

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Акімов Олег Вікторович

УДК 621.436: 539.3: 621.74

**НАУКОВІ ОСНОВИ КОНСТРУКТОРСЬКО-
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛИТИХ
ДЕТАЛЕЙ ДВЗ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2009

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Марченко Андрій Петрович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
проректор з наукової роботи,
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чайнов Микола Дмитрович,
Московський державний технічний
університет ім. М.Е. Баумана, м. Москва,
професор кафедри поршневих двигунів;

доктор технічних наук, професор
Симбірський Дмитро Федорович
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний
інститут", м. Харків, професор кафедри
конструкцій авіаційних двигунів;

доктор технічних наук, професор,
Ткачук Микола Анатолійович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри теорії і систем
автоматизованого проектування механізмів і машин.

Захист відбудеться «12» листопада 2009 р. о 13⁰⁰ 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 07.10. 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осетров О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проектування і виробництво двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) неможливе без урахування технологічних аспектів виготовлення деталей і вузлів двигуна. Саме такий підхід забезпечує сучасний технічний рівень ДВЗ. Розрахункові і експериментальні методи визначення конструктивної міцності, надійності, умов збірки, монтажних навантажень і ресурсу обов'язково повинні бути узгоджені з тими технологічними закономірностями, що впливають на формування показників ДВЗ в експлуатації. В першу чергу це відноситься до литих деталей, тому що їх маса складає 80-90% маси ДВЗ. Рівень узгодження конструкторського і технологічного підходів припускає обов'язкову наявність компромісу між проектуванням, розробкою та реалізацією технологічного процесу, що є визначальним чинником отримання якісних деталей для забезпечення заданих експлуатаційних характеристик і ресурсу ДВЗ. Як свідчить практика провідних конструкторських бюро, технологічні аспекти обов'язково враховуються при розробці і застосуванні САПР ДВЗ.

Аналіз сучасного стану двигунобудування дозволяє стверджувати про наявність науково-технічної проблеми щодо узгодженості етапів проектування та технологічної підготовки виробництва литих деталей ДВЗ. Причиною цього є не в повній мірі закінчена розробка єдиної методології конструкторсько-технологічного проектування з використанням сучасного рівня комп'ютерних технологій. Крім того, недостатньо досліджено технологічні процеси, що протікають під час формування виливка і визначають реальну, а не теоретично спроектовану конструкцію деталі, а також точність геометричних параметрів, які є одним з основних показників якості литих деталей ДВЗ. Не визначено вплив полів відхилень литих деталей ДВЗ на показники якості, параметричну і функціональну надійність деталей ДВЗ. Це, у свою чергу, призводить до зниження надійності ДВЗ, їх експлуатаційних характеристик і ресурсу та збільшення металоємності.

Відсутність в повній мірі розробленої методології конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ не дозволяє прогнозувати рівень їх технічної досконалості на етапі проектування, вимагає значних коштів на доводку конструкції цих деталей і технологію виробництва і, як наслідок, впливає на якість ДВЗ.

У зв'язку з цим, актуальною є тема дисертації, що спрямована на розробку наукових основ конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ з використанням комп'ютерно-інтегрованих систем і технологій, яка дозволяє вирішити значущу науково-технічну проблему забезпечення підвищення технічного рівня і ресурсу двигунів внутрішнього згоряння.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП» відповідно Державній програмі розвитку двигунобудування України (Указ КМУ від 16.01.1996 р. № 95) і Державній програмі розвитку виробництва вітчизняних малолітражних дизельних двигунів, силових і енергетичних установок для агропромислового комплексу на 2006 - 2010 роки (Указ КМУ від 07.06.2006р. №798).

Здобувач, як виконавець, проводив дослідження за темою дисертації по держбюджетних темах МОН України: «Фундаментальні дослідження фізико-хімічних характеристик процесу згоряння з метою поліпшення показників палива, екологічності й токсичності відпрацьованих газів автотракторних двигунів» (№ ДР 0106U001476); «Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій та унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем» (№ ДР 0107U006813).

Як науковий керівник, здобувач очолював 6 господарчих договорів за темою дисертації: «Програмна розробка та адаптація баз даних по технології виготовлення чавунних відливок» та «Розробка комплекту прикладних програм для інформаційної бази по сертифікації відливок» (ВАТ «Куп'янський ливарний завод», м. Куп'янськ), «Удосконалення технології виготовлення чавунних відливок» (ЗАТ «Харківський завод «Будгідравлика»», м. Харків), «Наукові основи та методи комп'ютерно-інтегрованого ресурсного проектування литих деталей двигунів внутрішнього згоряння» (КП ХКБД, м. Харків), «Наукові основи та методи комп'ютерно-інтегрованого ресурсного проектування виливків деталей двигунів внутрішнього згоряння» (ТОВ «Українська ливарна компанія» (АТ УПЕК), м. Харків), «Наукові основи та методи конструкторсько-технологічного проектування литих колес турбін турбокомпресорів двигунів внутрішнього згоряння» (ЗАТ «Турбо-Веста», м. Харків).

Метою і завданням дослідження є розробка наукових основ конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ на базі використання сучасних експериментальних методів, комп'ютерно-інтегрованого інструментарію і методик ресурсного проектування, що забезпечить задані експлуатаційні характеристики, ресурс; зниження собівартості, час проектування, підвищення конкурентоспроможності і надійності двигунів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Виконати аналіз сучасного стану та шляхів вирішення проблем конструкторського і технологічного проектування литих деталей ДВЗ.
2. Розробити критерії і показники якості литих деталей ДВЗ.
3. Розробити методологію конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ, сформувати комп'ютерно-інтегрований інструментарій, створити чисельні моделі для інженерного моделювання.
4. Сформувати банк даних, який включає початкові і граничні умови конструкторського і технологічного проектування і їх узгодження між собою, уточнені умови експлуатації, монтажні і робочі навантаження литих деталей ДВЗ, показники ресурсу, надійності, які визначають чинники і параметри технологічного процесу.
5. Інтегрувати процеси підвищення рівня технологій виготовлення литих деталей ДВЗ з процесом підвищення технічної досконалості ДВЗ.
6. Виконати експериментальні дослідження для визначення і уточнення експлуатаційних і технологічних параметрів литих деталей ДВЗ, на підставі яких отримати початкові і граничні умови для конструкторсько-технологічного проектування ДВЗ.

7. Узагальнити результати наукових досліджень конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ і сформулювати рекомендації.

Об'єкт дослідження – процес конструювання і технологічної підготовки виробництва литих деталей ДВЗ.

Предмет дослідження – конструкторсько-технологічне проектування литих деталей ДВЗ з використанням комп'ютерно-інтегрованих систем і технологій.

