

Національний технічний університет
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кесарійський Олександр Георгійович

УДК 621.43: 681.787

**РОЗРОБКА ЛАЗЕРНО-ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАСОБІВ
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ ДВЗ**

Спеціальність 05.05.03 – Теплові двигуни

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в ТОВ “Лабораторія комплексних технологій”, м. Павлоград, Дніпропетровської обл. та на кафедрі “Двигуни внутрішнього згоряння” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків.

Науковий керівник: заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Марченко Андрій Петрович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Абрамчук Федір Іванович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, м. Харків, завідувач кафедри двигунів
внутрішнього згоряння.

кандидат технічних наук
Грицюк Олександр Васильович,
Казенне підприємство “Харківське конструкторське
бюро з двигунобудування”, м. Харків, заступник
Генерального конструктора по НДР.

Провідна установа: Національний аграрний університет, кафедра тракторів і автомобілів, Кабінет Міністрів України, м. Київ.

Захист відбудеться “04” липня 2006 р. о 13-00 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, кафедра “Двигуни внутрішнього згоряння”, ауд. 11

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

Автореферат розісланий 02 червня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Парсаданов І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах інтеграції у світову економічну систему двигунобудівним підприємствам України потрібно забезпечити конкурентоспроможність продукції на зовнішньому і внутрішньому ринку. Провідні світові фірми, що випускають автомобільні двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), кожні три-чотири роки пропонують нові їх зразки, демонструючи дуже високі темпи розробки. За таких умов, створення вітчизняних двигунів потрібно проводити у стислі терміни і при значній економії фінансових витрат на розробку. Рішення цієї проблеми може бути забезпечене за рахунок використання засобів, що базуються на досягненнях високих технологій.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) деталей є одним із важливих етапів розробки та удосконалення двигунів, що істотно впливає на їх технічні характеристики. Висока ефективність сучасних чисельних методів теорії пружності і пластичності не усуває необхідності застосування експериментальних методів. Головне призначення експериментальних вимірювань НДС - дослідження процесів, що супроводжують виготовлення й експлуатацію двигуна, з'ясування фізичної сутності взаємодії елементів конструкції, одержання вихідних даних та залежностей для обґрунтування і перевірки методів розрахунку.

На основі теоретичних та практичних досліджень, проведених здобувачем, встановлено, що для вирішення таких задач найбільш перспективним є комплексне застосування лазерно-інтерференційного експериментального дослідження НДС, заснованого на використанні голографічної інтерферометрії, спекл-фотографії, електронної кореляційної спекл-інтерферометрії. Для ефективного впровадження лазерно-інтерференційних вимірювань у практику двигунобудування необхідно розробити спеціалізовані методи та засоби дослідження НДС елементів і вузлів двигуна внутрішнього згорання. Вирішенню цієї задачі присвячена дисертація.

Зв'язок з науковими програмами, темами. Робота проведена відповідно до програми НДР "Розробка методів та засобів голографічного контролю збирання та діагностики групових різьбових з'єднань. Голографічні дослідження вузлів із композиційних матеріалів", 51.0611.557 ОТ, КБ "Південне" та програми експериментальних досліджень ТОВ «Лабораторія комплексних технологій» "Розрахунково-експериментальне дослідження напружено-деформованого стану блока циліндрів двигуна ЗМЗ 406.10 при статичних навантаженнях" (ДР № 0195U026315).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробці лазерно-інтерференційних методів і засобів дослідження НДС деталей і вузлів ДВЗ.

Для досягнення цієї мети вирішувалися наступні задачі:

- розробка структури програмно-технічного комплексу, апаратного і програмного забезпечення та методики лазерно-інтерференційних досліджень НДС деталей і вузлів ДВЗ;
- розробка пристроїв для панорамної реєстрації і проведення дослідження впливу складальних зусиль на формозміну дзеркала циліндра ДВЗ;
- дослідження впливу тиску у циліндрі на деформування блоку циліндрів, розробка методики лазерно-інтерференційних досліджень деталей та вузлів ДВЗ для верифікації їх математичних моделей.
- розробка рекомендацій по використанню запропонованих засобів лазерно-інтерференційного дослідження НДС деталей і вузлів у складі автоматизованих систем створення ДВЗ.

Об'єкт дослідження - процес визначення напружено-деформованого стану деталей та вузлів ДВЗ.

Предмет дослідження – лазерно-інтерференційні методи та засоби експериментального дослідження НДС деталей та вузлів ДВЗ.

Методи дослідження – досягнення поставленої мети здійснено на основі комплексного використання розрахункових та експериментальних методів. Експериментальні методи застосовані для дослідження НДС деталей ДВЗ, а розрахункові - для обробки результатів експериментальних досліджень. Основні методи експериментального дослідження – голографічна інтерферометрія, спекл-фотографія, електронна кореляційна спекл-інтерферометрія.

Наукову новизну одержаних результатів складають:

1. Структура програмно-технічного комплексу для лазерно-інтерференційних вимірювань деформування деталей та вузлів, як інтегрований елемент автоматизованої системи розробки ДВЗ.
2. Пристрій та методика панорамної реєстрації формозміни поверхні дзеркала циліндра ДВЗ під дією технологічних та робочих навантажень.
3. Нові способи контролю збирання та діагностики групового різьбового з'єднання (ГРЗ), які відрізняються тим, що контроль та діагностику ведуть по деформації деталей, які з'єднуються.
4. Методика лазерно-інтерференційних експериментальних досліджень поля формозміни блок-картера ДВЗ як джерела даних для оцінки вірогідності його кінцевоелементної математичної моделі.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Реалізована структура програмно-технічного комплексу для лазерно-інтерференційних вимірювань НДС деталей та вузлів ДВЗ, що інтегрується до автоматизованої системи розробки ДВЗ.
2. Запропоновано комплекс алгоритмів для автоматизації обробки результатів лазерно-інтерференційних вимірювань деформування деталей та вузлів ДВЗ, що забезпечує можливість використання "приладового" стилю інтерференційних вимірювань у практиці двигунобудування.

