

**РОЗРАХУНКОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ
ЦИЛІНДРОВОЇ ГІЛЬЗИ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ**

Шифр роботи: «ГІЛЬЗА»

АНОТАЦІЯ

В науковій роботі під шифром «ГІЛЬЗА» досліджується проблематика поліпшення економічних показників дизелів автотракторного типу за рахунок зменшення механічних витрат на тертя в sprzęженні поршень-циліндрова гільза.

Метою науково-дослідної роботи є розробка, аналіз конструктивних заходів, направлених на оптимізацію теплового стану робочої поверхні циліндрової гільзи по висоті, досягнення більш рівномірного розподілу температур, які б були максимально наближені до оптимальних значень з точки зору в'язкості моторного мастила на робочій поверхні гільзи, зниження таким чином механічних витрат, підвищення ефективних показників дизеля.

Актуальність роботи полягає в розробці оригінальних конструктивних рішень щодо конструкцій циліндрових гільз, виготовлених з алюмінієвих сплавів з нанесенням корундового зносостійкого покриття на робочу поверхню. Такі конструктивні рішення не є типовими для більшості конструкцій автотракторних дизелів, мало досліджені в науково-технічній літературі.

В роботі розглядаються декілька варіантів конструкцій циліндрових гільз, для кожного з варіантів проведено аналіз теплонапруженого стану, проаналізовано переваги і недоліки конструкцій, показані переваги гільз з алюмінієвих сплавів, як матеріалів з суттєво більшою теплопровідністю, що сприяє більш рівномірному розподілу температури по висоті, підтриманню оптимальної в'язкості моторного мастила, зменшення механічних витрат.

На основі отриманих результатів підготовлено дві статті у фахових виданнях.

Методи досліджень – розрахунковий аналіз теплонапруженого стану, проведення безмоторних експериментів для уточнення граничних умов.

Робота включає: 31 с., 6 рис., 4 табл., 17 літературних джерел, 1 додаток.

ДИЗЕЛЬ, ЦИЛІНДРОВА ГІЛЬЗА, ТЕПЛОНАПРУЖЕНИЙ СТАН, ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ, МЕХАНІЧНІ ВТРАТИ

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Аналіз публікацій за темою НДР.....	5
2 Експериментальні дослідження теплового стану гільзи.....	14
2.1 Моторні випробування	14
2.2 Опис безмоторного експерименту	15
3 Математичне моделювання теплового стану циліндрової гільзи.....	22
3.1 Загальний опис математичної моделі	22
3.2 Задання граничних умов	23
3.3 Результати математичного моделювання ТНС дослідної гільзи	25
Джерела інформації.....	29
Додаток А.....	31

ВСТУП

Характерною особливістю циліндрових гільз сучасних автотракторних та інших типів ДВЗ, що підтверджуються численними моторними випробуваннями, є значний перепад температур по висоті робочої поверхні – дзеркала. В залежності від рівня форсування двигуна температури можуть змінюватися від 250–300°C в верхній частині, до 80–90°C в нижній, охолоджуваній рідинним охолоджувачем. З 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.

Крім того, значні температурні градієнти 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 теплових потоків, вирівнювання температур по висоті гільзи та досягнення оптимального рівня.

З огляду на зростаючі вимоги до рівня показників поставлена в науково-дослідній роботі задача – оптимізації теплового стану гільзи автотракторного ДВЗ є актуальною.

В представленому дослідженні ставляться і розкриваються наступні задачі:

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

1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ НДР

Дослідженню теплонапруженого стану (ТНС) циліндрових втулок (гільз) 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 роботі [3].

Так в публікації [4] розглядаються результати розрахунково-експериментального дослідження ТНС гільзи циліндра тракторного дизеля 4ЧН12/14 (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 були проведені відповідні моторні випробування. Гільза препарована термopарами в 16-ти контрольних точках, рознесених по висоті робочої поверхні. Для розрахункового моделювання ТНС гільзи була побудована вісесиметрична математична модель (ММ) на основі МСЕ. Розрахунки та експеримент дозволили виділити найбільш напружені ділянки гільзи, а також підтвердити висновки щодо суттєвої нерівномірності розподілу температур по висоті гільзи від 270 °С у верхній частині до 95–100 °С в її нижній частині. Розглядалися режими від холостого ходу до номінального ($N_e = 73,6$ кВт, $n = 1800$ хв⁻¹). Для уточнення ГУ задачі механіки та перевірки адекватності математичної моделі ТНС, крім термометрії гільзи, була проведена також тензометрія, тензодатчики були закріплені на зовнішній поверхні гільзи за допомогою контактного зварювання. Для реєстрації температур і деформацій при нестационарних навантаженнях використовувалася тензометрична система СИИТ-3. Швидкість 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 секунд. При моделюванні температурного поля були застосовані ГУ другого і третього роду.