Методи дослідження. Всі теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії ДВЗ, теорії механізмів та машин, теорії деталей машин та сучасному математичному інструментарії. Аналіз проблем конструкторського і технологічного проектування литих деталей ДВЗ виконувався аналітичними, чисельними і чисельно-аналітичними методами моделювання роботи литих елементів ДВЗ. Формування литих деталей ДВЗ за сучасними ливарними технологіями; модернізація їх конструкцій і технологічних параметрів, проводились методом кінцевих елементів і чисельними методами інженерного моделювання. Виконувались експериментальні дослідження модернізованих і базових конструкцій. Експлуатаційні випробування проводились методом планування експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертації для литих деталей ДВЗ вперше були запропоновані рішення і концептуальні методологічні підходи до проектування, що відрізняються від раніше використовуваних наявністю узгодженого конструкторського і технологічного проектування шляхом реалізації безперервного зв'язку і обміном даними між цими процесами, застосування, з відповідною послідовністю, спеціальних для конструкторського і технологічного проектування комп'ютерно-інтегрованих систем і технологій.

Наукову новизну дисертації складають:

1. Наукові основи інтегрованого конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ на базі сучасних ливарних технологій і вимог до технічного рівня конструкцій та розроблена на їх основі концепція зниження ресурсних витрат при проектуванні, доведенні, виготовленні і підвищенні ресурсу деталей.
2. Вперше розроблено концептуальний підхід щодо застосування комп'ютерно-інтегрованих систем як інструментарію для конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ.
3. Запропоновано комплексний підхід до аналізу статичних та динамічних процесів впливу чинників технології виготовлення литих деталей ДВЗ на характеристики роботи двигуна в експлуатації; методологія теплового і термомпружного розрахунків моделей литих деталей ДВЗ, з метою визначення їх впливу на геометричну точність деталей і ККД ДВЗ, забезпечення зниження маси литих деталей ДВЗ.
4. Створені та удосконалені математичні моделі формування та роботи литих деталей ДВЗ в частині, що стосується систем обмежень початкових, граничних динамічних умов для представників литих деталей і розроблено на їх базі комп'ютерно-інтегрований інструментарій конструкторсько-технологічного проектування цих деталей.

5. Розроблена універсальна 3D модель блок-картера циліндрів ДВЗ, у якій вперше реалізована можливість конструкторського і технологічного моделювання на основі функціонального критерію якості литих деталей ДВЗ.
6. Запропоновані основні принципи, обмеження, початкові і граничні умови для проведення розрахунків блок-картера циліндрів ДВЗ в умовах експлуатації та процесу виготовлення з урахуванням величин і напрямів залишкової ливарної напруги і різних механічних властивостей сплаву із-за відмінності структур металу в різних перетинах виливків.
7. Розроблена універсальна 3D модель турбіни ТКР, у якій вперше реалізована можливість конструкторського і технологічного моделювання на основі параметричного критерію якості литих деталей ДВЗ.
8. Створені основні принципи визначення обмежень, початкових, динамічних і граничних умов конструкторсько-технологічного проектування заданого геометричного профілю проточних частин турбіни ТКР з урахуванням величин і напрямів залишкової напруги і деформації «воскової моделі» і виливку турбіни ТКР та їх впливу на ККД турбіни турбокомпресору.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані наукові основи конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ, які реалізовані за допомогою комп'ютерно-інтегрованих систем на ЕОМ, дозволяють більш повно, в порівнянні з відомими результатами досліджень, підвищити рівень технічної досконалості ДВЗ, зменшити ресурсні і поточні витрати при проектуванні, доведенні, виготовленні та експлуатації ДВЗ.

Розроблені методи конструювання литих деталей ДВЗ, універсальні методи проведення конструкційних розрахунків блок-картера циліндрів ДВЗ впроваджені в КП ХКБД (м. Харків), ВАТ «Куп'янський ливарний завод» (м. Куп'янськ), ТОВ «Українська ливарна компанія» (АТ УПЕК) (м. Харків).

Універсальний метод проведення конструкційних розрахунків блок-картера циліндрів ДВЗ з урахуванням динамічних, статичних навантажень і ливарних геометричних параметрів впроваджено в сумісну розробку НТУ «ХПІ» і ТОВ «Українська ливарна компанія» (АТ УПЕК) (м. Харків) по підготовці виробництва вітчизняного двигуна DAEWOO SENS 1,4л.

Методики вдосконалення технологій ливарного виробництва деталей ДВЗ і застосування інноваційної схеми розвитку конструкцій і технологій впроваджені в ВАТ «Куп'янський ливарний завод» (м. Куп'янськ) і ТОВ «Українська ливарна компанія» (АТ УПЕК) (м. Харків).

Методики застосування комп'ютерно-інтегрованих систем CAD/CAE, CALS, PDM, «електронне віртуальне підприємство» при конструкторсько-технологічному проектуванні, виробництві і експлуатації ДВЗ були впроваджені в КП ХКБД (м. Харків).

Чисельно-аналітичний метод динамічних конструкційних розрахунків турбіни ТКР з урахуванням ливарних геометричних параметрів виливків впроваджено в ЗАТ «Турбо-Веста» (м. Харків) і використовується при проектуванні всього модельного ряду ТКР.

Математичне моделювання моделей литих деталей ДВЗ було використано спільно із ЗАТ «Конструкторсько-технологічне бюро верифікаційного моделю-

вання і підготовки виробництва» (м. Харків) при розробці і практичному застосуванні Патенту України на винахід №77767 «Спосіб виготовлення порожнистих прес-форм методом лазерного порошкового спікання».

Результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі на кафедрах «Двигуни внутрішнього згоряння» та «Ливарне виробництво» НТУ «ХПІ» у курсах «САПР ДВЗ», «CAD/CAE в ливарному виробництві», «Інтегровані комп'ютерні системи в ливарному виробництві». Використання в методичній роботі наукових результатів, отриманих в дисертації, дозволило в 2005 році відкрити в НТУ «ХПІ» навчальну підготовку по новій спеціальності 7.092.502 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва».

Особистий внесок здобувача:

- запропоновані, науково обґрунтовані, теоретично і експериментально досліджені наукові основи інтегрованого конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ;
- розроблена і досліджена наукова концепція зниження ресурсних витрат при проектуванні, доведенні, виготовленні і підвищенні ресурсу при експлуатації литих деталей ДВЗ;
- концептуально розроблені і практично впроваджені принципи конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ з використанням комп'ютерно-інтегрованих систем CAD/CAE, CALS, PDM, «електронне віртуальне підприємство».
- розроблена і теоретично досліджена методика комплексного підходу до динамічного аналізу впливу чинників технологічного процесу виготовлення литих деталей ДВЗ на їх робочі характеристики;
- розроблена і експериментально випробувана наукова концепція створення методології теплового і термopружного розрахунків моделей литих деталей ДВЗ з метою визначення їх впливу на геометричну точність деталей і ККД ДВЗ.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Результати досліджень обговорені і позитивно оцінені на: II-XVI міжнародних наукових конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, - 1994 - 2008 рр.); міжнародній науково-виробничій конференції «100 років виробничої і наукової роботи Центральної лабораторії ДП «Завод ім. Малишева», (м. Харків, - 2003р.); XXXIX науково-практичній конференції Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків, -2006 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні питання світової науки-2007» (м. Дніпропетровськ, -2007р.); XIII Міжнародному конгресі двигунобудівників (м. Рибаче, Крим, -2008р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 28 наукових працях, з них: 13 статей у збірниках наукових праць, 10 статей у наукових журналах, 4 тези доповідей, отримано 1 патент України на винахід. У наукових фахових виданнях ВАК України опубліковано 22 праці.