3. Розроблено нові способи контролю збирання і діагностики технічного стану ГРЗ, що дозволяє шляхом цілеспрямованого впливу на процес доводки та технологію складання підвищити якість ДВЗ.

4. Створена методика вимірювання полів формозміни блок-картера ДВЗ для проведення аналізу вірогідності його кінцевоелементної математичної моделі, що значно розширює можливості математичного моделювання у пошуку нових конструктивних рішень.

5. Отримані нові дані експериментальних досліджень деформації блок-картера ДВЗ під впливом зусиль затягування кріплення та при навантаженні циліндра внутрішнім тиском.

Результати досліджень передані проектним та дослідним підрозділам ГРП "АВТОЗАЗ – МОТОР", ВАТ "АВТОВАЗ", ВАТ "Заволжский моторный завод".

Особистий внесок здобувача.

Особистий внесок здобувача складає :

- розробка структури програмно-технічного комплексу для лазерно-інтерференційних вимірювань формозміни деталей та вузлів ДВЗ;
- розробка конструкцій пристроїв для панорамної реєстрації інтерферограм деформування внутрішньої поверхні циліндричних тіл, яка використана при дослідженні двигунів ВАЗ 21083, МеМЗ 245, ЗМЗ 406;
- розробка алгоритмів обробки інтерферограм та спекл-фотографій;
- проведення експериментальних досліджень групових різьбових з'єднань та двигунів внутрішнього згоряння ВАЗ 21083, МеМЗ 245, ЗМЗ 406 у період з 1989 по 2004 р;
- експериментальне відпрацювання технології контролю збирання і діагностики технічного стану ГРЗ по деформації деталей;
- поетапна методика лазерно-інтерференційних досліджень блок-картера ДВЗ для аналізу вірогідності його кінцевоелементної математичної моделі.

Апробація результатів дисертації.

Результати дисертаційної роботи доповідалися на XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (Micro-CAD), Харків, НТУ "ХПІ" (2004 та 2005 роки). Щорічно, з 1996 по 2005 р., роботи було представлено на Міжнародних конгресах двигунобудівників (Рибаче-Крим-Україна).

Окремі положення дисертації доповідалися на закордонних міжнародних наукових зустрічах:

- 1-й Всеросійський конгрес двигунобудівників, Санкт-Петербург, Росія, (17-20 червня 2003);
- 5 Symposium "Numerical Simulation in Automotive Engineering", Грац, Австрія, (05 лютого, 2003);
- 10 Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, Braunschweig, Germany, (07-09 жовтня 2002).

Основні положення дисертації, пов'язані із застосуванням і розвитком лазерно-інтерференційних методів, доповідалися на XXV (1997), XXI (1990), XIX (1988) і XVIII (1987) Міжнародних (Всесоюзних) Школах-симпозіумах по когерентній оптиці і голографії.

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 3 статті у наукових журналах, 5 статей у збірниках наукових праць, отримано 4 авторських свідоцтва.

Обсяг і структура роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації складає 241 сторінку, з них 99 ілюстрацій по тексту, 16 ілюстрацій на 16 сторінках, 4 таблиць по тексту, 2 додатка на 2 сторінках, 147 найменувань використаних літературних джерел на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, відображено її взаємозв'язок зі світовими тенденціями розвитку двигунобудування, методів та засобів дослідження НДС деталей та вузлів ДВЗ, визначені мета і задачі дослідження, наукова і практична цінність роботи, охарактеризовані реалізація й апробація результатів роботи, приведена інформація про публікації по темі дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуті проблеми вдосконалення конструкції і технології виготовлення деталей і вузлів ДВЗ. Показано, що при розробці конструкції блоку циліндрів поршневого двигуна внутрішнього згоряння потрібно застосовувати сучасні комплекси розрахункових і експериментальних методів дослідження напружено-деформованого стану. Встановлено, що для підвищення конструктивної досконалості деталей і вузлів двигунів шляхом мінімізації небажаних деформацій і напруг необхідно розробити комплекс спеціальних розрахункових і експериментальних методів і засобів, адаптованих для вирішення задач двигунобудування.

Аналітичні методи розрахунку НДС вимагають значного експериментального доведення ДВЗ, що призводить до великих втрат часу та коштів. Використання методів математичного моделювання, наприклад, із застосуванням методу кінцевих елементів, розширює можливості конструктора, але, оскільки модель відбиває лише рівень розуміння задачі, потрібна подальша верифікація математичної моделі. Очевидно, що проблеми розробки нових, ефективних конструкцій ДВЗ не можуть бути вирішені без застосування якісних методів експериментального дослідження НДС.

Проаналізовано методи експериментального дослідження НДС, що застосовують у машинобудуванні. Встановлено, що використання лазерно-інтерференційних методів для вирішення задач підвищення конструктивної досконалості ДВЗ є перспективним напрямком вдосконалення технології розробки.

В другому розділі проаналізовані наукові основи перспективних технологій конструювання і методів контролю збирання з'єднань ДВЗ. Показано, що застосування в технології розробки двигунів тільки автоматизованих CAD/CAM/CAE систем не дозволяє забезпечити потрібний темп робіт і високий рівень конструктивної досконалості на ранніх етапах розробки.