Для підсилення теплоізолюючого ефекту в нижній переохолодженій частині гільзи автотракторного дизеля необхідно було при проведенні данного НДР визначитися з типом теплоізолюючого покриття зовнішньої поверхні гільзи, 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 теплоізолюючий ефект при порівняно незначній його товщині. Умовою доцільності використання емальованих деталей ДВЗ, враховуючи умови їх роботи, крім теплозахисного ефекту, є також прийнятна довговічність покриття. Найбільш розповсюджені дефекти – це тріщиноутворення в прошарку емалі, її відшарування з поверхні деталі.

При цьому зі збільшенням товщини покриття його опір тріщиноутворенню 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 ($\lambda = 0,84 - 1,24 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), 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 різнововщинністю по всій поверхні нанесення, суцільністю, міцністю [8].

В основу дослідження [9], в якому також вирішуються задачі

оптимізації теплового стану циліндрової гільзи середньообертового дизеля 6ЧН26/34, отримання раціонального профілю температури робочої поверхні гільзи по її висоті, були покладені результати розрахунково-експериментальні роботи [5, 6], які проводилися на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП» під керівництвом проф. Є.І. Третяка 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:

- 1) аналіз впливу теплового стану гільзи на механічні втрати по двигуну, аналіз конструктивних засобів оптимізації теплового стану;
- 2) розробка ММ теплонапруженого стану циліндрової гільзи середньообертового суднового дизеля на базі МСЕ та її уточнення на основі результатів експериментальних досліджень;
- 3) розрахунковий аналіз ТНС гільзи, визначення впливу окремих конструктивних факторів на тепловий стан гільзи;
- 4) розробка практичних рекомендацій, щодо 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:

- 1) серійна циліндрова гільза дизеля 6ЧН26/34 з рідинним охолодженням нижнього і верхнього (з оребренням) поясів (варіант А);
- 2) циліндрова гільза в серійному виконанні, але за відсутності рідинного охолодження нижнього поясу (варіант Б);
- 3) циліндрова гільза з теплозахисним покриттям нижнього поясу, з рідинним охолодженням нижнього та верхнього поясів (варіант В);

4) циліндрова гільза з теплозахисним покриттям нижнього 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 1ЧН26/34 на режимі $N_e = 147$ 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 зустрічаються 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 у вже згаданих 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 контрольним точкам в межах 3–5 °С, що з урахуванням достатньої кількості контрольних точок, рознесених майже по всій висоті гільзи, свідчить про коректність задання ГУ задачі теплопровідності. Температурний стан як робочої поверхні в зоні роботи компресійних кілець, так і гільзи в цілому характеризується низьким рівнем температур. Проведений аналіз напружено-деформованого стану виявив значні резерви щодо підвищення рівня форсування двигуна [9].

Запровадження відключення охолодження нижнього поясу (варіант Б) позначилося певним чином на температурному профілі робочої поверхні гільзи в зоні роботи компресійних кілець. Найбільший суттєвий приріст температур від 110 до 140 °С можна спостерігати в нижній частині гільзи,

ефект майже непомітний у верхній, найбільш термічно напруженій частині (240–250°C). Відсутність охолодження нижнього поясу практично не позначилася на максимальних значеннях складових напруженого стану [9].

Нанесення теплоізоляційного емалевого прошарку товщиною 0,5 мм 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 проаналізовано складові по товщині емалевого прошарку, бо саме їх рівень визначає довговічність покриття в експлуатації. Отримані напруження (15–20 МПа) далекі від критичних для емалі (80 МПа), 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. Моделювалось одночасне відключення охолодження на ділянках теплообміну нижнього і верхнього поясів і наявність теплоізолюючого покриття нижнього поясу.

Відключення 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 спостерігався також приріст температур і по нижній частині поверхні до 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 верхнього поясу та використання

теплоізоляційного 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:

1) аналіз та вибір серед відомих, практично вже реалізованих конструктивних рішень для ефективного регулювання процесів теплопідведення та тепловідведення до циліндрової гільзи автотракторного дизеля;

2) розрахункове моделювання ТНС гільзи з елементами теплоізоляції внутрішньої та зовнішньої поверхонь, з комбінацією таких рішень.

Дослідження [10] мало розрахунковий характер, скінченоелементна ММ теплонпруженого стану гільзи дизеля 4ЧН12/14 для номінального режиму ($N_e = 73,6 \text{ кВт}$, $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$) була побудована на основі результатів експериментальної термометрії гільзи. Цей моторний експеримент розглядається в публікації [4].