Структура і об'єм роботи.

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 315 сторінок, із них 97 рисунків за текстом, 1 рисунок на окремій сторінці, 15 таблиць за текстом, 4 додатки на 37 сторінках, 221 найменування літературних джерел на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрита загальна характеристика роботи, суть і стан наукової проблеми, обґрунтована актуальність розглянутої теми, сформульована мета, основні завдання дослідження і шляхи їх рішення.

У першому розділі виконано аналіз, який підтвердив, що в сучасних підходах до рішення задач, пов'язаних з проектуванням деталей ДВЗ, використовуються чисельні методи математичного моделювання та аналізу конструкцій ДВЗ. У роботах, що присвячені проектуванню деталей ДВЗ, в більшості випадків вирішуються проблеми розрахунку термонапруженого стану, зокрема розробки методик таких розрахунків. Серед основних завдань, що вирішуються науковцями в цьому напрямі, можна виділити: розробку алгоритму визначення граничних умов для деталей ДВЗ; визначення температурних полів в деталях двигунів; розробку методик розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) деталей ДВЗ з урахуванням контактної взаємодії при сполученні деталей; розробку методик побудови конструкцій деталей ДВЗ.

Відзначено, що вибір деталей, які підлягають проектуванню, широкий фактично для всіх груп ДВЗ, і вибір інструментів проектування, технології моделювання і адекватного визначення граничних умов для кожного випадку вирішується окремо. Разом з цим показано, що питання конструювання і технологія виготовлення деталей ДВЗ, особливо на етапі отримання литих заготовок і деталей, значною мірою не узгоджені і по ряду позицій входять в протиріччя. Це не дозволяє ефективно використовувати систему автоматизованого проектування, у відповідності до сучасних вимог підвищити рівень технічної досконалості литих деталей ДВЗ. Крім того, зменшити ресурсні і поточні витрати, що пов'язані з такими етапами життєвого циклу ДВЗ, як конструкторське і технологічне проектування, виготовлення, доведення конструкції та експлуатація.

Систематизуючи фактичні результати в проектуванні деталей ДВЗ зроблено висновок про те, що реалізований багатьма науковцями алгоритм проектування деталей ДВЗ не дає можливості відповісти на наступні важливі питання:

1. методика розрахунку температурних полів в термопружній постановці і у взаємозв'язку з формуванням залишкової напруги в деталях на «технологічних» етапах їх розробки і виготовлення;
2. методологія проектування литих деталей ДВЗ на основі моделювання напружено-деформованого стану;
3. вирішення проблем для етапу технології виготовлення литих деталей ДВЗ, як найбільш важливого етапу, що детермінує показники надійності і експлуатаційні показники двигунів.

Названі проблеми дозволяють зробити висновок про те, що, не дивлячись на певні успіхи, досягнуті при комп'ютерному автоматизованому проектуванні деталей ДВЗ, стверджувати про наявність прийнятної оптимальної методології проектування не доводиться. Тому розробка методології конструкторсько-технологічного проектування деталей ДВЗ, яка узгодила б питання конструкторського і технологічного проектування з урахуванням вимог до високого технічного рівня конструкції литих деталей ДВЗ, сучасних ливарних технологій та умов експлуатації, дозволило б вирішити важливу науково-технічну проблему щодо підвищення рівня вітчизняного двигунобудування.

Наведено, що в основу «петлі життєвого циклу» виробу покладено поняття «якість», яке багато в чому визначає ефективність і конкурентоспроможність. В даний час витрати, викликані низькою якістю і переробкою продукції, складають в різних країнах 20-40% суми витрат підприємств і багато в чому пов'язані з недостатньою ефективністю етапів 2,4 (рис.1). Тому можна вважати, що забезпечення високих показників на цих етапах життєвого циклу ДВЗ, що розглядаються в дисертаційній роботі, повною мірою відповідає світовим тенденціям розвитку ДВЗ – одного із головних виробів цивілізації та показнику розвитку промисловості держави.

Механізм виникнення різних ливарних дефектів і методи боротьби з ними детально висвітлені в літературі з ливарного виробництва. Узагальнення цих видів дефектів для литих деталей ДВЗ дозволяє говорити про те, що 43% дефектів складають невідповідність форми, розмірів і маси деталей, 10% - дефекти на поверхні, 12% - дефекти від включень, 5% - дефекти, пов'язані з усадкою металу, 13% - залишкова напруга і тріщини, що приводять до відмов, 17% - невідповідність по структурі механічним властивостям та хімічному складу сплаву.

Наявність дефектів приводить до функціональних і параметричних відмов деталей. При цьому слід враховувати, що параметричною відмовою вважається випадання конкретного параметра якості за встановлений діапазон, тобто невідповідність фактичних полів розсіювання параметра якості і заданого поля допуску. Така невідповідність може в рівній мірі виявитися негативною для деталей будь-якої групи ДВЗ.

На підставі статистичної обробки даних про функціональні і параметричні відмови литих деталей ДВЗ і зіставлення їх з проектними рішеннями на рівні технології їх виготовлення можуть бути побудовані графіки для виявлення фактичних відхилень показників якості литих деталей, які забезпечують необхідні показники надійності деталей, що допускаються. Принциповий вид такого графіка представлений на рис. 2. Він показує вплив полів відхилень показників якості литих деталей на параметричну і функціональну надійність деталей ДВЗ різних груп – на прикладі блоку циліндра двигуна і колеса турбін турбокомпресорів.

В розділі зроблено висновок, що для реалізації методології конструкторсько-технологічного проектування необхідно включення у якість початкових та граничних умов до бази даних комп'ютерно-інтегрованого автоматизованого проектування литих деталей ДВЗ показників функціональної і параметричної їх надійнос-

ті, які притаманні і для конструкторського, і технологічного проектування литих деталей ДВЗ.

Аналіз наукової і технічної літератури, присвяченої сучасним програмним і апаратним засобам проектування, дозволили вибрати CAD/CAM/CAE/PDM системи, як потенційно ефективні для конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ.

Другий розділ був присвячений розробці інтеграції технології кінцево-елементного моделювання за критеріями функціональної та параметричної надійності ДВЗ.

Для окремих агрегатів ДВЗ такими показниками можуть бути відповідні коефіцієнти корисної дії (ККД) цих агрегатів (наприклад, турбокомпресора) або специфічні показники, які мають вагомий вплив на техніко-економічні показники ДВЗ. для підсистем ДВЗ, що характеризують ефективність їх роботи. Як правило, показники функціональної і технічної ефективності носять інтегральний або комплексний характер і не можуть бути застосовані безпосередньо до литої деталі. Проте вони містять критерії нижчого рівня (комплексні, групові і одиничні), вживані безпосередньо до литої деталі.