Істотне прискорення процесу розробки забезпечує застосування технології швидкого прототипування (Rapid Prototyping), яка створює можливість оперативного виготовлення функціональних прообразів (прототипів) деталей двигуна. Аналіз технології розробки ДВЗ (див. Рис.1) показав, що повною мірою можливості автоматизованого проектування і швидкого прототипування можуть бути використані при доповненні такої технології методами експериментального дослідження НДС деталей-прототипів.

На основі сумісного аналізу методів автоматизованого проектування та швидкого прототипування визначені вимоги до методів експериментального дослідження НДС деталей ДВЗ. Встановлено, що методи повинні забезпечувати проведення вимірів на натурних об'єктах - як на окремих деталях, так і на вузлах будь-якої геометричної форми. Вимірювання слід проводити безконтактно та безінерційно. Інформація, що реєструється, має бути представлена у вигляді просторових векторів полів деформацій або переміщень у строгій прив'язці до геометричних характеристик об'єкта дослідження.

Рис.1. Фрагмент схеми розробки деталей ДВЗ з використанням методів швидкого прототипування та лазерно-інтерференційних методів.

Порівняльний аналіз різних експериментальних методів дозволив зробити висновок про те, що застосування лазерно-інтерференційних методів максимально відповідає потребам автоматизованої технології розробки деталей та вузлів ДВЗ.

Для обґрунтування зробленого висновку приведено огляд теоретичних основ базових лазерно-інтерференційних методів: голографії, голографічної інтерферометрії, спекл-фотографії та електронної кореляційної спекл-фотографії. На практичних прикладах дослідження виробів машинобудування, виконаних здобувачем, показана висока інформаційна насиченість результатів використання цих методів.

На основі проведених досліджень розроблено структуру програмно-технічного комплексу та приведено опис базового складу апаратних і програмних засобів, необхідних для проведення дослідження деталей і вузлів ДВЗ із застосуванням лазерно-інтерференційних методів. На рис. 2 представлена схема запропонованого комплексу.

Рис.2. Апаратна структура програмно-технічного комплексу для дослідження НДС деталей та вузлів ДВЗ з використанням лазерно-інтерференційних методів

На основі досвіду практичного дослідження формозміни деталей та вузлів ДВЗ розроблені поетапні структурні схеми проведення експериментальних досліджень. Формалізовано підхід до планування досліджень, вибору методик і засобів вимірювання, аналізу результатів і сполучення їх із засобами математичного аналізу.

У розвиток концепції переходу від «лабораторного» стилю вимірювання до «приладового», при використанні лазерно-інтерференційних методів у практиці двигунобудування, запропоновано застосовувати електронну кореляційну спекл-інтерферометрію для експрес-аналізу деформування деталей. З цією ж метою реалізовано автоматизацію більшості етапів вимірювання шляхом застосування електронно-оптичних засобів реєстрації інтерференційних структур.

У третьому розділі описані розроблені здобувачем схеми і пристрої для дослідження НДС деталей і вузлів ДВЗ, а також алгоритми обробки результатів лазерно-інтерференційних вимірів.

При розробці конструкції пристрою для реєстрації формозміни дзеркала циліндра, з метою забезпечення максимальної інформативності вимірювань та спрощення аналізу інтерферограм було враховано, що при дослідженні деформування деталей, наприклад, за методом подвійної експозиції, результуючий розподіл інтенсивності інтерференційної структури формується як результат взаємодії двох хвильових фронтів:

$$I_{id} = |U|^2 \approx 2 |A_0|^2 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (\varphi_{02} - \varphi_{01}) \right] \right\}, \quad (1)$$

де I_{id} - інтенсивність інтерференційної структури, U - напруженість електромагнітного поля, A_0 - амплітуда електромагнітного поля, λ - довжина хвилі лазерного випромінювання, $\varphi_{02} - \varphi_{01}$ - додатковий фазовий шлях променів, що виникає у результаті зміщення поверхні, що контролюється. Якщо при реєстрації забезпечити падіння променів під кутом α , а спостерігати інтерферограму під кутом β , то розподіл інтенсивності може бути представлено як:

$$I_{id} \approx 4 |A_0|^2 \cos^2 \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi}{\lambda} w(\cos \alpha + \cos \beta) \right], \quad (2)$$

де W - переміщення точки поверхні між першою та другою експозиціями. При забезпеченні умови $\alpha = \beta = 90^\circ$ значно спрощується визначення значення переміщення:

$$w = \frac{N\lambda}{2}, \quad (3)$$

де N - число світлих інтерференційних полос, відрахованих від нерухомої частини деталі.

Для забезпечення таких умов в конструкцію пристрою було введено дзеркальні конічні елементи з кутом 45 градусів між дзеркальною поверхнею та віссю циліндра. Це забезпечило освітлення дзеркала циліндра по нормалі до його поверхні, а також можливість спостереження інтерферограми у цьому ж напрямку.

З метою розвитку "приладового" стилю лазерно-інтерференційних вимірювань, для подальшого впровадження їх у структуру автоматизованої розробки ДВЗ, була розроблена схема та конструкція приладу для контролю деформації дзеркала циліндра з використанням методів електронної кореляційної спекл-інтерферометрії. Для створення спекл-структури використані дві когерентні світлові хвилі. Одна з них освітлює світлочутливий елемент фотокамери з високою розподільною здатністю, а друга – поверхню, що досліджується. При виконанні вимірювань реєструється початкове панорамне зображення спекл-структури, що відображає розподіл інтенсивності у початковому стані. Після цього прикладається тестуюче навантаження. Під дією навантаження виникає формозміна поверхні і (як слідство) додаткова різниця фаз $\Delta\psi(\vec{r})$ між хвилями в площині зображення.