В проведенному 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 низьким коефіцієнтом теплопровідності, наприклад зі сталі ЭИ-69 або ж нирезисту. Коефіцієнти теплопровідності λ зазначених матеріалів в робочому діапазоні температур суттєво менші, ніж у основного матеріалу гільзи: для сталі ЭИ-69 - $\lambda = 17 - 21 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; для чавуну

СЧ21-40 - $\lambda = 40 - 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Кільце встановлювалося с середнім натягом 0,092 мм.

3) В даному варіанті для регулювання теплових потоків, крім вставного кільця у верхній частині, передбачалося нанесення теплоізоляційного емалевого покриття товщиною $\delta = 0,5 \text{ мм}$ на зовнішній бічній поверхні гільзи, яка безпосередньо контактує з охолоджуючою рідиною. Коефіцієнт теплопровідності емалі в робочому діапазоні температур змінювався в межах $\lambda = 0,80 - 0,85 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

4) Для посилення теплоізолюючого ефекту, крім ізоляції зовнішньої бічної поверхні, теплозахисний прошарок товщиною $\delta = 0,5 \text{ мм}$ нанесений на бічну поверхню вставного кільця (радіальна товщина кільця зменшена з 3,0 до 2,5 мм) зі сторони камери згоряння.

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.

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

Для проведення порівняльного аналізу на робочій поверхні гільзи були виділені 6 контрольних точок, рознесених по висоті гільзи [10].

Результати розрахунків, які пов'язані з температурним профілем робочої поверхні, свідчать про наступне.

1) Температурне поле серійної гільзи відзначається значною нерівномірністю по висоті гільзи в зоні роботи компресійних кілець – від

250 °C у верхній частині до 120 °C у нижній. Середня частина робочої поверхні переохолоджена до 125 °C, раціональний температурний режим (160–170 °C) підтримується на незначній частині робочої поверхні.

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

3) Поєднання вставного кільця з теплоізоляцією зовнішньої поверхні гільзи емалевим прошарком призводить до незначного зростання температур (10–20 °C) у верхній частині гільзи. Теплоізоляція суттєво впливає на температурний профіль робочої поверхні, відзначається зростання температур в середній частині поверхні тертя від 125 °C до 200 °C, при цьому максимальна інтенсивність напружень в прошарку теплоізоляції становить 76,5 МПа, близька до критичних значень (80 МПа).

4) Емалеве покриття вставного кільця призводить до суттєвого (на 100–150 °C) зростання температур у верхній частині гільзи на поверхні самого кільця. Напруження по прошарку емалі (90–120 МПа) перевищують критичний рівень, що засвідчує практичну недоцільність цього варіанта.

5) Виконання проточення по зовнішній бічній поверхні вставного кільця призводить до незначного зростання температур (15–30 °C) на внутрішній поверхні кільця (зі сторони КЗ), спостерігається також незначне (4–5 °C) зниження температур в точках гільзи поблизу вставного кільця.

6) Критичні напруження по емалевому 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 профілю гільзи. Розрахунки підтвердили доцільність використання теплоізоляції зовнішньої поверхні гільзи з метою обмеження тепловідведення в охолоджуючу рідину та досягнення раціонального за

умовами змащення і зниження витрат на тертя температурного рівня (160–170°C) робочої поверхні гільзи [10].

Проведений аналіз літературних джерел підтвердив актуальність даної науково-дослідної роботи, в той же час показав, що використовуючи лише відомі конструктивні рішення (теплоізолююче 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, досягти на робочій поверхні оптимального рівня температур.

Вирівнюванню температур по висоті гільзи перешкоджає насамперед низький коефіцієнт теплопровідності чавуну СЧ21-40. 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 регулюючи 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 захищених корундовим покриттям.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО 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, уточнену ММ передбачалося використати для розрахункового моделювання теплового стану дослідного зразка циліндрової гільзи, виготовленої з алюмінієвого сплаву. Дослідження було проведено на одному з моторних стендів на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП».

При проведенні моторного експерименту використовувалася серійна гільза дизеля 4ЧН12/14, препарована хромель-алюмелевими 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, яка з натягом була закарбована в глухий отвір в стінці циліндрової гільзи. Діаметр хромель-алюмелевих електродів складав 0,3 мм, діаметр кульки спаю - 0,7–0,8 мм. В експерименті були задіяні 4 термопари, схема їх розміщення представлена на рис. 2.1.