Функціональна надійність деталей ДВЗ детермінується напружено-деформованим станом елементів, схема дослідження якого вбудована в процес проектування виробів машинобудівного призначення і зберігається в середовищі автоматизованого проектування. Загальна структура інтеграції комп'ютерних систем на різних етапах життєвого циклу ДВЗ приведена на рис. 3.

Запропоноване поетапне рішення проблеми, включає: аналіз статичного і динамічного навантаження литої корпусної деталі ДВЗ і моделювання її несучої здатності; аналіз власних коливань деталі; моделювання кристалізації виливка; моделювання фізико-механічних властивостей литої деталі ДВЗ; розмірно-геометричний аналіз відливів і стабілізація геометричних параметрів.

Оптимізація КЕМ виконана для приклада блок-картера дизеля 4ЧН12/14 та блок-картеру бензинового двигуна МЕМЗ із іскровим запалюванням для вітчизняного автомобіля DAEWOO SENS 1,4. Для рішення задачі оптимізації в дисертаційній роботі реалізовано підхід до моделювання, який був запропонований проф. Ткачуком М.А., схема цього підходу приведена на рис.4.

Попередні результати моделювання з урахуванням бази даних щодо умов експлуатації ДВЗ, матеріалу блок-картерів, фізико-хімічних умов технологій литва, початкових і граничних умов дозволили сформулювати подальший напрямок синтезу математичних моделей для реалізації методології конструкторсько-технологічного проектування. Розроблені КЕМ та 3D- моделі блок-картеру показані на рис.5-6.

Для блок-картера дизельного ДВЗ комплекс математичних моделей його працездатності повинен реалізовувати визначення НДС, статичний і динамічний аналіз міцності, тепловий та нестационарний температурний аналіз а також термо-

циклічний аналіз. Для блок-картеру ДВЗ із іскровим запалюванням – подані для визначення в тілі литої деталі дефектів усадкового походження. Крім того, результати моделювання дозволили ідентифікувати причини, що призводять до появ цих дефектів - нерівномірність застигання тонкостінних і товстостінних масивів в блоці циліндрів (рис. 7).

Таким чином, на підставі аналізу критеріїв якості моделі вирішена задача вибору критеріїв подальшого проектування литих корпусів ДВЗ з урахуванням технологічних особливостей їх виготовлення. Для вирішення проблеми вживання сучасних засобів і систем проектування необхідна розробка методології «конвеєрного» проектування, що дозволяє виявити потенційні помилки в проектуванні литих деталей ДВЗ.

У третьому розділі розглянуто математичне моделювання інженерного аналізу КЕМ на основі «конвеєрного» створення математичних моделей в процесі проектування. Досліджувана деталь, на базі якої відпрацьовувалась методологія проектування, - блок-картера ДВЗ, може бути віднесена до складних за своєю конструкцією деталей, яка має значні термічні і механічні навантаження в процесі її виготовлення та експлуатації.

У математичних моделях НДС литих деталей ДВЗ реалізовані підходи, кожний з яких має свої особливості рішення, завдання початкових і граничних умов:

- міцностний статичний аналіз:

$$[K]\{u\} = \{F\},$$

де $[K]$ - матриця жорсткостей; $\{u\}$ - вектор переміщень;

- міцностний динамічний аналіз

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{F(t)\},$$

де $[M]$ - матриця мас; $[C]$ - матриця опорів; $[K]$ - матриця жорсткостей; $\{u''\}$ - вектор вузлових прискорень; $\{u'\}$ - вектор вузлових швидкостей; $\{u\}$ - вектор вузлових переміщень; $\{F\}$ - вектор навантажень; (t) – час;

- нестационарний температурний аналіз

$$[C]\{T'\} + [K]\{T\} = \{Q\},$$

де $[C]$ - матриця питомих теплоємностей; $\{T'\}$ - похідна за часом температури у вузлі; $[K]$ - матриця ефективної теплопровідності; $\{T\}$ - вектор вузлових температур; $\{Q\}$ - вектор ефективного теплового потоку у вузлі.

В загальному вигляді отримано математичну модель у виді систем диференціальних рівнянь –

або у матричному вигляді –

$$\left[C_e^t \right] \cdot \dot{T}_e + \left[K_e^{tm} \right] + \left[K_e^{tb} \right] + \left[K_e^{tc} \right] \cdot T_e = Q_e + Q_e^c + Q_e^g$$

де:

$$K_e^t = \rho \int_{Vol} c \cdot N \cdot N^T \cdot d(vol) \quad - \text{матриця питомої теплоємності елемента (термічне демпфування);}$$

$$K_e^{tm} = \rho \int_{Vol} c \cdot N \cdot v^T \cdot B \cdot d(vol) \quad - \text{матриця провідності від масового перенесення для елемента;}$$

$$K_e^{tb} = \int_{Vol} B^T \cdot D \cdot B \cdot d(vol) \quad - \text{матриця дифузійної провідності для елемента;}$$

$$K_e^{tc} = \int_{S_3} h_f \cdot N \cdot N^T \cdot d(S_3) \quad - \text{матриця конвекційної провідності для елемента;}$$

$$Q_e^f = \int_{S_2} N \cdot q^* \cdot d(S_2) \quad - \text{вектор масового потоку для елемента;}$$

$$Q_e^c = \int_{S_3} T_B \cdot h_f \cdot N \cdot d(S_3) \quad - \text{вектор конвективного теплового потоку на поверхні елемента;}$$

$$Q_e^g = \int_{Vol} \dot{q} \cdot N \cdot d(vol) \quad - \text{навантаження на елемент від генерації тепла.}$$

Для завдань фазового переходу, C_e^t обчислюється по кривій ентальпії. Накладені обмеження на вузли КЕ моделі литої деталі блок-картера ДВЗ приведені на рис.8.

Метою експериментальних досліджень було визначення початкових і граничних умов, залишкової напруги, фактичних значень вхідних і вихідних параметрів для проектування і виготовлення литих деталей ДВЗ. Експериментальні дані дозволяють оцінювати адекватність отримуваних результатів, коректуючи оптимальним чином процес проектування.

Залишкова напруга в литих навантажених виробах складної просторової геометрії може істотно позначатися на несучій здатності литих деталей. Випробуванням, але трудомістким і дорогим, методом оцінки залишкової напруги є експериментальні дослідження шляхом наклейки тензометричних датчиків в досліджуваних областях з подальшим виділенням (вирізуванням) їх зі всієї конструкції (рис.9).

Встановлена таким шляхом схема напруги у виливках показана на рис.10.

Для визначення фактичної лінійної усадки сплаву, тріщоностійкості та термічної напруги застосовувались спеціальні прилади.

