

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Прокопенко Микола Вікторович

УДК 621.436.001-52

ПРОГНОЗУВАННЯ В САПР ДВЗ
ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ КАМЕР ЗГОРЯННЯ ПОРШНІВ
ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОРСОВАНИХ ШВИДКОХІДНИХ ДИЗЕЛІВ

Спеціальність 05.05.03 - Теплові двигуни

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Двигуни внутрішнього згоряння” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Пильов Володимир Олександрович,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”,
доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зарєбін Володимир Георгійович,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
м. Дніпропетровськ, завідувач кафедри експлуатації та ремонту машин;

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Білогуб Олександр Віталійович,
Акціонерне товариство закритого типу “Українські мотори”, м. Харків,
головний конструктор.

Провідна установа: Національний транспортний університет, кафедра двигунів і теплотехніки,
Міністерство освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться 30 травня 2001р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.13 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за
адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 28 квітня 2001р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Парсаданов

І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тенденція підвищення якості, скорочення строків розробки та доводки двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) з одночасним зниженням витрат на їх створення зумовлює необхідність використання САПР та таких математичних моделей, у яких найбільш повно враховано складні реальні умови роботи найважливіших деталей, вузлів та двигуна в цілому. У повній мірі це відноситься до питань забезпечення тривалої міцності деталей камер згоряння (КЗ) двигунів транспортних та сільськогосподарських машин, що визначається тепловим та напружено-деформованим станом (НДС) цих деталей, в тому числі й поршня, особливо при перспективному форсуванні. В світовій практиці двигунобудування основний акцент тут робиться на початковій стадії проектування, які передують експериментальній доводці двигуна. При цьому питання підвищення якості проектування залежать від досконалості застосованих математичних моделей.

Серед причин, що приводять до руйнування деталей КЗ, вказується на малоциклову термоутомленість, обумовлену аперіодичним навантаженням під час перехідних процесів роботи дизеля; термомеханічну утомленість, зумовлену періодичними навантаженнями високої частоти робочих циклів двигуна; повзучість матеріалу, яка виникає на стаціонарних режимах та прискорюється при перехідних процесах роботи двигуна; релаксацію термopужних напруг, що викликається обмеженням деформації повзучості. Вплив цих факторів визначає рівень тривалої міцності поршня і його експлуатаційну надійність.

Прогнозування тривалої міцності та урахування впливу моделі експлуатації на ресурс роботи КЗ поршнів швидкохідних дизелів потребують подальшого удосконалення. Відкритими залишаються вагомі питання впливу специфічного нестаціонарного навантаження двигуна на тривалу міцність найбільш теплонапруженої зони КЗ поршня, а також ролі перехідних процесів у накопиченні пошкоджень в цій зоні.

Вказане може бути найбільш ефективно виконано саме при використанні методів та засобів САПР.

Актуальність теми дисертаційної роботи полягає в необхідності розробки комплексу методик, який дозволяє засобами САПР прогнозувати тепловий та напружено-деформований стан поршня, отримувати достовірну оцінку його тривалої міцності з урахуванням моделей експлуатації швидкохідних форсованих дизелів і на цій основі розробляти шляхи підвищення ресурсу поршнів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження входить до пріоритетного напрямку Державної програми розвитку двигунобудування України на 1996-2000р.р., конкурсного проекту Міністерства освіти і науки України на 1997-1999р.р. по темі: “Проведення фундаментальних досліджень та розробка фізико-хімічних основ поліпшення до світового рівня експлуатаційних показників перспективних автомобільних двигунів українського виробництва по комплексу критеріїв максимального тепловикористання та найменшої токсичності при заданому рівні тривалої міцності та широкому використанню альтернативних палив і матеріа-

лів”.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка комплексу методик, що дозволяють оцінювати тривалу міцність камер згоряння поршнів при проектуванні форсованих швидкохідних дизелів в САПР з урахуванням моделі їх експлуатації.

Об’єкт дослідження - теплонапружений стан та тривала міцність кромки камер згоряння поршнів з урахуванням моделей експлуатації дизелів.

Предмет дослідження - поршні перспективних форсованих швидкохідних дизелів.

Методи дослідження - визначення теплового та напружено-деформованого стану шляхом чисельного експерименту за структурним методом; оцінка тривалої міцності кромки КЗ поршня за розрахунково-експериментальним методом з урахуванням комплексного впливу процесів утомленості та нестаціонарної повзучості матеріалу на процес накопичення руйнуючих пошкоджень; розрахунок нестаціонарної повзучості при термомеханічному циклічному навантаженні по теорії зміцнення; прогнозування малоциклової утомленості за методикою, що базується на деформаційному критерію утомленої міцності.

Для досягнення поставленої мети визначені такі основні задачі:

Вибір та розробка методики вирішення за допомогою САПР задач теплопровідності та термпружності з точки зору підвищення ефективності використання їх результатів на початкових чи інших стадіях проектування форсованих швидкохідних дизелів.

Розробка комплексу методик прогнозування опору пружному та пластичному руйнуванню камер згоряння поршнів з урахуванням моделі експлуатації.

Розробка методики оцінки ефективності використання різноманітних конструктивних заходів щодо підвищення тривалої міцності кромки камер згоряння поршнів на початкових стадіях проектування швидкохідних дизелів.