Інтенсивність у площині зображення :

$$I_s(\vec{r}) = I_1(\vec{r}) + I_2(\vec{r}) + 2\sqrt{I_1(\vec{r})I_2(\vec{r})} \cos[\Delta\varphi(\vec{r}) + \Delta\psi(\vec{r})], \quad (4)$$

де $I_1(\vec{r})$ і $I_2(\vec{r})$ - просторовий розподіл інтенсивності хвиль, що інтерферують;

$\Delta\varphi(\vec{r})$ - різниця фаз хвиль, що інтерферують;

$\Delta\psi(\vec{r})$ - додаткова різниця фази, визвана переміщенням.

Реєстрація спекл-структури за допомогою цифрової фотографічної камери дозволяє шляхом комп'ютерної обробки порівнювати поля до і після навантаження. Розподіл інтенсивності буде залежати, в основному, тільки від різниці фаз $\Delta\psi(\vec{r})$, і в силу періодичності функції $\cos(x)$, на тих ділянках, де $\Delta\psi(\vec{r}) = 2\pi m$, (m - ціле число) при $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ кореляція спекл-картин максимальна, а для ділянок, де $\Delta\psi(\vec{r}) = (2m + 1)\pi$, спостерігається повна декореляція.

На рис.3 показана одна із схем, що розроблена для панорамної реєстрації формозміни дзеркала циліндра з застосуванням електронної кореляційної спекл-інтерферометрії.

Рис.3. Схема реєстрації панорамного поля радіальних переміщень поверхні дзеркала циліндра ДВЗ з використанням методів електронної кореляційної спекл-інтерферометрії

Випромінювання лазера 1 розділяється світлоділителем 2 і за допомогою дзеркал 3 формуються опорний і предметний промені. Предметний світловий потік, сформований коліматором 4, за допомогою напівпрозорого дзеркала 5 направляється на дзеркальний конус 6 і освітлює внутрішню поверхню циліндра. Блок циліндрів 7 та головка 8 з'єднані болтами. Опорний світловий потік формується мікрооб'єктивом 9, оснащеним просторовим фільтром і лінзою 10. Ці компоненти підібрані так, щоб випромінювання, відбите напівпрозорим дзеркалом 5, забезпечувало рівномірне освітлення світлочутливої матриці електронної фотокамери 11. Зображення внутрішньої поверхні циліндра, відбите конусом 6, фокусується об'єктивом фотокамери 11 і передається в комп'ютер 12. Смуги кореляції спостерігаються на екрані монітора 13.

Пристрій, створений на підставі розробленої схеми, дозволяє визначити поля радіальних переміщень поверхні дзеркала циліндра за 1-2 хвилини після реєстрації.

Для забезпечення можливості одночасної реєстрації радіальної, аксиальної та тангенційної складових повного вектора переміщення поверхні дзеркала циліндра ДВЗ було застосовано комплексне використання методів голографічної та спекл-інтерферометрії. У створеному пристрої, показаному на рис.4, голографічну плівку конструктивно було розміщено на зовнішній циліндричній поверхні конічних дзеркальних елементів.

Таке рішення дозволило реєструвати спекл-структуру дзеркала циліндра у початковому та деформованому стані одночасно з реєстрацією голограми подвійної експозиції за методом Ю.М.Денисюка. Аксиальна та тангенційна компоненти вектора переміщень (u та v) визначаються при просвічуванні лазерним променем розгорнутої на площину голографічної плівки, як:

$$u = \frac{\lambda L}{p_a}, \quad (5) \quad v = \frac{\lambda L}{p_t}, \quad (6)$$

де, λ - довжина хвилі лазерного випромінювання, L - відстань від голограми до екрана при скануванні нерозведеним лазерним променем, p_a , p_t - відстань між інтерференційними смугами на екрані у напрямку аксиальної та тангенційної компонент, відповідно.

При реєстрації голографічної інтерферограми напрямок освітлення реалізовано таким, що співпадає з радіусом циліндра. Це дозволяє дуже легко визначити радіальну компоненту вектора переміщень за залежністю (3) при освітленні по нормалі розгорнутої на площину голографічної плівки.

Для розширення зони вимірювання коефіцієнти відображення напівпрозорих дзеркальних конусних поверхонь визначаються залежністю:

$$R = \frac{1}{K - k + 1}, \quad (7)$$

де, K – загальне число конусів, k – порядковий номер конуса з боку вхідного хвильового фронту.

Пристрій містить базову плиту 1, на якій розміщено рухливий кронштейн 2, що переміщується по направляючих штифтах 3. На кронштейні 2 жорстко закріплена циліндрична направляюча втулка 4, яка призначена для позиціонування і фіксації рухливого циліндра 9, що вставляється з зазором у досліджуваний циліндр 5 блоку-картера ДВЗ 6. Циліндр 9 призначено для кріплення базового 7 і додаткових циліндричних блоків 8, виконаних з оптично прозорого матеріалу, наприклад, поліметилметакрилату. У блоках виконані дзеркальні конічні поверхні, що утворюють кут 45 градусів відносно осі циліндра ДВЗ.

Рис.4. Схема конструкції пристрою для панорамної реєстрації поля переміщень внутрішньої поверхні циліндра ДВЗ

Фотоматеріал 10, у якості якого використовується голографічна плівка, фіксується на циліндричній поверхні прозорих блоків. Блок-картер двигуна 6 з головкою 11 і кріпленням 12 жорстко закріплений за допомогою опори 13 до віброзахисної платформи 14.

Пристрій дозволяє за один цикл реєстрації одержати панорамне поле переміщень внутрішньої поверхні дзеркала циліндра з можливістю визначення в будь-якій точці радіальної, аксиальної і тангенціальної компонент вектора переміщення. З огляду на те, що конструкція пристрою містить ознаки світової новизни, здобувачем проведено його патентування.