Розглядався нерівномірний розподіл температур по відливанню блок-картера, що виникає після фазового переходу всіх вузлів моделі в твердий стан (у цей момент виливок вважався без напруги) і його зміну до нормальної температури навколишнього середовища (20⁰С). Експериментально отримана залежність фізичних властивостей чавуну виливку від температури представлена на рис.11, а термограма на рис.12.

Отримані експериментальні результати в сукупності з результатами досліджень металографії мікроструктур (рис.13) в центральній частині литої деталі та на її поверхні можуть бути використані як репер для випробування інших сплавів при виготовленні литих деталей ДВЗ та для подальшого моделювання з метою перевірки відповідності прийнятих в проектуванні рішень і обраним показникам якості ДВЗ.

Результати моделювання фазового переходу в базового виливку блок-картера ДВЗ (в стаціонарній температурній задачі) представлені на рис.14-15

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що у момент часу 5600 с, відповідний переходу сплаву в стан «солідус», деякі вузли не встигли перейти в цей стан (рис.15). Отже, в цих місцях виливку формуються залишкова напруга і усадкові явища. Результати рішення термопружної задачі, отримані на КЕМ, показані на рис. 16.

Проведений аналіз власних коливань литого блок-картера дозволив виявити закономірності для перших п'яти власних частот коливань (рис.17).

Отримані результати аналізу на розроблених моделях дозволяють обрати основні напрямки подальшого вдосконалення процесу конструкторсько-технологічного проектування, зокрема в напрямку зміни конструкції чи технологічних факторів.

У четвертому розділі наведені результати розробки основних шляхів модернізації литих деталей «блок-картера ДВЗ» на основі методології конструкторсько-технологічного проектування.

Розрахункові дослідження з використанням КЕМ блок-картера ДВЗ (модель включає 5064057 вузлів і 3447935 тетраедральних кінцевих елементів), дозволяють виявити місця в литій деталі, в яких можливе утворення тріщин. Вони виникають унаслідок залишкової напруги (у статичній і динамічній постановках задачі), унаслідок фазових переходів, при нерівномірному розподілі температурних полів в деталі.

За результатами аналізу дислокації, напрямів і величин напруги були визначені найбільш проблемні місця в конструкції блок-картеру ДВЗ та запропоновані конструкторські та технологічні рішення по усуненню недоліків. Методом рішення даної задачі фактично є забезпечення високої функціональної надійності литої корпусної деталі ДВЗ на етапі конструкторсько-технологічного проектування і зменшення витрат на експериментальну доводку конструкції і технології виробництва блок-картеру ДВЗ.

Першим етапом модернізації литої деталі блок-картера за результатами розрахунково-експериментального дослідження логічно стала зміна в конструкції, зокрема в тих місцях, в яких було виявлено небезпечний НДС з погляду виникнення

функціональних відмов корпусів. Модернізація охопила 603 поверхні, 5752 граничних лінії, товщина міжциліндрових перегородок була доведена до 7мм, вага деталі знизилася на ~23 кг. Розподіл температур по базовому виливку блок-картера, що виникає після фазового переходу всіх вузлів моделі в твердий стан, а також мікроструктура чавуну в небезпечній зоні представлені на рис.18.

Як видно, в центральній зоні блок-картера в найбільш небезпечному місці з високим рівнем НДС, графіт крупнодисперсний, що обумовлює низькі механічні властивості конструкції. У модернізованій конструкції (рис.19) після повного твердіння розподіл температур в конструкції блок-картера є більш рівномірним. Мікроструктура характеризується меншим розміром графітових включень. Як наслідок – менша залишкова напруга і вищі механічні властивості.

Порівняння результатів випробувань при динамічних робочих та монтажних навантаженнях підтвердили аналогічну картину (рис.20). Результати приведені для третьої власної форми коливань.

Довговічність роботи корпусних деталей ДВЗ при дії достатньо високої механічної і термічної напруги визначається, головним чином, механічними властивостями сплаву, а саме межею міцності на розрив і деформацією руйнування. Критерієм оцінки довговічності роботи матеріалу служить питома робота руйнування чавуну.

Сірі чавуни, що в більшості використовуються для виливків блок-картерів ДВЗ повинні мати не тільки високу міцність, але й високі значення показника, який характеризує деформацію руйнування при розтягуванні. Відомо, що для сірих чавунів цей показник знаходиться на рівні 0,4-0,5%. Разом з тим, для забезпечення високої надійності роботи ДВЗ в експлуатації бажано було б мати показники міцності на розрив на рівні 280-300 МПа і деформацію руйнування при розтягуванні до 1 %.

Аналіз показує, що використання для виливків блок-картерів ДВЗ високоміцних чавунів супроводжується великими конструкторськими і технологічними проблемами, які обумовлені високою складністю технології відливання корпусних деталей складної геометричної форми та проблемами із забезпеченням в конструкції виливку допустимих рівнів залишкової ливарної напруги і деформації.

З метою забезпечення поліпшення технічних характеристик блок-картера ДВЗ в дисертації були досліджені малокремністі алюмінієві чавуни (МАЧ). Поліпшення властивостей сірих чавунів можливе при зменшенні вмісту в них кремнію із заміною його повною або частковою алюмінієм. Відмітною можливістю мікророзподілу фосфору в алюмінієвому чавуні є малий розмір перехідного шару поблизу фосфидної евтектики, насиченої цією домішкою. Його товщина в 5-6 разів менша, ніж в звичайних сірих чавунах. Ця особливість, згідно металознавчим уявленням, сприятливо впливає на величину в'язкості і пластичності алюмінієвого чавуну. Отже, якісно і кількісно змінюється природа і механізм впливу фосфору на крихкість чавуну, що створює передумови для отримання нового виду чавунів.

Досліджено оптимальний вміст алюмінію та кремнію в чавуні з критерію максимуму межі міцності. Заміна матеріалу та технології виготовлення чавуну відображається в процесі проектування як фактор, що поряд зі зміною конструкції перегородок, дозволяє поліпшити якість литого блок-картеру.

Таким чином, в дисертації за функціональним критерієм якості литих деталей на прикладі блок-картера ДВЗ розглянуті основні заходи конструкторсько-технологічного проектування ґрунтованого на використанні комп'ютерно-інтегрованого інструментарію.

В п'ятому розділі у відповідності із метою і завданнями дисертаційного дослідження були розглянуті питання конструкторсько-технологічного проектування для представника литих деталей за функціональним критерієм якості, а саме розглянуті турбіни турбокомпресорів ТКР-7,5 ТВ; ТКР-8,5 ТВ та їх модифікації.

Все вищесказане ставить першочергове завдання використання методики «конвеєрного» проектування до розробки адекватної КЕМ робочого колеса, її оптимізації і аналізу з метою подальшої розробки конструкції (рис.21). При цьому найважливішим чинником, який повинен враховуватися на цьому етапі, є чинник технологічний – облік технології виготовлення литої деталі колеса, без якого неможливо вирішити поставлену задачу стабілізації високого ККД турбіни турбокомпресора, а отже і ДВЗ.