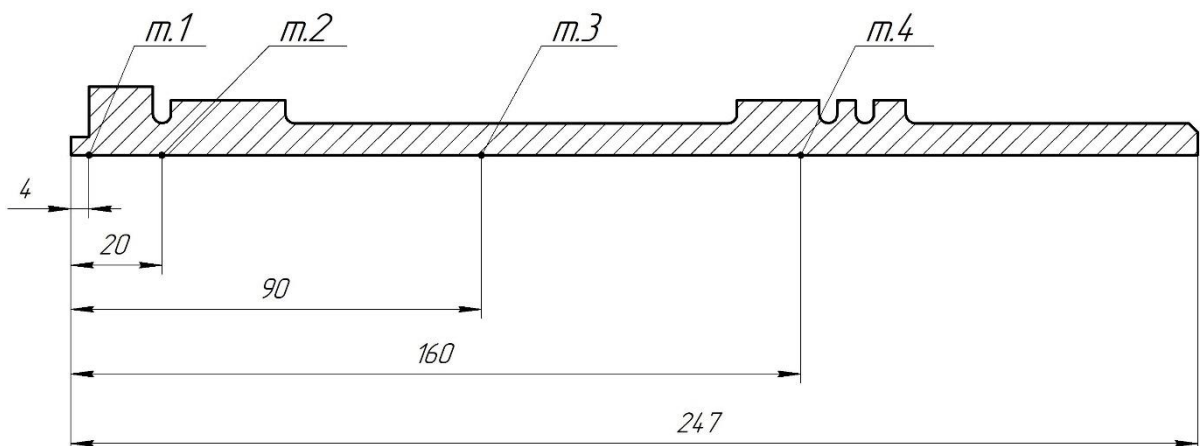


Рисунок 2.1 – Схема розміщення термопар

При проведенні моторного експерименту паралельно з отриманням температурних характеристик вирішувалася також і задача перевірки на надійність розробленого пристрою для обробки інформації 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 умови до реєструючої апаратури, в тому числі і такої, яка здійснює запис у цифровій формі. Серед чинників, які ускладнюють обробку сигналу від первинних датчиків, можна назвати підвищені температури, 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[12].

В ході проведення моторного випробування були отримані температурні характеристики серійної циліндрової гільзи дизеля 4ЧН12/14, необхідні для уточнення ММ теплового стану гільзи на номінальному режимі. При збереженні термічних і механічних умов навантаження ММ може бути використана для розрахунку температурного поля дослідних варіантів циліндрової гільзи, зокрема виготовленої з алюмінієвого сплаву.

2.2 Опис безмоторного експерименту

Безмоторні експерименти при проведенні досліджень теплового і напружено-деформованого стану деталей ДВЗ успішно використовувалися багатьма дослідниками. Аналіз результатів таких експериментів, опис окремих методик знаходимо 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 термopарами, поміщався в соляний розчин з температурою до 900°C і нагрівався таким чином до

експлуатаційних температур. Через поршень прокачувалося мастило, контролювалися його параметри на вході і виході, а також його витрати. Таким чином були отримані залежності теплового стану поршня, кількості відведеної з охолоджувачем теплоти від швидкості охолоджувача, близькій до реальної на працюючому двигуні. Отримані результати використовувалися при розробці конструкцій поршня з циркуляційним охолодженням.

На кафедрі ДВЗ НТУ «ХП» під керівництвом проф. Шеховцова А.Ф. та проф. Абрамчука Ф.І. було 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 безмоторний стенд, призначений для випробувань на термомеханічну втому і тривалу міцність. Моделювались аперіодичні теплові навантаження деталей КЗ для перехідних процесів дизеля, а також періодичні тепломеханічні навантаження від сил тиску газів та коливань температури.

Метою експериментального етапу дослідження [14] була оцінка ефективності ЛО циліндрової гільзи автотракторного дизеля стисненим повітрям, визначення енергетичних витрат для створення циркуляції охолоджувача, 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, проводилася заздалегідь термометрія гільзи і були визначені максимальні температури нагріву гільзи (250–260°C).

Нагрівання гільзи з виходом на усталений тепловий режим здійснювалося 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 стиснене повітря. Динаміка процесу оцінювалася за часом охолодження гільзи від початкових значень (250–260°C) до певного 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.

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.