4.Оцінка впливу різноманітних конструктивних та режимних факторів на тривалу міцність кромки КЗ поршнів швидкохідних дизелів.

5.Розробка на цій основі практичних рекомендацій щодо забезпечення необхідної тривалої міцності поршнів перспективних форсованих швидкохідних дизелів.

Наукова новизна одержаних результатів.

Поширено метод R-функцій на визначення нестаціонарного теплонапруженого стану поршня в САПР ДВЗ.

Уточнено дані щодо впливу похибок завдання ГУ поршня швидкохідного дизеля по усіх характерних ділянках його поверхні на розрахунковий температурний стан.

Отримано емпіричні залежності для прогнозування в САПР граничних умов 3-го роду стосовно поршнів з різними типами КЗ і з урахуванням режиму роботи дизеля.

Оцінено вплив порядку чергування режимів нестаціонарного навантаження швидкохідного

дизеля на тривалу міцність кромки камери згоряння поршня при різних моделях експлуатації.

Розроблено методику оцінки ефективності використання різноманітних конструктивних заходів для підвищення тривалої міцності кромки КЗ поршнів.

Отримано нові дані щодо впливу умов експлуатації дизеля, рівня його форсування, а також конструктивних особливостей дизеля та поршня на тривалу міцність КЗ.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність роботи становлять:

- методика та пакет програм, що забезпечують розв’язання задач нестационарної теплопроводності і термопружності поршня швидкохідного дизеля в САПР з використанням структурного методу (R-функцій);
- структурна типізація камер згоряння поршнів швидкохідних дизелів та типові логічні формули для математичного опису області КЗ в САПР при використанні структурного методу розрахунку теплонапруженого стану цих деталей;
- уточнено значення ступенів поліномів, що дозволяють з необхідною точністю описати в САПР за допомогою цього методу температурне поле поршнів швидкохідних дизелів з різними типами КЗ;
- оцінка впливу різних конструктивних факторів на тривалу міцність кромки камер згоряння форсованих швидкохідних двигунів;
- нові конструктивні варіанти поршнів перспективних дизелів з вставками-тепловодами та оцінка їх ефективності.

Результати наукового дослідження впроваджені в Головному спеціалізованому конструкторському бюро по двигунам середньої потужності (номера реєстрації звітів 1279 від 1998р. та 1284 від 2000р.); використовуються в практиці НДР та ВКР в дослідних лабораторіях кафедри ДВЗ НТУ “ХПІ”, а також у навчальному процесі цього навчального закладу для студентів спеціальності 7.090210.

Особистий внесок здобувача. При виконанні дисертаційного дослідження здобувач прийняв участь у розробках таких методів та програм:

- визначення теплового і напружено-деформованого стану поршня структурним методом в САПР;
- оцінки в САПР тривалої міцності поршнів форсованих швидкохідних дизелів з урахуванням перехідних процесів їх роботи;
- прогнозування тривалої міцності поршнів з урахуванням моделі експлуатації двигуна;
- оцінки ефективності використання різноманітних конструктивних заходів, що сприяють підвищенню тривалої міцності кромки камер згоряння поршнів швидкохідних дизелів.

В опублікованих працях особисто здобувачем виконано:

- розрахункове дослідження впливу процесу повзучості на тривалу міцність поршня швид-

кохідного дизеля;

- оцінку накопичення пошкоджень повзучості в поршнях при періодичних навантаженнях дизеля;
- аналіз методів для опису повзучості матеріалів деталей КЗ при перехідних процесах роботи швидкохідних дизелів;
- типізацію конструктивних елементів, що утворюють КЗ;
- розрахункове дослідження впливу дійсних термічних напруг в зоні кромки КЗ поршня на тривалу міцність матеріалу;
- визначення кількості наближень вирішення фізично не-лінійної задачі теплопровідності і значення ступеня апроксимуючого теплове поле полінома;
- вибір варіантів тепловодів для зниження температури в зоні кромки КЗ і теплоперепаду між цією зоною та периферійною зоною огневої поверхні днища поршня;
- аналіз шляхів підвищення тривалої міцності кромки КЗ;
- розрахункове дослідження ефективності використання вставок-тепловодів в поршнях форсованих швидкохідних дизелів;
- отримання апроксимуючих залежностей для визначення коефіцієнту тепловіддачі з боку огневої поверхні днища поршня;
- отримання логічних формул для опису області КЗ;
- розрахункове дослідження впливу вставок-тепловодів на тепловий стан поршнів дизелів типу СМД;
- отримання лінійних емпіричних залежностей для визначення ГУ 3-го роду при прогнозуванні теплового стану поршнів;
- розрахункове дослідження по визначенню ступеню впливу послідовності чергування представницьких у експлуатації перехідних процесів роботи двигуна на ресурс роботи кромки КЗ;
- розробку схеми синтезу робочої програми в САПР;
- розрахункове дослідження по прогнозуванню в САПР теплового стану поршнів на експлуатаційних режимах роботи дизелів;
- прогнозування ресурсу роботи КЗ поршнів при перспективному форсуванні дизелів з урахуванням умов експлуатації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на II, III, IV і V конгресах двигунобудівників України з міжнародною участю “Прогрес - Технологія - Якість”, “Наука і практика”, Київ-Харків - Рибач’є, 1997-2000р.р.; на міжнародних науково-технічних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, Харків - Мішкольц - Магдебург (Україна - Угорщина - Німеччина), 1998-2000р.р.; на науково-технічних конференціях Харківської державної академії залізничного

транспорту, 1996-99р.р.; на конференції “Ресурсозбереження і нові технології” з міжнародною участю в Таврійській державній агротехнічній академії (м. Мелітополь), 1999р.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в трьох статтях у наукових збірниках; одній статті в науково-технічному журналі; десяти статтях в збірниках наукових праць; трьох статтях в тематичному науково-технічному збірнику; отримані два патенти України і одне позитивне рішення на видачу патенту України.