Залежності ККД (γ) колеса турбіни ТКР-7.5ТВ від кута нахилу лопатки (β) на виході каналу приводять до коливань ККД (γ) до (- 2)% його максимального значення. Інші технологічні погрішності робочих коліс турбін при виготовленні ливарним способом можуть не лише впливати на газодинамічні характеристики, але і погіршувати надійність турбокомпресора, призводячи до зниження запасу міцності або, в критичному випадку, поломкам робочих коліс. На відміну від газодинамічних характеристик, міцності менше залежать від малих відхилень просторового розташування профілю лопатки (характерних кутів нахилу профілю), але вельми чутливі до різних величин товщини лопаток в схожих місцях.

Для знаходження граничних і статистичних оцінок розкиду σ_{imax} турбінних коліс ТКР використовувалася теорія аналізу чутливості (АЧ) стосовно розробленої КЕМ колеса на базі тривимірних ізопараметричних 20-вузлових кінцевих елементів (КЕ). Модель включала 5841 вузлів для 858 КЕ. На рис. 22 дана картина АЧ максимальної інтенсивності напруги до нормальних приростів вузлів КЕ сітки $\partial(\sigma_{\text{imax}}) / (\bar{n})$ для колеса турбіни ТКР-8.5ТВ. По картині АЧ σ_{imax} до товщини лопатки турбіни ТКР-8.5ТВ і дисперсії що допускається і реальною різнотовщинністю по поверхні лопатки і ступиці розраховано стандартне відхилення σ_{imax} , що дорівнює 1.6% від $\sigma_i^{\text{max}}_{\text{ном}}$, яке указує на відносно невисокий вплив різнотовщинності на максимальну напругу в полі відцентрових сил.

З рис. 22 видно, що область біля кореня лопатки на виході потоку для спинки і коритця має чутливість різного знаку, тобто найбільший вплив на σ_{imax} надає переміщення серединної поверхні лопатки, а не зміна товщини. Для області лопатки уздовж зовнішнього меридіонального обводу навпроти - σ_{imax} росте із збільшенням товщини. Зниження товщини міжлопаткової області диска призводить до зниження σ_{imax} . Реальна «різнотовщинність» лопаток приводить до частотного розладу лопаток ідеально циклічно-симетричній конструкції (ЦСК) колеса. Це позначається на розшаруванні раніше кратних власних частот (ВЧ) коливань вінця лопатки, спотворенні раніше гармонійних в окружному напрямі (для схожих крапок) власних форм (ВФ) коливань, викликає перерозподіл енергії при вимушених коливаннях між лопатками і, зрештою, приводить до розкиду резонансної напруги, підви-

щенню динамічної навантаженості вінця лопатки турбіни в цілому. З урахуванням відомого характеру кривої втомної міцності 50% підвищення динамічної напруги (σ_{imax}) може у декілька разів понизити ресурс виробу.

Динамічне збудження визначається окружною нерівномірністю тиску газу, турбіни, що виникає в раглику лопатки, або при застосуванні двозахідних каналів, і пов'язано з частотою обертання ротора ТКР. З іншого боку, обороти обертання ротора турбокомпресора істотно (на 50%) змінюються залежно від режиму роботи двигуна. Тому відбудова від резонансних коливань у робочому діапазоні оборотів обертання ротора з однією з гармонік навантаження не представляється можлива. Так для спектру власних частот колеса турбіни ТКР-8,5ТВ (таблиця 1) при обертах 1000-1500 с⁻¹ можливі резонанси з п'ятою і шостою гармоніками газового навантаження, що свідчить про необхідність детального аналізу конструкції.

Нероз'ємність колеса і високі ВЧ обумовлюють відносно малі рівні демпфування, що підвищує небезпеку резонансної напруги. Крім того, структура спектру ВЧ така, що в нижній частині розташовується пакет частот "лопаток" коливань, породжений першою ВФ коливань ізольованої лопатки. Відносна щільність цього пакету співпадає з величиною частотного розладу ізольованої лопатки, що характеризує найбільш небезпечну, в сенсі можливості реалізації максимального перевантаження, область співвідношення параметрів.

Для моделювання пружних зв'язків між підсистемами (лопатками) для дискретної моделі робочого колеса (рис. 23), був проведений чисельний експеримент.

Різномістотність лопаток вважалася нерандомізованою і розподіленою по нормальному закону з дисперсією $\sigma^2(\eta f_i)$. Як генератор випадкових розладів використовувалася стандартна підпрограма генерації випадкових чисел з постійним законом розподілу на відкритій ділянці 0,1 транслятора Microsoft FORTRAN (Random) з ініціалізацією по поточному часу, які по відомих залежностях перетворювалися в нормальний розподіл різномістотності лопатки із заданим математичним очікуванням (МО) і середньоквадратичним відхиленням (СКО σ).

Вибірка випадкової величини різномістотності для кожної окремої лопатки заздалегідь перевірялася на відповідність нормальному закону розподілу по критерію χ^2 рівнем значущості $\alpha = 0,75$. Потім для 1000 отриманих таким чином видів розстроєних вінців вирішувалась задача вимушених коливань, розраховувалися статистичні характеристики $\beta[\sigma(\eta f_i)]$ або $\beta[\sigma(PR)]$. Залежність $МО\{\beta[\sigma(PR)]\}$ будувалася аналогічно по 25 значенням $\sigma^*(\eta f_i)$ для кожної з гармонік збудження (рис.24).

По даній методиці досліджувалося колесо турбіни ТКР-8.5ТВ з 11 лопатками (N=11). Знайдена щільність розподілу перевантаження для системи з 11 лопатками і дисперсією параметра розладу 0,5 при дії п'ятої (шостою) гармоніки збудження і її характеристики (МО(β)=1,3 $\sigma(\beta)$ = 0,125, коефіцієнт асиметрії (-0,12), коефіцієнт ексцесу (-0,5).

Таким чином, встановлено, що найбільш небезпечним наслідком технологічних відхилень геометрії робочих коліс турбін ТКР є можливість зростання резонансної динамічної напруги. Для серійної технології виготовлення, приймаючи спрощену дискретну систему з відповідними парціальною частотою підсистеми і щільністю

спектру, отримані оцінки найбільшого перевантаження ($\max \beta^{kp}=1,67$), що реалізується, і статистичні характеристики перевантаження ($MO(\beta)=1,3$ $\sigma(\beta)=0,125$).

Отримані результати дозволяють зробити висновок про раціональність подальшого зниження різнотовщинності з метою зменшення можливих перевантажень при резонансних коливаннях. При строгішому підході слід використовувати повну КЕ-модель колеса, уточнену тривимірну модель газодинамічного навантаження і оптимально мінімізувати число розрахунків для різних варіантів реалізацій розладу, зберігаючи прийнятну точність в рамках методу чисельного моделювання.