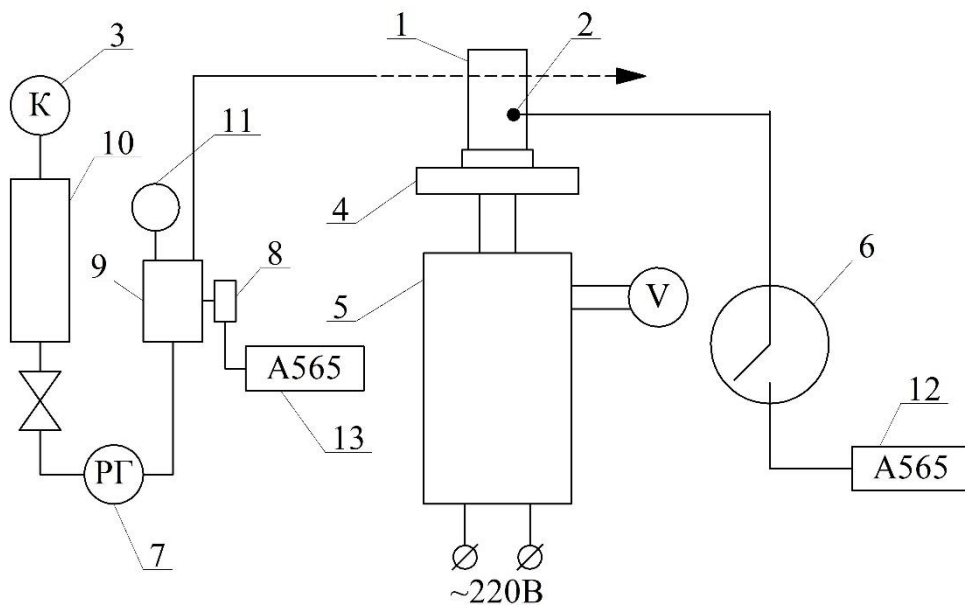


Рисунок 2.4 – Схема безмоторного стенду

Для нагрівання, як варіант, може використовуватись 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. Реєстрація сигналів від термопар і термометра опору здійснюється відповідно

цифровими вольтметрами 12 і 13.

Для проведення безмоторного експерименту, в якому планувалось в першому наближенні оцінити вплив більш високих коефіцієнтів теплопровідності алюмінієвого сплаву на температурне поле гільзи, а також теплозахисний ефект нанесеного на робочу поверхню гільзи корундового покриття, була за кресленнями серійної гільзи виготовлена дослідна зі сплаву Д16.

Сплав застосовується для виготовлення різноманітних деталей, які працюють при температурах до 150°C. Виплавляється в індукційних печах, деформується у холодному і в гарячому стані, випускається у вигляді широкої номенклатури (лист, прутки, профілі, труби й 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

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

Густина сплаву при 20°C складає $2780 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

На робочу поверхню дослідної гільзи було нанесене корундове покриття, товщина якого змінювалася за лінійним законом від $\Delta = 0,20$ мм у верхній частині гільзи до $\Delta = 0,125$ мм у нижній. Технологія нанесення покриття детально описана в роботі [16], отримала назву мікродугового оксидування.

Фізикомеханічні властивості корунда ($\alpha - Al_2O_3$), з посиланням на роботу [17], наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізикомеханічні властивості корунда ($\alpha - Al_2O_3$) в залежності від температури [17]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\sigma_p, \text{МПа}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{к}^{-1}$	$C, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
20	4000	265	2989	3,82	34,20	6,20	7,270
100	4000	255	2849	3,80	30,10	6,25	6,390
200	4000	245	2709	3,79	25,60	6,30	5,590
300	3999	235	2500	3,78	17,00	6,40	7,740
400	3999	230	2430	3,77	7,11	6,45	3,860

Дослідні гільзи були препаровані термопарами у 5-ти контрольних точках. Використовувалися хромель-алюмелеві термопари, діаметр електродів вибирався 0,3мм, діаметр кульки спаю - 0,7–0,8мм. Кулька вставлялася в глухий отвір на відстані 2 мм від робочої поверхні гільзи і фіксувалася герметиком. Розміщення контрольних точок на дослідній гільзі показано на рис. 2.5.

