадочного поясу.

Аналіз напруженого стану. Проведений розрахунок гільзи без покриття зі сплаву Д16, як зазначалося, можна розглядати лише як теоретичний варіант. Сплав Д16 забезпечує тривалу міцність при температурах до  $80^\circ\text{C}$ , що не відповідає умовам експлуатації на ДВЗ, навіть при незначних рівнях форсування. Розрахунки напруженого стану корундового покриття показали значні закиди напружень впродовж всього прошарку, наприклад розтягуючи напруження, осьові подове гільзи – від 400 до 800МПа, що значно перевищує критичний рівень (230-260МПа, таб. 2.2). Закиди можна пояснити тим, що прошарок розглядається як суцільний, що не відповідає дійсності, Корунд утворюється на алюмінієвій поверхні у вигляді, окремих, ізольований вкраплень. Якщо прошарок розглядати як суцільний то себе проявляє суттєва різниця в коефіцієнтах лінійного розширення (таб. 2.1, таб. 2.2), в той же час як засвідчує практика [11], такі покриття надійно працюють в умовах інтенсивного тертя та високих температур.

## ВИСНОВКИ

Проведений етап НДР підтвердив доцільність використання алюмінієвих сплавів для виготовлення циліндрових гільз, а також необхідність подальшого удосконалення конструкції гільзи, зменшення поверхні охолодження, використання більш ефективного теплоізоляційного покриття, пошуку алюмінієвих або інших сплавів, які відзначаються високою теплопровідністю і високими механічними властивостями в робочому діапазоні температур двигуна.

Потребує також удосконалення методика розрахунку покриття, подібного до корундового.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. - М.1997.-152с.
2. Дьяченко Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. Л., 1974. – 552с.
3. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л., 1983. – 212с.
4. Тепловое и напряженно-деформированное состояние гильзы цилиндра быстроходного дизеля при нестационарных нагрузках. / А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ф.И. Абрамчук, А.М. Левтеров // Двигатели внутреннего сгорания. Х., - 1993. – С.9-22.
5. Третьяк Е.И. Оптимальное конструирование с помощью ЭВМ гильз цилиндров дизелей по заданным механическим требованиям // Двигатели внутреннего сгорания.Х.,-1993.-Вып.№54.-с.54-57.
- 6.Оценка возможности улучшения топливной экономичности судового дизеля 6ЧН26/34 при тепловой защите гильзы цилиндра / Е.И. Третьяк, Б.Л. Гоцкало, О.С. Кинжалов и др. // Двигатели внутреннего сгорания. Х., 1987.- Вып,№45.-с.33-39.
- 7.Шеховцов А.Ф. Исследование напряжённого состояния эмалевых покрытий ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. Х., -1974.-Вып№19.- с.108-120.
- 8.Технология эмали и защитных покрытий: учебное пособие/ Под ред. Л.Л. Брагиной, А.П. Зубехина,-х., НТУ«ХПИ»; Новочеркасск:ЮРГТУ(НПШ)-2003,-484с.
- 9.Триньов О.В. Оптимізація теплового стану циліндрової гільзи середньообертового судового дизеля/ О.В. Триньов, Р.В. Бугайцов // Двигатели внутреннего сгорания. - Х.: НТУ «ХПИ», 2018, - №2,-с.40-47.
- 10.Триньов О.В. Конструктивні засоби оптимізації теплонапруженого стану циліндрової гільзи швидкохідного дизеля / О.В. Триньов, В.В.

Коростиченко, Р.Ю. Бугайцов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017.-№2-с.33-39.

11. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей. – М.: «За рулем»,1998.-356с.

12. Триньов О.В. Експериментальне дослідження теплового стану циліндрової гільзи дизеля / О.В. Триньов, Д.Г.Сівих, Р.Ю. Бугайцов//Двигателя внутреннего сгорания.-Х.: НТУ «ХПИ», 2018.-№1.-с.44-48.

13. Триньов О.В. Локальне охолодження теплонапружених деталей ДВЗ: Навч. посібник / О.В. Триньов: НТУ «ХПИ», Харків-Київ.-2018,-212с.

14. Тринёв А.В. Расчетное моделирование оптимального теплового состояния гильзы цилиндра быстроходного дизеля / А.В. Тринёв, В.И. Калантай // Двигатели внутреннего сгорания., - Х. НТУ «ХПИ»,-2012.-№1.-с.35-41.

15. Масленков С.Б. Стали и сплавы для высоких температур,: Справ. изд в 2-х кн. Кн. 2/ С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова. – М:Металлургия, 1991. 832с.

16 Шпаковский В.В. Повышение ресурса и снижение расхода топлива ДВС путем применения частично – динамической термоизоляции камеры сгорания: Учеб. пособие / В.В. Шпаковский. Харьков: НТУ «ХПИ», 2012.- 132с.

17. Никитин М.Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей / М.Д. Никитин, В.В. Чигринов, В.Б. Чигринов. - Л.:Машиностроение, 1977.-165с.