У ході виконання дисертаційного дослідження було розроблено та реалізовано оригінальну систему формування оптичних схем у вертикальній площині для реєстрації формозміни головки та блок-картера поршневого ДВЗ. Практичне застосування зазначеного схемного та технічного рішення при дослідженні деталей двигунів ВА3 21083, МеМ3 245 і ЗМ3 406.10 показало добру вібраційну стабільність такої системи вимірювання та можливість використання компактних віброзахисних платформ при дослідженнях ДВЗ.

Для забезпечення автоматизації використання лазерно-інтерференційних методів у практиці двигунобудування запропоновані програмні алгоритми реєстрації та дешифрування спекл-структур і інтерферограм. Реалізовано універсальну програму обробки голографічних інтерферограм і кореляційних структур. Показано, що робота програмного комплексу в інтерактивному режимі дозволяє гнучко корегувати процес обробки експериментальних даних. На прикладах аналізу інтерферограм, отриманих при дослідженні ДВЗ, підтверджено, що ефективна робота програмно-технічного комплексу, розробленого у ході виконання дисертаційного дослідження, досягається завдяки автоматизації обробки даних та раціональному комбінуванню різних типів лазерно-інтерференційних методів. Показано, що реалізація програми обробки інтерферограм як інтерактивного додатка до графічного комплексу AutoCAD є ефективним рішенням, що спрощує передачу даних до САЕ-систем, які використовуються для математичного аналізу НДС деталей та вузлів ДВЗ. Проаналізовано взаємозв'язок по обміну даними між експериментальними методами та програмними комплексами кінцевоелементного математичного моделювання COSMOS/M і ANSYS.

Розроблений програмно-технічний комплекс, що поєднує в собі лазерно-інтерференційну вимірювальну систему, обчислювальний комплекс для реєстрації та первинної обробки експериментальної інформації і обчислювальні засоби для аналізу НДС, має не тільки наукову новизну, а і практичну цінність, що підтверджено дослідженнями деталей і вузлів ДВЗ ВА3 21082, МеМ3-245 і ЗМ3 406.

У четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень ГРЗ, що є важливим елементом конструкції ДВЗ. Конструктивне виконання різьбового з'єднання та технологія його збирання істотно впливають на форму робочої поверхні циліндра, а отже і на технічні характеристики двигуна.

На підставі теоретичного аналізу функціонування групових різьбових з'єднань встановлено, що з'єднання такого типу схильні до раптового руйнування через наявність позитивного зворотнього зв'язку в ланцюжку кріплення-деталь-кріплення. На рис.5 приведена схема взаємодії елементів ГРЗ.

Рис.5. Блок-схема функціонування конструкції ДВЗ, до складу якої входить групове різьбове з'єднання

Традиційні засоби контролю процесу затягування різьбових кріплень не враховують взаємний вплив одиниць кріплення, що приводить до істотного зниження надійності з'єднання.

Аналіз схеми взаємодії деталей, що входять до складу групового різьбового з'єднання, показав, що деталі, які з'єднуються, являють собою найбільш інформаційно місткий елемент, що характеризує технічний стан з'єднання. Запропоновано проводити контроль збирання ГРЗ по деформації деталей, що з'єднуються.

Як приклад, на рис.6 представлена інтерферограма поля переміщень кришки групового різьбового з'єднання (рис.6а) та просторовий графік переміщень (рис. 6б), при затягуванні двох болтів.

а) б)
Рис.6. Інтерферограма (а) та поле деформації деталі (б) ГРЗ при за-
тягуванні двох діаметрально розташованих кріпильних одиниць

Розроблена методика збирання і діагностики групових різьбових з'єднань була використана для проведення експериментальних досліджень деформації блоку циліндрів ДВЗ при зборці головки і блоку циліндрів. Така інформація дозволяє:

- оцінити вплив затягування кріпильної одиниці окремо й у складі ГРЗ на деформацію блоку циліндрів ДВЗ;
- використовувати поля переміщень, отримані в експерименті для верифікації математичної моделі блоку циліндрів і головки ДВЗ;
- з'ясувати (для подальшого удосконалювання математичної моделі) особливості фізичної взаємодії елементів з'єднання.

На рис.7 наведено приклад використання запропонованої методики для дослідження деформування блоку циліндрів ДВЗ.

Рис.7. Інтерферограма і графік деформації по перетину А-А блока циліндрів двигуна ЗМЗ 406.10 при затягуванні болтів кріплення головки і блока циліндрів з моментом від 10 Н·М до 20 Н·М.

Отримано нові експериментальні дані про деформування дзеркала циліндра при затягуванні кріплення головки блоку циліндрів. Показано, що застосування розробленого пристрою для контролю радіальних переміщень внутрішньої поверхні циліндричних тіл, дозволяє за один цикл реєстрації одержати панорамну інтерферограму формозміни дзеркала циліндра, як це показано на рис. 8.

Рис.8. Формозміна поверхні дзеркала циліндра двигуна ЗМЗ 406.10 при затягуванні болтів № 1 і №2 з моментом $M=10Н \cdot М$

Застосування розроблених у ході виконання дисертаційного дослідження методів і засобів забезпечує можливість визначення впливу зусилля затягування окремої одиниці кріплення на деформування дзеркала циліндра, дозволяє оцінити локальну жорсткість блоку циліндрів та використати ці дані для додаткової верифікації математичної моделі блока циліндрів ДВЗ.

Практичні результати підтвердили високу ефективність запропонованих методів та засобів для дослідження напружено-деформованого стану ГРЗ ДВЗ.