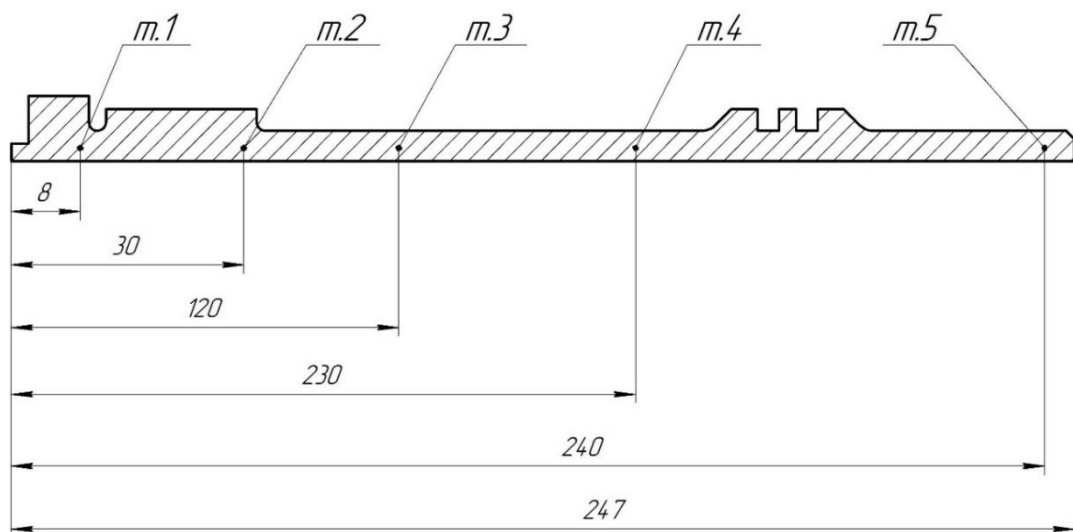


Рисунок 2.5 – Схема розміщення термопар на дослідних гільзах

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

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

Відстежувалася у часі динаміка зростання температури від початкової до досягнення певного усталеного рівня без змін напруги живлення. Потім в такий же послідовності досліджувалася гільза з корундовим покриттям. Фіксація температур проводилася через кожні 5 хв. від початку нагрівання. Порівняльний аналіз динаміки зміни температур не виявив суттєвої різниці для двох варіантів ($\Delta t = 10 - 15$ °С - теплоізоляційний ефект покриття).

В табл. 2.3 зафіксована динаміка зміни температури в часі для контрольних точок 1-5 серійної гільзи. Розподіл температур в кожний з фіксованих моментів часу відзначається щільністю (від 0,5 до 4 °С) по всім контрольним точкам, що засвідчує в першу чергу значний вплив коефіцієнта теплопровідності матеріалу, в меншій мірі – вплив корундового покриття.

Таблиця 2.3 – Температурна характеристика дослідної гільзи (матеріал – сплав Д16), °С

τ , хв	0	10	20	30	40	50	55
точка 1	12,1	43,6	65,4	80,3	91,4	99,9	105,2
точка 2	12,0	43,9	65,8	80,6	91,7	100,3	105,3
точка 3	13,0	43,0	64,6	79,3	91,7	100,3	105,3
точка 4	12,1	40,7	61,4	75,6	86,6	95,1	100,8
точка 5	12,5	40,4	60,7	75,0	85,8	94,3	100,1

Кінець таблиці 2.3

τ , хв	60	65	70	75	80	85	90
точка 1	102,7	108,0	109	111	111,8	113	113
точка 2	108,1	109,0	110	111,4	112,2	113,4	114,2
точка 3	107,1	108,0	108,9	110,4	111,2	112,4	113,2
точка 4	103,4	104,0	105,2	106,7	107,6	108,9	109,7
точка 5	102,7	103,0	104,0	105,9	106,8	108,1	109,0

Зменшення усталених температур для точок 4 і 5 можна пояснити більшою радіальною товщиною стінки гільзи в місцях встановлення відповідних термопар. При проведенні другого з серії безмоторних експериментів для дослідження зразків гільзи передбачається зосередити теплопідведення зі сторони верхнього посадочного поясу гільзи, направивши основний тепловий потік вдовж 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 проведене розрахункове моделювання теплового стану дослідних зразків циліндрової гільзи з корундовим покриттям. Результати моделювання розглядаються у наступному розділі НДР.

3 МАТЕМАТИЧНЕ 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 представленій НДР використовується ММ, розроблена на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП». ММ уточнювалася в ході експериментальних досліджень, посилання на цю модель знаходимо в публікаціях [13, 14].

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

Рішення задачі термонапруженості здійснюється МСЕ з використанням програмного комплексу *KROK*, та засобів моделювання *ANSYS*.

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

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

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

$$\operatorname{div}[\lambda \cdot \operatorname{grad}T] - \rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0,$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

T - температура тіла;

ρ, C - щільність та теплоємність матеріалу;

τ - час.

В нашому випадку розглядається стаціонарна задача теплопровідності (усталений тепловий режим), в загальному випадку, тобто при розгляді нестационарної задачі, алгоритм передбачає введення так званих управляючих функцій. Управляючі функції нумеруються у визначеному порядку та можуть бути задані, наприклад у вигляді таблиць у вихідних даних до розв'язання задачі. Управляючі функції для кожної теплообмінної поверхні меридіонального перетину задають закони зміни ГУ в часі. Так само вони можуть бути задані для врахування змін механічного навантаження, наприклад при розгляді перехідних процесів.

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 наведена в додатку А. Схема розбиття поверхні на окремі ділянки (1-18) була використана для всіх розрахункових варіантів, так само для всіх варіантів розглядається

номінальний режим роботи дизеля ($N_e = 73,6 \text{ кВт}$, $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$).