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та 2 додатків. Повний обсяг дисертації складає 201 сторінку, 27 ілюстрацій на 27 сторінках, 3 ілюстрації по тексту, 17 таблиць на 20 сторінках, 16 таблиць по тексту, 151 використаних літературних джерел на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовується актуальність розглянутої теми, сформульовано мету, основні задачі дослідження та шляхи їх вирішення.

Перший розділ присвячений питанням: аналізу необхідності урахування опору пружному та пластичному руйнуванню поршнів швидкохідних форсованих дизелів на початкових стадіях їх проектування; аналізу та вибору методів опису процесів утомленості деталей камери згоряння швидкохідного дизеля; аналізу та вибору методів опису процесів повзучості матеріалу деталей камери згоряння; вибору методу оцінки накопичених руйнуючих пошкоджень матеріалу поршня в умовах дії низькочастотної циклічної повзучості; вибору методики прогнозування теплонапруженого стану поршня та тривалої міцності кромки його КЗ з урахуванням моделі експлуатації швидкохідного дизеля.

Аналіз літературних даних свідчить, що для прогнозування малоциклової утомленості доцільно використовувати деформаційні критерії міцності. Методика розрахунку нестационарної циклічної повзучості в умовах термомеханічного навантаження матеріалу базується на теорії зміцнення. При цьому, питанням прогнозування ресурсу роботи КЗ з урахуванням прийнятої моделі експлуатації двигуна приділяється недостатньо уваги. Тому подальше використання означених методик потребує їх удосконалення з точки зору урахування навантаження дизеля на тривалу міцність КЗ та впливу різних перехідних режимів загальної моделі експлуатації двигуна на накопичення руйнуючих пошкоджень. При прогнозуванні тривалої міцності КЗ в процесі пошуку варіантів конструкцій, які задовольняють вимогам технічного завдання, за вихідну інформацію треба мати дані про нестационарний температурний та напружено-деформований стан поршня на усіх режимах роботи двигуна в прийнятій моделі експлуатації. Такі розрахунки можуть бути найбільш ефективно виконані саме при використанні методів та засобів САПР.

У другому розділі розглядаються питання розробки методики та програмної реалізації ви-

значення нестационарного теплового та напружено-деформованого стану поршня структурним методом в САПР.

На початкових стадіях проектування двигуна в процесі прогнозування і забезпечення тривалої міцності його термонавантажених деталей виникає необхідність в багаторазовому перебиранні вхідної інформації і проведенні варіантних розрахунків. Найбільш суттєвий вплив на температурне поле та НДС поршня мають особливості його конструкції, характер підведення та відведення теплоти, рівень форсування двигуна, залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури. У зв'язку з цим, при вирішенні задач нестационарної теплопровідності та термопружності в САПР особливу увагу слід приділяти ефективності завдання геометричної та фізичної інформації, а також проблемі зниження часу реакції системи (тривалості обробки і надання інформації) на запит користувача.

Рішення незв'язаної квазистатичної осесиметричної задачі теплопровідності та термопружності в тілі поршня еквівалентне варіаційній задачі знаходження мінімуму функціоналів виду:

$$J_1(T) = \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \frac{2\rho c}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot T \right] r d\Omega +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{\partial\Omega} \frac{\alpha}{\lambda} \Phi_{\alpha} \Phi_T - 2T_{cp} \Phi_T T r dS ;$$

$$J_2(u) = \int_{\Omega} \left[-v \left[\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]^2 + (1-2v) \left[\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1-2v}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) - 2(1+v)\alpha_T T \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] r d\Omega .$$

Тут $J_1(T)$, $J_2(u)$ - функціонали; Ω - досліджувана геометрична область; λ - коефіцієнт теплопровідності; ρc - питома теплоємність матеріалу на одиницю об'єму; α - коефіцієнт тепловіддачі; T_{cp} - температура середовища; Φ_{α} , Φ_T - управляючі функції для зміни ГУ з часом; τ - час; α_T - коефіцієнт лінійного теплового розширення; v - коефіцієнт Пуассона; $T(r,z)$ - температура; $u(r,z)$ - вектор переміщення.

Ефективним слід вважати розв'язання задачі (1), (2) в САПР ДВЗ методом R-функцій, який полягає в проходженні етапів: логічного опису області поршня Ω ; переходу від логічного опису Ω до аналітичного опису ω методом R-функцій; побудови структури рішення $J = f(C_i, \omega)$; визначенню невідомих коефіцієнтів C_i ; розрахунку полів температур та переміщень. Тут можливість урахування крайових умов довільної складності на аналітичному рівні дозволяє здійснити автоматизацію

цію синтезу вихідної програми у відповідності до рисунку 1. Надалі вирішення задачі (1), (2) виконується шляхом автоматичного виконання вище згаданих етапів.