На основі всебічного аналізу програмних продуктів для вирішення специфічного завдання побудови КЕМ колеса турбіни доцільною є прийнята технологія проектування, що в рамках загальної викладеної методології дозволила оптимізувати конструкцію колеса турбіни по сумісних критеріях міцності і газодинаміки. На рис. 25 приведені характерні розподіли інтенсивності напруги σ_i коліс турбін, до оптимізації по робочих характеристиках (рис.25а - ТКР-11) і після оптимізації (рис.25б - ТКР-8.5ТВ).

Таким чином, етап проектування, пов'язаний з розробкою і оптимізацією КЕМ, дозволив перейти до наступного кроку проектування – до технологічного етапу проектування та виготовлення коліс турбіни ТКР ДВЗ.

У шостому розділі була вирішена проблема модернізації технологічних рішень при проектуванні литих деталей коліс турбін турбокомпресора ДВЗ.

Враховуючи, що основним етапом в технології виготовлення литої деталі колеса турбіни і, в той же час, етапом, що «закладає» параметричну надійність двигуна, є виготовлення моделі («восківки»), що виплавляється, задача звичайно-елементного моделювання повинна бути вирішена і для неї. Була отримана просторова КЕ модель восківки, що включає 17900 вузлів і близько 84000 кінцевих елементів тетраедральної форми (рис.26).

На КЕ колеса турбіни ТКР-8,5ТВ, що серійно виготовляється, був досліджений процес деформації восківки, з попереднім визначенням розподілу температурного поля у восківці після її твердіння. Для досягнення вказаної мети послідовно вирішувалися два завдання: твердіння воскової моделі від 55° С протягом 1,5 хвилин у формі; термопружна деформація у момент вирівнювання температур до 20° С із-за подальшого занурення воскової моделі у воду.

Аналіз деформації сектора «восківки» колеса турбіни унаслідок усадки і дії залишкової напруги при застиганні, виконаний на КЕМ, дозволив визначити фактичні погрішності на моделі, які «переносяться» на готову литу деталь. За допомогою КЕМ було встановлено, що поле температур нерівномірне, з дислокацією максимуму в масивному перетині підстави колеса.

Така нерівномірність приводить до формування залишкової напруги в секторі «восківки». Залишкова напруга, що виникає в результаті нерівномірності температурних полів в «восківці» з урахуванням низького значення модуля пружності, співпадає з усадковими деформаціями. Як граничні умови при визначенні величини деформації в кожній крапці «восківки» були прийняті умови затискання для вузлів КЕ моделі, розташованих в граничній торцевій площині валу. Початковий стан во-

скової моделі зображений у вигляді каркасної моделі, деформоване - у вигляді КЕ моделі (вузли лопатки КЕ моделі восківки на виході турбіни до і після усадки (рис. 27).

Розрахунок зміни кута нахилу серединної поверхні лопатки на зовнішньому вихідному діаметрі по точках А', В', С' показав його зменшення на 4,2 град., що достатньо точно узгоджується з вимірюваннями реальних виливків. Результати описаного моделювання деформації «восківки» відповідають розрахунку «прямого завдання», що дозволяє визначити з достатньо високою точністю температурні поля у восківці, можливу напругу в секторі восківки, усадку і викликані ними деформації окремих елементів. Останні є визначальними чинниками з погляду формування параметричної надійності турбіни ТРК двигуна на етапі його проектування.

Далі було поставлено і вирішено завдання знаходження такої початкової форми восківки, яка б з урахуванням подальшої деформації точно забезпечила б спроектований профіль лопаток турбіни турбокомпресора. Для цього на воскову модель з необхідним профілем лопатки наклали дію «зворотного температурного поля» (отриманого відніманням початкових температур з кінцевих). Результат представлений на рис. 28 (каркасна модель – результатна, КЕ модель - кінцева).

Розглянуті рішення задач твердіння і пружної деформації воскової моделі колеса турбіни служать основою для вдосконалення технологічного процесу виготовлення коліс турбін, а також інших виливків з складною геометрією по моделях, що виплавляються. Для зменшення погрішностей формоутворення були розроблені технічні рішення щодо проектування ливарної оснасти та технології виготовлення воскових моделей, які дозволили знизити інтенсивність залишкової температурної напруги (рис.29) та підвищити ККД турбіни (рис.30) на етапі її проектування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена і вирішена науково-технічна проблема розробки наукових основ конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ на базі використання сучасних експериментальних методів, комп'ютерно-інтегрованого інструментарію і методик ресурсного проектування, які забезпечують задані експлуатаційні характеристики, ресурс, зниження собівартості, часу проектування і впровадження у виробництво, підвищення конкурентоспроможності і надійності двигунів.

Вирішення цієї проблеми має важливе для двигунобудування значення, що дозволяє прогнозувати рівень технічної досконалості ДВЗ на етапі їх проектування, знижувати витрати коштів на доведення конструкції литих деталей ДВЗ і технологію їх виробництва, розвивати двигунобудування в Україні.

У дисертаційному дослідженні отримані наступні основні результати:

1. Погоджене конструкторське і технологічне проектування на основі реалізації безперервного зв'язку і обміну даними між цими процесами і застосування з відповідною послідовністю комп'ютерно-інтегрованих систем і технологій склали суть наукових основ конструкторсько-технологічного проектування ДВЗ.

2. Створені і вдосконалені математичні моделі статичного та динамічного аналізу в частині, що стосується систем обмежень початкових, граничних і динамічних умов для представників литих деталей ДВЗ, і створений комп'ютерно-інтегрований інструментарій конструкторсько-технологічного проектування цих деталей застосовані в проектуванні деталей ДВЗ.
3. Доведено, що методологія глибокої модернізації і підвищення технічного рівня литих деталей ДВЗ базується на науково-практичному підході до конструювання литих деталей ДВЗ з врахуванням 3-х мірного розподілу залишкової ливарної напруги і методології конструювання литих деталей ДВЗ з врахуванням неоднорідності механічних властивостей сплаву в різних перетинах відливач.
4. Запропонована комплексна методологія конструювання литих деталей ДВЗ із заданими механічними властивостями в різних перетинах деталей, з врахуванням чинників ливарного технологічного процесу і управління геометричними параметрами деталей на ливарному технологічному етапі.
5. Розроблені або істотно уточнені розрахунково-аналітичні методи конструювання і інженерного аналізу литих деталей ДВЗ, які дозволили реалізовувати методологію конвеєрного конструкторсько-технологічного проектування. До цих методів відносяться: універсальний метод проведення конструкційних розрахунків і інженерного моделювання картера блок циліндрів ДВЗ з врахуванням динамічних і статичних навантажень і ливарних геометричних параметрів; інтегральний метод проведення конструкційних розрахунків і інженерного аналізу картера блоку циліндрів ДВЗ з врахуванням монтажних навантажень і розподілів залишкової ливарної напруги.
6. Методологія конвеєрного конструкторсько-технологічного проектування практично реалізована через комплексні універсальні методи:
 - комплексний універсальний метод проведення розрахунків і інженерного аналізу картера блоку циліндрів ДВЗ з врахуванням ливарних технологічних факторів; універсальний чисельно аналітичний метод динамічних конструкційних розрахунків і інженерного моделювання турбіни ТКР з врахуванням ливарних геометричних параметрів;
 - комплексний універсальний метод проведення розрахунків і інженерного аналізу турбіни ТКР з врахуванням ливарних технологічних факторів; комплексний універсальний метод проведення конструкційних, ливарних технологічних розрахунків інженерного моделювання і аналізу моделі турбіни ТКР, що виплавляється.
7. Наукова методологія вдосконалення технологій ливарного виробництва деталей ДВЗ, ефективність розробки і вживання новітніх технологій, пов'язана з практичним завданням підвищення рівня технічної досконалості ДВЗ і їх вузлів, теоретичними і практичними аспектами життєвого циклу литих деталей ДВЗ і застосуванням інноваційної схеми розвитку конструкцій і технологій.
8. Концептуальні принципи практичного застосування комп'ютерно-інтегрованих систем CAD/CAE, CALS, PDM, «електронне віртуальне підприємство» пов'язані з науковою методологією конструкторсько-