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

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

На номінальному режимі дизеля 4ЧН12/14, як показали розрахунки робочого процесу, максимальні значення тиску досягають $p_z = 9,5 \text{ МПа}$. Розглядаються 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 розміщення поршневих кілець в базовій конструкції поршня дизеля 4ЧН12/14. Поверхня гільзи від її верхньої торцевої поверхні до першого компресійного кільця навантажена силою тиску газів $p_1 = p_z = 9,5 \text{ МПа}$. Поверхня між 1-м і 2-м кільцями – тиском $p_2 = 0,5 p_z = 4,75 \text{ МПа}$, який по лінійному закону зменшується до атмосферного між 2-м і 3-м компресійними кільцями, як показано на рис. 3.2.

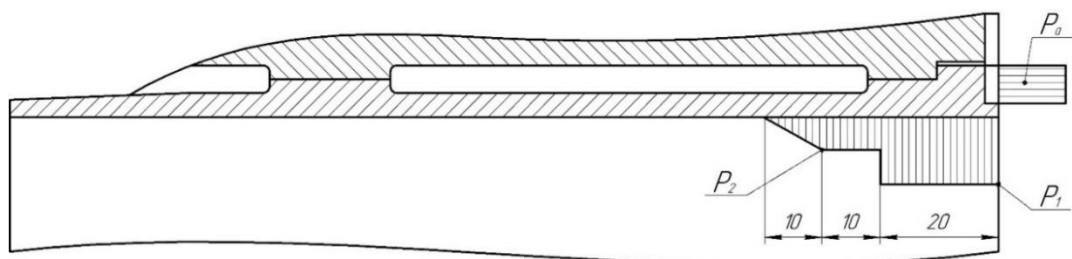


Рисунок 3.2 – Схема задання ГУ задачі механіки

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 ($\alpha - Al_2O_3$) були обрані наступні варіанти.

Варіант 1. Гільза, виготовлена за кресленнями серійної (як і решта варіантів), без будь-якого теплоізолюючого 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 нанесене корундове покриття товщиною 0,2мм. Таке ж покриття і такої ж товщини нанесене 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 на внутрішній і зовнішній бічній поверхнях гільзи. Для порівняння результатів моделювання серійної гільзи (чавун СЧ21-40), які наведені в роботі [10], і дослідженої гільзи збережене розміщення контрольних точок (рис. 3.3).

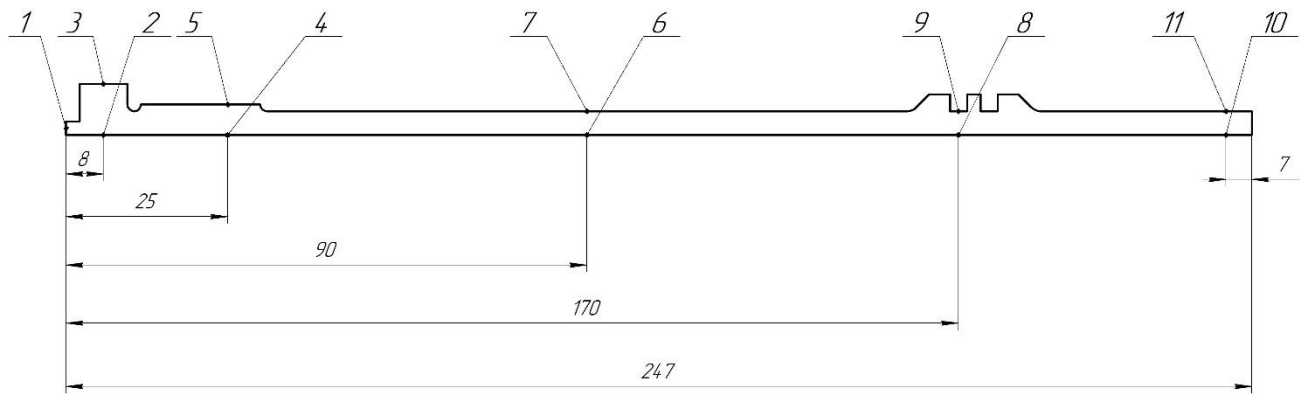


Рисунок 3.3 – Схема розміщення контрольних точок

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 гільз, °С

№ точки	Варіант розрахунку				Серійна гільза
	1	2	3	4	
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, дозволило, за рахунок більш інтенсивного відведення теплоти від верхнього поясу гільзи, суттєво зменшити температури в цій

найбільш термічно напруженій зоні (від 278 до 214 °С). Зниження температур на 30–50 °С відбулося також і у прилеглих зонах (точки 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 мінімальним, оцінюється в межах 2–5 °С. Можна розглядати таке покриття з товщиною 0,2–0,3 мм лише як засіб захищення 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 $\left(\lambda = 0,80 - 0,85 \frac{Bm}{(m \cdot K)} \right)$ замість корундового $\left(\lambda = 17 - 34 \frac{Bm}{(m \cdot K)} \right)$, збільшення товщини покриття до 0,5 мм. Необхідно також внесення змін в конструкцію циліндрової гільзи і блоку циліндрів двигуна, а саме охолоджуваної поверхні, підняття нижнього посадочного поясу.