У п'ятому розділі приведені результати експериментальних лазерно-голографічних досліджень НДС деталей ДВЗ.

На рис.9 показана серія інтерферограм, що відображає процес формування поля нормальних переміщень бічної поверхні блоку циліндрів двигуна ЗМЗ 406.10 при зміні внутрішньокамерного тиску від 0.1 до 3.0 МПа. Характер деформації блоку циліндрів показує високу його піддатливість у зоні картера та схильність до генерації акустичного шуму.

На прикладі дослідження деформації зовнішньої поверхні блоку циліндрів ДВЗ показана практична цінність застосування розроблених пристроїв і програмних засобів у сполученні з запропонованою методикою поетапного тестового навантаження внутрішньокамерним тиском. Проведені дослідження дозволили встановити не тільки індивідуальні деформаційні характеристики блоків циліндрів двигунів ВАЗ 21083 і ЗМЗ 406.10, але і проаналізувати характер формування та розвитку поля деформацій при зміні внутрішньокамерного навантаження.

Рис.9. Серія інтерферограм та графік деформування по перетину А-А поверхні блоку циліндрів ДВЗ ЗМЗ 406.10 при навантаженні перепадом внутрішньокамерного тиску: 1- 0.1 МПа, 2- 0.5 МПа, 3- 1.0 МПа, 4- 2.0 МПа, 5- 3.0 МПа.

Як показали аналогічні дослідження блоків циліндрів ДВЗ МеМЗ 245 та ВАЗ 21083, унікальність картини розподілу поля переміщень по поверхні блоку циліндрів дозволяє використовувати її як для оцінки досконалості конкретного виробу так і для оцінки досконалості конструкції.

У розділі 5 також наведено результати застосування розробленого програмно-технічного комплексу для розрахунково-експериментального аналізу НДС блок-картера ДВЗ, які ілюструють практичну цінність розробки.

Показано, що ефективним шляхом створення кінцевоелементної математичної моделі високої вірогідності є поетапна її верифікація на підставі використання полів переміщень та деформацій під впливом зусиль, що по характеру впливу відповідають робочим та технологічним навантаженням. Запропоновано при автоматизованій розробці складних деталей ДВЗ з використанням CAD/CAM/CAE систем проводити попередню оцінку кінцевоелементних математичних моделей таких деталей за результатами експериментального дослідження полів переміщень деталей-прототипів, що виготовляються з використанням методів швидкого прототипування. Для вимірювань рекомендовано застосовувати різні типи тестових навантажень і послідовно змінювати зони контролю. Запропоновано для початкового аналізу кінцевоелементної моделі блок-картера ДВЗ використовувати навантаження збиральними зусиллями та внутрішнім тиском, а порівняння проводити по розподілу переміщень бічної поверхні. Для подальшої верифікації рекомендовано використовувати поля радіальних переміщень, що виникають при збиранні блок-картера з головкою циліндрів. Проведено експериментальну перевірку створеної методики. Показано доцільність і ефективність поетапного «доведення» математичної моделі ДВЗ до рівня, що забезпечує одержання результатів розрахунку з заданою точністю.

На рис. 10 наведено приклад порівняння полів переміщень, отриманих при математичному моделюванні та у ході проведення експериментальних досліджень блоку циліндрів двигуна ЗМЗ 406.10.

Рис.10. Розрахункове і експериментальне поле нормальних переміщень бічної стінки ДВЗ ЗМЗ 406.10 при навантаженні шляхом затягування різьбового кріплення головки циліндрів з моментом $M=10$ Н·М

Результати досліджень показали, що наукова новизна розробки, реалізована у створених лазерно-інтерференційних методах і засобах аналізу НДС деталей і вузлів ДВЗ, дозволяє ефективно використати їх у складі автоматизованих CAD/CAM/CAE систем для підвищення рівня конструктивної досконалості при створенні, модифікації та дослідженнях ДВЗ, що і складає практичну цінність роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача розробки лазерно-інтерференційних засобів експериментального дослідження напружено-деформованого стану деталей та вузлів ДВЗ для підвищення їх технічних характеристик.

1. Обґрунтовано доцільність використання в автоматизованих системах розробки ДВЗ технології швидкого прототипування сумісно з лазерно-інтерференційними методами експериментального дослідження НДС, що забезпечує розширення діапазону варіації конструктивних рішень та сприяє істотному скороченню часу розробки.

2. Розроблено та реалізовано програмно-технічний комплекс для аналізу НДС деталей та вузлів ДВЗ з використанням лазерно-інтерференційних методів. Досліджено та експериментально підтверджено ефективність його використання як єдиного інформаційного ланцюга від стадії дослідження НДС деталей ДВЗ до передачі даних у автоматизовану CAD\CAM\CAE систему розробки ДВЗ.

3. Розроблено, виготовлено та експериментально досліджено пристрої для панорамної реєстрації формозміни внутрішньої поверхні циліндрів ДВЗ лазерно-інтерференційними методами. В індикаторному варіанті пристрій забезпечує реєстрацію радіальних переміщень у вигляді панорами 360° , протяжністю 0.4-0.45 від діаметра циліндра і з чутливістю до радіальних переміщень 0.1 мікрона. Пристрій для вимірювання повного вектора переміщень внутрішньої поверхні циліндра ДВЗ забезпечує отримання повної панорами (360°) без обмеження її протяжності, з максимальним градієнтом радіальних переміщень по полю 0.1-0.15 мікрона/мм.

4. Запропоновано та розроблено комплект пристроїв для виконання експериментальних досліджень НДС деталей ДВЗ лазерно-інтерференційними методами. Створено формалізовану методику вибору методів та засобів в залежності від задач дослідження.