Забезпечення належного ступеня достовірності результатів досягнуто за рахунок вибору раціональних ступенів поліномів, що описують поля T і u при вирішенні фізично нелінійної задачі (1), (2) та задаються в блоці 1(рис.1).

Головним у типових блоках програми (блок 2) є опис підінтегральних функцій та області поршня Ω в (1), (2).

Виконана структурна типізація КЗ поршнів швидкохідних дизелів дозволила розробити типову логічну формулу для опису цієї області:

$$\Omega_{K3}=(\sigma_1\cap\sigma_2)\cup[(\sigma_3\cap\sigma_4\cap\sigma_5)\cup(\sigma_6\cap\sigma_7)\cup\sigma_8\cap\sigma_9\cap\sigma_{10}]. \quad (3)$$

Остання передбачає наявність 7 типових ділянок її поверхні у відповідності до рисунку 2.

Використання формули (3) дозволяє здійснювати в САПР синтез геометрії практично повного спектру конкуруючих конструкцій Ω поршнів швидкохідних дизелів шляхом завдання конструктивних параметрів поршня в блоці 3 (дивись рис. 1).

На сьогодні рекомендації щодо прогнозування ГУ 3-го роду поршнів на експлуатаційних режимах роботи двигунів і припустимості можливих похибок їх завдання являються вкрай суперечливими. З метою прогнозування ГУ на початкових стадіях проектування двигуна в роботі виконано аналіз впливу похибок завдання ГУ на точність вирішення задачі теплопровідності стосовно зон, наведених на рис.3. Встановлено, що в точках 2 і 4 прогнозоване значення α може мати похибку 50%, а в точці 1 - лише 5%. При цьому похибка визначення розрахункового температурного стану поршня складатиме 2-3% в цих контрольних точках, зображених на рис.3. Аналогічні рекомендації запропоновані для всіх розглянутих зон. Визначено, що з точки зору ефективності завдання ГУ в САПР найбільш доцільним є використання квадратичної залежності опису локальних коефіцієнтів тепловіддачі в зоні I.

Для вказаних зон отримано лінійні емпіричні залежності α та T_{cp} від рівня форсування двигуна (N_n), наявності чи відсутності охолодження наддувочного повітря, типу охолодження мастилом. Розглянуто поршні швидкохідних дизелів 4ЧН10,5/12 з полусферичною КЗ, 4ЧН12/14, 6ЧН13/11,5, 8ЧН15/16 з відкритою КЗ; 6ЧН13/11,5, 1ЧН14,5/20,5, 4ЧН14,5/20,5, 8ЧН15/16 з напіввідкритою КЗ та 1ЧН14,5/20,5 з цією ж КЗ та поглибленою горловиною. Отримані результати розрахунків температурного стану поршнів на різних режимах роботи двигунів мають похибки в основному не вищі за 5-6% в контрольних точках, зображених на рис. 3. Напружено-деформований стан поршнів оцінено для двигунів 4ЧН12/14. Запропоновані емпіричні залежності можуть бути використані для завдання ГУ в блоці 4 (див. рис. 1) та визна-

чення температурного та напружено-деформованого стану поршнів швидкохідних дизелів в САПР. (5)

У третьому розділі виконано доопрацювання методики прогнозування тривалої міцності поршнів форсованих швидкохідних дизелів для конкретної моделі експлуатації двигунів, яка містить в собі наукові основи прогнозування тривалої міцності поршнів з урахуванням комплексного впливу утомленості та повзучості на процес накопичення руйнуючих пошкоджень, аналіз впливу порядку чергування режимів навантаження дизеля на довговічність кромки КЗ та оцінку рівня впливу різних перехідних режимів, що складають загальну модель експлуатації дизеля, на тривалу міцність поршня.

З урахуванням прийнятої моделі експлуатації двигуна відносний ресурс роботи кромки КЗ поршня дорівнює

$$\frac{\tau_p}{T} = \frac{1}{d_f + d_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j \left(\sum_{k=1}^{m_1} \frac{1}{N_{fk}} + \frac{1}{U_s^*} \cdot \sum_{k=1}^{m_1} U_{sk} \right)}.$$

Тут τ_p - абсолютна наработка поршня до руйнування кромки КЗ; T - запланований моторесурс (10000 годин); d_f , d_s - накопичення руйнуючих пошкоджень, викликаних процесами утомленості та повзучості; j - кількість експлуатаційних перехідних процесів роботи двигуна згідно обраній моделі його експлуатації; m_1 - кількість низькочастотних циклів навантаження під час i -го перехідного процесу роботи двигуна; N_{fk} - кількість циклів до появи тріщин при роботі двигуна на i -му перехідному режимі при k -му циклі навантаження; U_{sk} - питома енергія розсіювання в процесі повзучості при роботі двигуна по i -му перехідному режиму при k -му циклі навантаження; U_s^* - критичне значення питомої енергії розсіювання. (4)

При розрахунках N_{fk} використано рівняння Б. Поспішила

$$\sigma_{a.лин.} = \frac{1}{a} \left\{ \sigma'_f \left[\frac{1}{2} N_{pi}^{\frac{1}{c}} + \frac{\epsilon_{пл.н.}}{\epsilon'_f} \right]^{\frac{b}{c}} \right\}^{m_2} * \left\{ \sigma'_f \left[\frac{1}{2} N_{pi}^{\frac{1}{c}} + \frac{\epsilon_{пл.н.}}{\epsilon'_f} \right]^{\frac{b}{c}} + E \left[\epsilon'_f \frac{1}{2} N_{pi}^{\frac{1}{c}} + \epsilon_{пл.н.} \right] \right\}^{m_2-1}$$

Тут $\sigma_{a.лин.}$ - амплітуда напруг, яка розраховується по закону Гука; σ'_f , ϵ'_f - коефіцієнти утомленої міцності та в'язкості матеріалу; $\epsilon_{пл.н.}$ - неруйнуюча пластична деформація; b , c - показники циклічної міцності та пластичності; m_2 - показник ступеню, a - коефіцієнт асиметрії циклу, що визначається з урахуванням дійсних напруг.