Аналіз напруженого стану. Проведений розрахунок гільзи без покриття зі сплаву Д16, як зазначалося, можна розглядати як теоретичний варіант. Сплав Д16 забезпечує тривалу міцність при температурах до 80 °С, що не відповідає умовам експлуатації на ДВЗ, навіть при низьких рівнях форсування. Розрахунки напруженого стану корундового покриття показали значні закиди напружень вдовж всього прошарку, наприклад розтягуючі напруження, осьові вдовж гільзи – від 400 до 800 МПа, що значно перевищує критичний рівень ($\sigma_p = 230 - 265$ МПа, табл. 2.2). Закиди можна пояснити тим, що прошарок розглядається як суцільний, що не відповідає дійсності. Корунд утворюється на алюмінієвій поверхні у вигляді окремих крапель. Якщо його (прошарок) розглядати як суцільний, то себе проявляє суттєва різниця в коефіцієнтах лінійного розширення (табл. 2.1, табл. 2). В той же час, як засвідчує практика [11] такі покриття надійно працюють в

умовах інтенсивного тертя та високих температур.

Висновки: Приведений 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 методики розрахунку покриття, подібного до корундового.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. – М.1977. – 152 с.
2. Дьяченко Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания. – Л., 1974. – 552 с.
3. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л., 1983. – 212 с.
4. Тепловое и напряженно-деформированное состояние гильзы цилиндра быстроходного дизеля при нестационарных нагружениях./ А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ф.И. Абрамчук, А.М. Левтеров // Двигатели внутреннего сгорания. Х., – 1993. – Вып. №54. – 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 напряженного состояния эмалевых покрытий деталей двигателей внутреннего сгорания // Двигатели внутреннего сгорания. – Х., – 1974. – Вып.№19. – с. 108-120.
8. Технология эмали и защитных покрытий: учеб. пособие / Под ред. Л.Л. Брагиной, А.П. Зубехина. – Х., НТУ «ХПИ»; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). – 2003, – 484 с.
9. Триньов О.В. Оптимізація теплового стану циліндрової гільзи середньообертового судового дизеля / О.В. Триньов, Р.Ю. 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. – 356 с.

12. Триньов О.В. Экспериментальне дослідження теплового стану циліндрової гільзи швидкохідного дизеля / О.В. Триньов, Д.Г. Сівих, Р.Ю. Бугайцов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – №1. – с. 43-48.

13. Триньов О.В. Локальне охолодження теплонапружених деталей ДВЗ: навч. посібник / О.В. Триньов: Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут» – Київ: Вид. дім «Кондор», 2018, – 212 с.

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

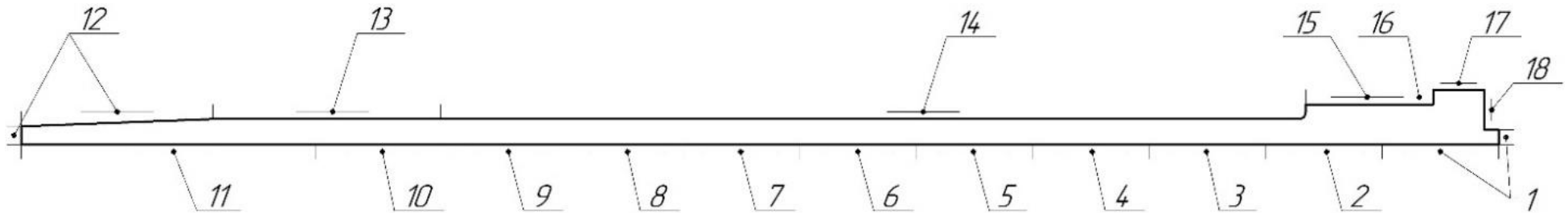
15. Масленков С.В. Стали и сплавы для высоких температур: Справ. изд. в 2-х кн. Кн.2 / С.В. Масленков, Б.А. Масленкова. – М.: Металлургия, 1991. 832 с.

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

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

ДОДАТОК А

Схема завдання ГУ задачі теплопровідності



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250	300	10000	5000	15000	150	200
$t, ^\circ\text{C}$	960	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85	90	90	100	150	160	160
$q \cdot 10^{-4}, \text{Вт}/\text{м}^2$	-	21,5	16	15,5	15	14	13,5	12	5	4	0,95	-	-	-	-	-	-	-

Рисунок А.1