5. Запропоновано новий спосіб контролю збирання групових різьбових з'єднань з контролем зусиль затягування по деформації деталей, що сполучаються. Експериментально встановлена доцільність використання цього методу для відпрацювання технологічних процесів збирання ГРЗ, аналізу впливу технологічних зусиль на працездатність конструкції та перевірки вірогідності кінцевоелементних моделей вузлів ДВЗ, до складу яких входить ГРЗ.

6. Вперше в практиці двигунобудування отримано панорамні інтерферограми, за якими визначено залежність поля формозміни дзеркала циліндра ДВЗ від зусиль затягування кріпильних одиниць головки і блоку циліндрів ДВЗ. Експериментально досліджено поля радіальних переміщень двигунів ВАЗ 21083, МеМЗ 245, ЗМЗ 406.10.

7. Отримано експериментальні дані про формозміну зовнішніх поверхонь блок-картерів ДВЗ ВАЗ 21083, МеМЗ 245, ЗМЗ 406.10 під впливом внутрішнього тиску в циліндрі. Показано, що лазерно-інтерференційні технології дозволяють оцінити жорсткість конструкції, прослідкувати за розвитком процесу

формозміни у реальному часі, якісно і кількісно оцінити рівень досконалості деталей ДВЗ та визначити напрямки подальшого вдосконалення конструкції.

8. Запропонована методика поетапного лазерно-інтерференційного експериментального дослідження складних деталей та вузлів ДВЗ для забезпечення верифікації їх кінцевоелементних математичних моделей. Рекомендовано при розробці блок-картера ДВЗ проводити початкове порівняння розрахункових та експериментальних полів формозміни, що виникають при затягуванні різьбового кріплення блоку та головки циліндрів. Повторне порівняння виконувати за полями формозміни бічної поверхні блоку під дією внутрішнього тиску, а контрольну перевірку відповідності розрахункової моделі проводити за полями формозміни дзеркала циліндра під дією збиральних зусиль.

9. Проведена ідентифікація кінцевоелементних математичних моделей блок-картерів ДВЗ ВАЗ 21083, МеМЗ 245, ЗМЗ 406.10. Показано, що використання лазерно-інтерференційних досліджень деталей та вузлів ДВЗ для аналізу НДС дозволяє скоротити тривалість етапів розробки та відпрацювання. Підтверджено доцільність використання створених методів та засобів у якості окремого модуля CAD/CAM/CAE/PDM системи для підвищення інформаційної насиченості процесу розробки ДВЗ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кесарийский А.Г. Голографические исследования деформации блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания. //Авиационно-космическая техника и технология: Сборник научных трудов.- Харьков: Гос. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 1999. - Вып.9. - С. 335.

2. Кесарийский А.Г. Создание высокодостоверной математической модели соединений деталей двигателя внутреннего сгорания. //Авиационно-космическая техника и технология: Сборник научных трудов.- Харьков: Гос. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2000. - Вып.19. - С. 211-212.

3. Кесарийский А.Г. Технология изготовления деталей с контролем поля деформации в процессе обработки.// Авиационно-космическая техника и технология: Сборник научных трудов.- Харьков: Нац. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2001. - Вып. 23. - С. 240-242.

4. Кесарийский А.Г. Лазерный, интерференционно-оптический контроль технического состояния конструкций в процессе их изготовления. // Авиационно-космическая техника и технология: Сборник научных трудов.- Харьков: Нац. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2002.- Вып. 31. С. 142-149.

5. Кесарийский А.Г. Оптимизация деталей и узлов конструкции в процессе изготовления. // Вісник двигунобудування. – Запорожье: ОАО “Мотор Сич”, 2003. - №2.- С. 176-178.

6. Кесарийский А.Г. Применение лазерно-интерференционных методов для исследования цилиндров поршневого двигателя. // Двигатели внутреннего сгорания.- Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. - №1 (4).- С.117-119.

7. Кесарийский А.Г. Лазерно-интерференционные исследования напряженно-деформированного состояния в технологии разработки ДВС. //Двигатели внутреннего сгорания.- Харьков: НТУ «ХПИ», - 2005. - №2.- С.85-87

8. Способ сборки группового резьбового соединения: А.с. 1735631 СССР, МПК 7 F 16 В 31/00. / Кесарийский А.Г., Арсеньев С.Л., Николок В.И. и Малин В.И., - №3869942/25-27 (034829); Заявлено 11.03.1985; Опубл.23.05.1992, Бюл. № 19.

Здобувачем запропоновано контролювати процес збирання групового різьбового з'єднання по деформації деталей методами голографічної інтерферометрії .

9. Способ регистрации художественных голограмм. А.с. 1695259 СССР, МПК 7 G 03 Н. / Кесарийский А.Г. - №4634499/25-167485; Заявлено 15.12.1988; Опубл. 30.11.1991, Бюл. № 44.

10. Устройство для контроля качества деталей: А.с. 1762192, СССР, МПК7 G 01 N 19/04./ Кесарийский А.Г., Королев В.Г., Кривега Д.К., Льяной В.Н. и Коломиец Е.А. - № 4811816/28; Заявлено 09.04.1990; Опубл. 15.09.1992, Бюл. № 34.

Здобувачем запропоновано принципову схему пристрою.

11. Устройство для регистрации деформации деталей: А.с. 1772605, МПК G 01 В 7/18, Кесарийский А.Г. и Капустин А.А., – №4867348; Заявлено 17.09.90; Опубл. 30.10.92, Бюл. № 40.

Здобувачем запропоновано принципову та конструктивну схему отримання відбитків рельєфу поверхні деталі.