Методика прогнозування відносного ресурсу роботи кромки КЗ поршня в САПР передбачає

урахування процесу прогріву деталі та закидів термічних напруг в зоні кромки КЗ, обумовлених динамікою навантаження дизеля. Вказані процеси апроксимовано аналітичними функціями з використанням критерію Предводителя.

Оцінено ступінь впливу послідовності чергування режимів роботи двигуна на ресурс роботи кромки КЗ. Встановлено, що порядок чергування режимів практично не впливає на ресурс роботи кромки, тобто при розробці моделі експлуатації двигуна порядок чергування режимів його навантаження можна не враховувати.

Оцінка рівня впливу представницьких перехідних процесів на тривалу міцність поршня проводилась на прикладі його багатопрофільної сільськогосподарської експлуатації. Розглянуто поршень з відкритою КЗ форсованого до 25 кВт/л дизеля 4ЧН12/14 при запланованому ресурсі 10000 годин. Результати наведено в табл.1.

Таблиця 1 -

Вплив перехідних режимів на накопичення руйнуючих пошкоджень в зоні кромки КЗ _____

Режим	τ , год	$t_{\max}$, °C	$t_{\min}$, °C	$\sigma_{\max}$, МПа	$\sigma_{\min}$, МПа	d_f+d_s	Δ_d , %
1	2	3	4	5	6	7	8
$x.x. \leftrightarrow 0,93N_{\text{еном}}$	620	320	189	-49,3	2,6	0,5029	31,3
$x.x. \leftrightarrow 0,9N_{\text{еном}}$	80	315	189	-48,0	2,6	0,0697	4,3
$0,23N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,9N_{\text{еном}}$	360	315	219	-44,9	3,8	0,0237	14,8
$0,23N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,85N_{\text{еном}}$	80	307	219	-45,2	3,8	0,0603	3,7
$0,35N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,85N_{\text{еном}}$	1320	307	235	-43,6	4,5	0,5564	34,6
$0,35N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,7N_{\text{еном}}$	1500	285	235	-36,9	4,5	0,077	4,8
$0,35N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,65N_{\text{еном}}$	680	278	235	-34,7	4,5	0,0281	1,8
$0,5N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,65N_{\text{еном}}$	3160	277	256	-32,5	5,5	0,0756	4,7

Встановлено, що найбільший вклад в сумарне накопичення пошкоджень вносять режими $x.x. \leftrightarrow 0,93N_{\text{еном}}$; $0,23N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,9N_{\text{еном}}$; $0,35N_{\text{еном}} \leftrightarrow 0,85N_{\text{еном}}$, для яких $\Delta_d > 80\%$. Виходячи з цього, оцінку накопичення руйнуючих пошкоджень на початкових стадіях проектування поршнів цілком достатньо здійснювати саме на цих представницьких режимах.

У четвертому розділі оцінено вплив конструктивних та режимних факторів на тривалу міцність поршнів швидкохідних форсованих дизелів; розроблено методику оцінки ефективності використання конструктивних заходів, спрямованих на підвищення ресурсу роботи кромки камери згоряння з урахуванням впливу нестационарних навантажень двигуна; розроблено нові конструктивні варіанти перспективних поршнів із вставками-тепловодами та оцінено їх ефективність; ви-

конано розрахунок ресурсу роботи поршнів швидкохідних дизелів з урахуванням моделі їх експлуатації.

З метою розробки практичних рекомендацій щодо підвищення тривалої міцності поршнів при перспективному форсуванні швидкохідних дизелів виконана оцінка впливу ряду заходів на накопичення руйнуючих пошкоджень в зоні кромки КЗ при роботі двигуна по найбільш важкому циклу - холостий хід $\leftrightarrow$ режим номінальної потужності. Досліджено поршні форсованих до 18,5 кВт/л і 11,5 кВт/л дизелів типу 4ЧН12/14 з відкритою та напіввідкритою КЗ. Розрахунки виконувалися по методиці, описаній в третьому розділі. Оцінено вплив таких конструктивних особливостей на накопичення пошкоджень: нірезистова вставка під перше поршневе кільце, масляне охолодження поршня, виборки в зоні кромки КЗ, кільцевий мідний тепловод в тілі поршня, а також проаналізовано використання поршня дизеля з 2^х-імпульсним регулятором. Встановлено, що різні конструктивні заходи оказують суттєво різний (до 20 разів) вплив на тривалу міцність кромки.

В роботі, відповідно до рис.4, вибрані дві зони (А та Б) циклу низькочастотного термомеханічного навантаження кромки КЗ, де має місце процес повзучості. Встановлені переважні закони зміни температур $t(\tau)$ та напруг $\sigma(\tau)$ в полуміклі нагріву поршня, що забезпечують підвищення тривалої міцності кромки.

Показано, що використання мідного кільцевого тепловоду (патент України № 23583А, F02F 3/18) дає найбільш бажаний ефект підвищення ресурсу роботи кромки завдяки ослабленню локального перегріву кромки з одночасним зниженням закидів діючих динамічно напруг в її зоні.

Проведено кількісну оцінку впливу конструктивних особливостей поршнів та моделі експлуатації двигунів на ресурс роботи кромки КЗ поршнів. Ряд результатів розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2-

Результати чисельного експерименту по оцінці ресурсу роботи кромки відкритої КЗ поршня дизеля 4ЧН12/14

Різновид роботи	Конструктивні та режимні особливості	Нл, кВт	$\tau_{\text{нхв}}$	$d_f + d_s$	τ^*/T
1	2	3	4	5	6
Комбайнування	без пром. охолодж.,	25	4	2,72	0,37
	без масл. охолодж.		6	2,37	0,42
			12	1,67	0,6

	без пром. охолодж., масл. охолодж.	25	4 6 12	0,93 0,59 0,34	1,08 1,7 2,94
	без пром. охолодж., без масл. охолодж.	18,5	4 6	0,58 0,39	1,72 2,56
	пром. охолодж., масл. охолодж.	25	6	1,607	0,62
Рядова (багатопрофільна) експлуатація	пром. охолодж., масл. охолодж., Г-обр. тепл.	25	4 6	0,859 0,678	1,17 1,48
	без пром. охолодж., без масл. охолодження	18,5	4 6 12	2,05 1,29 0,74	0,49 0,78 1,35
	пром. охолодж., масл. охолодж.,	25	4 6	4,94 3,66	0,2 0,27
	пром. охолодж., масл. охолодж., Г-обр. тепл.	25	4 6	1,66 1,25	0,6 0,8
Оранка					

Видно, що при форсуванні до $N_d = 25$ кВт/л і використанні двигуна на комбайні, для забезпечення необхідного ресурсу ($\tau^*/T > 1$) достатньо використання масляного охолодження (розбризуванням) поршнів з відкритою КЗ. При використанні відкритої КЗ і форсуванні двигуна до $N_d = 18,5$ кВт/л в умовах рядової (багатопрофільної) експлуатації має місце гарантована працездатність поршня ($\tau^*/T = 1,72$), в умовах тільки оранки поява тріщин виникає через 4900 годин ($\tau^*/T = 0,49$). При перспективному форсуванні двигуна до $N_d = 25$ кВт/л і використанні штатного поршня з відкритою КЗ необхідний ресурс роботи кромки КЗ при експлуатації двигуна в умовах рядової експлуатації і оранки практично недосяжний (відповідно $\tau^*/T = 0,62$ і $0,2$). Забезпечити ресурс вдається за рахунок використання в тілі поршня запропонованого Г-образного тепловоду. Встановлено, що останній захід забезпечує працездатність кромки КЗ поршня в рядовій експлуатації ($\tau^*/T = 1,17$).

Таким чином, запропоновані підходи дозволять здійснювати прогнозування тривалої міцності КЗ поршня та обґрунтовано намічати шляхи підвищення ресурсу роботи різних конструкцій поршнів швидкохідних дизелів в різних умовах їх експлуатації.

ВИСНОВКИ

Поширено метод R-функцій на визначення нестационарного теплонапруженого стану поршня в САПР ДВЗ, запропоновано засоби забезпечення належної коректності методик і програм при розрахунках поршнів з різними камерами згоряння, умовами теплопідводу та тепловідводу на грани-

цях, при зміні рівня форсування дизелів при різних моделях їх експлуатації.

З метою використання САПР виконано структурну типізацію параметрів КЗ поршня швидкохідного дизеля і отримано її логічний опис.

Запропоновано квадратичні залежності опису локальних граничних умов поршнів швидкохідних дизелів по поверхні КЗ.

Виконано аналіз і уточнено дані щодо впливу похибок завдання ГУ на точність вирішення задачі теплопровідності поршня. Виявлено гранично допустимі похибки прогнозування ГУ для різних зон поршня, які не впливають на визначення поля температур.

Отримано лінійні емпіричні залежності для визначення ГУ 3-го роду на різних режимах роботи швидкохідних дизелів, в тому числі і стосовно КЗ різного типу. Використання запропонованих формул при прогнозуванні температурного стану поршнів швидкохідних дизелів 4ЧН10,5/12, 4ЧН12/14, 4ЧН14,5/20,5, 6ЧН13/11,5, 8ЧН15/16 на експлуатаційних режимах їх роботи дозволяє проводити розрахунки з похибками, що в основному не перевищують 5-6%.

Виконана оцінка ступеню впливу різних експлуатаційних перехідних процесів роботи двигуна на тривалу міцність КЗ.

Розроблена методика оцінки ефективності впливу різних конструктивних заходів на тривалу міцність кромки КЗ. Показано, що різні конструктивні заходи оказують суттєво різний (до 20 разів) вплив на тривалу міцність кромки.

Проведено кількісну оцінку та отримано нові дані щодо впливу умов експлуатації дизелів при перспективних рівнях їх форсування на тривалу міцність КЗ поршнів.