12. Кесарийский А.Г. Голографические исследования работоспособности двигателей внутреннего сгорания. В кн. Когерентная оптика и голография; Труды XXV школы-симпозиума, Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 1997, С.191 - 197.

АНОТАЦІЇ

Кесарійський О.Г. Розробка лазерно-інтерференційних засобів дослідження напружено-деформованого стану деталей і вузлів ДВЗ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Тепло-ві двигуни. – Національний Технічний Університет “Харківський Політехнічний Інститут”, Харків, 2005.

Дисертація присвячена розробці комплексу програмних і технічних засобів, що реалізують можливості лазерно-інтерференційних методів виміру деформацій і переміщень стосовно до задач підвищення конструктивної досконалості ДВЗ. Визначено ключові моменти у сучасній CAD/CAM/CAE технології розробки

ДВЗ, де використання запропонованих методів дає максимальний ефект. Створено структуру вимірювального комплексу, оптичні схеми, прилади та алгоритми обробки результатів дослідження. Запропоновано нові методи контролю зборки та діагностики групових різьбових з'єднань. Розроблено методику поетапної верифікації математичної моделі блоку циліндрів ДВС з використанням створених методів та засобів. Проведено розрахунково-експериментальні дослідження двигунів ВАЗ 21083, МеМЗ-245, ЗМЗ 406 для практичного відпрацювання розробок.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, напружено-деформований стан, лазерно-інтерференційні методи.

Кесарийский А.Г. Разработка лазерно-интерференционных средств исследования напряженно-деформированного состояния деталей и узлов ДВС. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Тепловые двигатели.- Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков, 2005.

Диссертация посвящена разработке комплекса программных и технических средств, реализующих возможности лазерно-интерференционных методов измерения деформаций и перемещений применительно к задачам повышения конструктивного совершенства ДВС. Показано, что современные технологии конструирования, основанные на применении автоматизированных CAD/CAM/CAE систем, имеют дополнительные резервы совершенствования, которые позволяют сократить время и затраты на разработку ДВС при использовании на ранних стадиях создания конструкции лазерно-интерференционных методов. Установлено, что симбиоз расчетных конечноэлементных методов математического моделирования и экспериментальных лазерно-интерференционных методов может быть успешно использован только при условии максимальной автоматизации измерений и создании специальных устройств, адаптирующих лазерно-интерференционные методы для решения конкретных задач по исследованию деталей и узлов ДВС. Создана структура программно-технического комплекса и методика выполнения расчетно-экспериментального исследования деталей и узлов машиностроительных конструкций. Разработаны оптические схемы и оснастка для исследования корпусных деталей ДВС. Спроектированы и изготовлены устройства для панорамной регистрации поля деформаций и перемещений зеркала цилиндра автомобильного поршневого двигателя. Разработаны алгоритмы обработки экспериментальной информации, получаемой при выполнении лазерно-интерференционных измерений.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования функционирования группового резьбового соединения. Разработаны способы контроля сборки и диагностики технического состояния группового резьбового соединения по деформации сопрягаемых деталей.

На основании разработанных методов и при использовании созданного программно-технического комплекса проведены исследования деформации зеркала и блока цилиндров двигателей ВАЗ 21083, МеМЗ-245, ЗМЗ 406. Установлены особенности работы крепежных деталей головки блока цилиндров, представлены результаты формоизменения зеркала цилиндра при сборке блока и головки цилиндров. Показаны возможности применения лазерно-интерференционных экспериментальных исследований для оптимизации конструкции групповых резьбовых соединений и технологии их сборки. Представлены результаты исследования деформаций и перемещений блоков цилиндров двигателей ВАЗ 21083, МеМЗ-245, ЗМЗ 406 при воздействии внутрикамерного давления. Показано, что поля перемещений наружных поверхностей блока цилиндра при таком нагружении могут быть использованы для верификации математической модели, применяемой при разработке конструкции.

На примере исследования деформации блока цилиндров двигателя ЗМЗ 406 отработана методика анализа напряженно-деформированного состояния конструкции при комплексном использовании расчетно-экспериментальных методов, основанных на применении конечноэлементного моделирования и лазерно-интерференционного экспериментального исследования.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, напряженно-деформированное состояние, лазерно-интерференционные методы.

Kesariysky A. G. Laser-interference techniques for research deflection mode of details and clusters of internal-combustion engines. - Manuscript.

Thesis for obtaining a scientific degree of the candidate of technical science on a speciality of 05.05.03 - Thermal engine .- National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute ", Kharkov, 2005

The thesis is dedicated to development of a systematic symbiotic programmatic and laser-interference methods of measurement of deformations and displacements for performance improvement and design optimization of internal-combustion engines. It is shown, that the modern design technologies, based on CAD/CAM/CAE and FEA systems have means for improvement, which will allow to reduce time and costs to develop an internal-combustion engine if a laser-interference methods are applied. The optical schemes and equipment for research of body parts of internal-combustion engine are designed. The theoretical and experimental research of operation of a flange connection, including bolts, is completed. The inspection methods of assemblies and diagnostic methods of a bolted flange joint, based on deformation of contact parts, are designed. The research of deformation of a cylinder face and cylinder block of engines VAZ 21083, MeMZ-245, ZMZ 406 are completed.

Keywords: internal-combustion engine, deflection mode, laser-interference methods.

Відповідальний за випуск

Гуцуляк Михайло Васильович

Підписано до друку 29 травня 2006 р

Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.

Друкування офсетне. Обсяг умов. друк. арк. 0.9

Тираж 100 прим. Замовлення №_09_

Видавництво П.П.База І.Є.

м. Павлоград, вул. Поштова, 1а