Запропоновано нові конструктивні варіанти перспективних поршнів з вставками-тепловодами (патент України №23566А, F02F 3/18; патент України № 23583А, F02F 3/18; позит. ріш. на патент № 15605 від 07.06.99р.), що забезпечують підвищений рівень тривалої міцності кромки КЗ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шеховцов А.Ф., Пылев В.А., А.Рамирес Миттани, Прокопенко Н.В. Выбор и обоснование методов для описания процессов ползучести материалов деталей камеры сгорания быстроходных дизелей // Двигатели внутреннего сгорания. - Харьков: ХГПУ, 1997. - Вып. 56-57. - С.212-218.

2. Пылев В.А., Шеховцов А.Ф., Прокопенко Н.В., А. Рамирес Миттани, Шевченко Л.П. Типизация конструктивных параметров камеры сгорания поршня быстроходного дизеля с целью ее многокритериальной оптимизации // Труды Второго конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием: "Прогресс - Технология - Качество", Киев-Харьков-Рыбачье. - 1997. - С.76-79.

3. Пылев В.А., Шеховцов А.Ф., Прокопенко Н.В., А. Рамирес Миттани. Анализ путей повышения длительной и термоусталостной прочности кромок КС поршней быстроходных дизелей // *Авиационно-космическая техника и технология*. - Харьков: "Харьк. авиац. ин-т", 1998. - Вып.5. - С.287-290.

4. Шеховцов А.Ф., Пылев В.А., Шевченко Л.П., Прокопенко Н.В. Выбор закона аппроксимации граничных условий поршней быстроходных дизелей со стороны теплоподвода // *Вісник ХДПУ*. - Харків: ХДПУ, 1999. - Вип. 58. - С. 12-18.

5. Шеховцов А.Ф., Пильов В.О., Шевченко Л.П., Прокопенко М.В., Фолунін С.О. Ефективність використання тепловодів у поршнях форсованих швидкохідних дизелів // *Механіка та машинобудування*. - Харків, 1999. - № 1. - С.188-192.

6. Шеховцов А.Ф., Пильов В.О., Шевченко Л.П., Прокопенко М.В., Левтеров А.М. Прогнозування теплового стану поршнів з відкритими камерами згоряння при використанні САПР швидкохідних дизелів // *Авиационно-космическая техника и технология*. - Харьков: Гос. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 1999. - Вып.9. - С.380-383.

7. Шеховцов А.Ф., Пылев В.А., Шевченко Л.П., Прокопенко Н.В. Методика и программная реализация определения теплового состояния поршня структурным методом в САПР // *Труды Таврической государственной агротехнической академии*. - Мелитополь: ТГАТА, 1999. - Том 10, вып.2. - С.10-15.

8. Пылев В.А., Шеховцов А.Ф., Прокопенко Н.В. Расчетная оценка влияния истории нагружения быстроходного дизеля на долговечность кромки камеры сгорания поршня // *Труды Таврической государственной агротехнической академии*. - Мелитополь: ТГАТА, 1999. - Том 11, вып.2. - С.3-8.

9. Пылев В.А., Шеховцов А.Ф., Прокопенко Н.В. Прогнозирование в САПР теплового состояния поршней с камерами сгорания типа ЦНИДИ на эксплуатационных режимах работы быстроходных дизелей // *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. - Мелітополь: ТДАТА, 1999. - Том 13, вип. 2. - С. 10-17.

10. Пильов В.О., Шеховцов А.Ф., Прокопенко М.В., Рамірес А. Міттани Результати прогнозування ресурсу роботи кромок КЗ поршнів швидкохідних дизелів // *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. - Мелітополь: ТДАТА, 2000. - Том 14, вип. 2. - С. 47-53.

АНОТАЦІЇ

Прокопенко М.В. Прогнозування в САПР ДВЗ тривалої міцності камер згоряння поршнів при експлуатації форсованих швидкохідних дизелів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 - теплові двигуни. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний ін-

ститут”, Харків, 2001.

Дисертацію присвячено прогнозуванню в САПР тривалої міцності поршнів форсованих швидкохідних дизелів з урахуванням моделі їх експлуатації. Отримані емпіричні залежності для визначення місцевих граничних умов 3-го роду на різних режимах роботи швидкохідних дизелів, в тому числі і стосовно камер згоряння різного типу, що дозволяє прогнозувати тепловий стан поршнів з потрібною точністю. Розроблена методика та комплекс програм по визначенню в САПР теплонапруженого стану поршнів швидкохідних форсованих дизелів. Розроблена методика оцінки тривалої міцності особливо теплонавантаженої зони кромки КЗ з урахуванням комплексного впливу процесів утомленості і повзучості на процес накопичення руйнуючих пошкоджень. Розроблено методику оцінки ефективності використання різних конструктивних заходів на тривалу міцність поршнів. Наведено результати оцінки впливу режимних та конструктивних факторів на тривалу міцність поршнів з урахуванням конкретної прийнятої моделі експлуатації двигуна.

Ключові слова: швидкохідний форсований дизель, поршень, граничні умови, модель експлуатації і ресурс роботи, термоутомленість та повзучість кромки камери згоряння, тривала міцність.

Прокопенко Н.В. Прогнозирования в САПР ДВС длительной прочности камер сгорания поршней при эксплуатации форсированных быстроходных дизелей. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 - тепловые двигатели. - Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2001.

Диссертация посвящена повышению достоверности прогнозирования в САПР длительной прочности поршней форсированных быстроходных дизелей с учетом модели их эксплуатации. Полученные эмпирические зависимости для определения граничных условий 3-го рода на различных режимах работы быстроходных дизелей, в том числе и применительно к камерам сгорания различного типа, позволяют прогнозировать тепловое состояние поршней. Разработана методика и комплекс программ по определению в САПР теплонапряженного состояния поршней быстроходных форсированных дизелей. Предложены мероприятия по обеспечению требуемой корректности этих методики и программ при расчетах в САПР теплонапряженного состояния поршней с различными камерами сгорания, условиями теплоподвода и теплоотвода на границах поршней, при изменении степени форсирования дизелей при различных моделях их эксплуатации, в том числе:

* выполнена применительно к специфике САПР упрощающая типизация параметров камер сгорания различных конструкций и предложено логическое описание наиболее теплонапряженной области (расчетной зоны) поршней быстроходных дизелей применительно к решению задачи отыскания их длительной прочности;

* получены рациональные законы аппроксимации местных граничных условий поршней быстроходных дизелей со стороны теплоподвода;

* оценены пути снижения расхождений между результатами прогнозирования в САПР теплового состояния поршней быстроходных форсированных дизелей и экспериментальными данными до 5-6% в характерных точках за счет:

а) выбора степени аппроксимирующего тепловое поле поршня полинома на уровнях $m = 8$ (открытая КС) и $m = 11$ (полуоткрытая КС);

б) проведения анализа влияния погрешностей задания ГУ 3-го рода на результаты расчета температурных полей поршней, по результатам которого сделан ряд рекомендаций, позволяющих вполне корректно использовать САПР для прогнозирования теплового состояния поршней форсированных быстроходных дизелей;

- получены эмпирические зависимости, определяющие ГУ 3-го рода на различных режимах работы быстроходных дизелей, в том числе и применительно к КС различного типа.

Для различных конструктивных вариантов поршней дизелей типа СМД определены уровни термических напряжений в зоне кромки КС. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования длительной прочности кромок КС форсированных быстроходных дизелей. Разработана методика оценки длительной прочности особо теплонапряженной зоны кромки КС с учетом модели эксплуатации и комплексного влияния процессов усталости и ползучести на процесс накопления повреждений. Использование разработанной методики оценки длительной прочности поршня подтверждает, что в условиях сложного термомеханического циклического низкочастотного нагружения кромки КС поршня порядок чередования эксплуатационных режимов работы двигателя не оказывает практического влияния на ресурс работы кромки. Разработана методика оценки эффективности применения различных конструктивных мероприятий. В результате проведения численных экспериментов оценено влияние ряда конструктивных факторов (нирезистовая вставка под первое поршневое кольцо, струйное масляное охлаждение поршня, разгружающие выборки в зоне кромки КС, кольцевой медный тепловод в теле поршня и наличие 2^х-импульсного регулятора) на длительную прочность поршней. Установлено, что такие конструктивные мероприятия оказывают существенно разное (до 20 раз) влияние на длительную прочность поршней быстроходных дизелей. Разработана конструкция Г-образного тепловода (патент Украины № 23583А, F02F 3/18), при которой существенное снижение температуры в зоне кромки КС и теплоперепада между упомянутой зоной и периферийной зоной огневой поверхности доньшка поршня достигается за счет перераспределения тепловых потоков в теле поршня. Проведены расчетные эксперименты, позволяющие выяснить влияние различных конструкций вставок-теплопроводов на тепловое состояние и время до разрушения кромок КС поршней с открытой и полуоткрытой КС. Показано, что использование Г-образного тепловода в поршне с открытой КС

повышает его длительную прочность в 2,5 раза и обеспечивает ресурс работы последней 10000 часов при перспективном форсировании тракторного дизеля даже до 25 кВт/л в условиях рядовой его эксплуатации.

Ключевые слова: быстроходный форсированный дизель, поршень, граничные условия, модель эксплуатации и ресурс работы, термоусталость и ползучесть кромки камеры сгорания, длительная прочность.

Prokopenko N.V. The prediction in CADs ICE of long-term strength of combustion chambers in exploitation of forced speed diesels. - Manuscript.

The dissertation for presenting candidate's degree technical sciences of specialty 05.05.03 - heat engines. - National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, 2001.

The dissertation was devoted to increase reliable prediction in CADs of long-term strength of forced speed diesel account their exploitation model. The empirical dependencies for definition of border conditions of 3^s kind on different regimes work of speed diesels (and with different type of combustion chamber) was received. The technique for evaluating long-term and thermofatigue strength of heat-stress zones of edge of combustion chamber account fatigue and creep complex on accumulation of damages was elaborated. The technique for evaluating of efficient use different design measures on long-term and thermofatigue strength of pistons was elaborated. The results of the regime and constructive factors influence on long-term and thermofatigue strength of pistons with consideration of the engine exploitation model was brought.

Key words: speed forced diesel, piston, border conditions, exploitation model and work resource, thermofatigue and creep of edge of combustion chamber, long-term strength.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Прохоренко А.О.

Підписано до друку 26.04.2001р. Формат видання 145×215.

Формат паперу 60×90/16. Обсяг 0,9 авторського аркуша.

Тираж 100 прим. Зам. № 139.

Надруковано на ризографії в типографії НТУ “ХПІ”.

61002, м. Харків, вул. Фрунзе 21.