технологічного проектування, виробництва, експлуатації литих деталей і ДВЗ в цілому та впроваджені в практику двигунобудування на провідних підприємствах України і підготовку фахівців у НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Акимов О.В. Кибернетические методы управления качеством в литейном производстве / О.В. Акимов, А.А. Гудзенко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ, — 1998. — Вып. 9. — С.69—71.

Здобувачем розроблена загальна концепція комп'ютерно-інтегрованих методів керування якістю в ливарному виробництві.

2. Акимов О.В. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВЗ. (Часть 1. Рабочие характеристики.) / О.В.Акимов, В.А. Петросянц, В.А. Солошенко //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ, — 1999. — Вып.30.— С. 48—51.

Здобувачем розроблена загальна методологія управління якістю відливок малорозмірних коліс турбін турбокомпресорів для наддуву ДВЗ.

3. Акимов О.В. Проблемы обеспечения качества отливок малоразмерных колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВЗ. (Часть 2. Прочностные характеристики.) / О.В.Акимов, В.А. Петросянц, В.А. Солошенко //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ, — 1999. — Вып. 46.— С. 46—50.

Здобувачем визначені контрольовані міцнісні характеристики відливок малорозмірних коліс турбін турбокомпресорів для наддуву ДВЗ і методи їх інженерного моделювання.

4. Акимов О.В. Анализ собственных колебаний отливки блок-картера дизеля «СМД» /О.В.Акимов, Ю.П. Анацкий, В.А. Солошенко //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ, — 1999. — Вып.66. — С.40—47.

Здобувачем розроблена загальна методологія аналізу власних коливань відливання блоку-картера дизеля «СМД».

5. Акимов О.В. Компьютерное моделирование фазового перехода и остывания отливки блок-картера двигателя СМД. /О.В. Акимов //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ, — 1999. — Вып.75. — С.65—73

6. Акимов О.В. Анализ погрешностей формообразования отливок колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВЗ на этапе изготовления их восковых моделей. /О.В. Акимов, В.А. Солошенко //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.-Харьков: ХГПУ,—2000.—Вып.77.—С.31—34.

Здобувачем розроблена загальна концепція аналізу погрешностей формоворення відливок коліс турбін турбокомпресорів для наддуву ДВЗ.

7. Акимов О.В. Анализ статического нагружения блок-картера дизеля «СМД—18» /О.В.Акимов, В.А.Солошенко //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.-Харьков:ХГПУ, — 2000.—Вып.100.—С. 3—6.

Здобувачем розроблена методологія інженерного моделювання і аналізу статичного вантаження блоку-картера дизеля «СМД-18»)

8. Акимов О.В. Система управления качеством отливок в структуре автоматизации предприятия. /О.В.Акимов //Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Харків: ХГПУ, — 2000. — Вып.83. — С. 31—34
9. Акимов О.В. Компьютерное моделирование остаточных напряжений в отливке блок-картера дизеля “СМД”. / О.В. Акимов, В.А.Солошенко //Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков: ХГПУ, — 2000. — Вып.117. — С.34—36.

Здобувачем розроблена методологія інженерного моделювання залишкової напруги у відливках блоку-картера дизеля “СМД”.

- 10.Акимов О.В. Анализ погрешностей формообразования отливок колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВЗ на этапе изготовления их восковых моделей /О.В.Акимов //Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків,— 2003. — №3(3). — С.16—24.
- 11.Акимов О.В. Обобщенные тенденции и опыт применения алгоритмических подходов к управлению качеством машиностроительных изделий / О.В.Акимов //Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків,—2003.—№ 5(5). —С.4—9.
- 12.Акимов О.В.. Современные системы автоматизированного проектирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства /О.В.Акимов //Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків, — 2004. — № 6(12). — С. 21—36.
- 13..Акимов О.В. Обзор программного обеспечения для управления качеством в литейном производстве / Акимов О.В. // Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків, — 2004. — № 7(1). — С. 15—22.
14. Акимов О.В. Уточненный расчет деформаций подшипников качения при индукционно-тепловой сборке подшипниковых узлов / М.К.Кравцов, О.В.Акимов, В.Т.Акимов //Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків, — 2005. — № 5/2 (17). — С. 52—57.

Здобувачем розроблена методологія інженерного моделювання деформацій підшипників кочення при індукційно-тепловій збірці підшипникових вузлів.

- 15.Акимов О.В. Компьютерно-интегрированное ресурсное проектирование литых деталей ДВЗ / О.В.Акимов, А.П.Марченко // Ползуновский вестник. — Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. Ползунова.- 2007. — Вып.4. — С.13—17.

Здобувачем розроблені наукові основи комп'ютерно-інтегрованого проектування литих деталей ДВЗ.

- 16.Акимов О.В. К оценке экономически оптимального срока службы машин (узлов) / В.Т. Акимов, О.В. Акимов //Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків, — 2008. — №3/1 (33). — С. 50— 52

Здобувачем розроблена наукова методологія оцінки економічно оптимального терміну служби машин (вузлів).

- 17.Акимов О.В. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в блоке цилиндров DAEWOO SENS \В.И.Алехин, О.В.Акимов А.П.Марченко //Вісник Національного технічного університету «ХПІ».- Харків:

НТУ «ХПІ», — 2008. — Вип.2. — С.3—7.

Здобувачем розроблена загальна методологія комп'ютерно-інтегрованого моделювання ливарних процесів.

- 18.Акимов О.В. Применение методов компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования к литым деталям ДВЗ по критерию эксплуатационных характеристик на примере колеса турбины турбокомпрессора /О.В.Акимов, В.А.Солошенко, А.П. Марченко, В.А. Петросянц //Вісник Національного технічного університету «ХПІ».- Харків: НТУ «ХПІ», — 2008. — Вип.9. — С.3—15.

Здобувачем розроблена загальна методологія комп'ютерно-інтегрованого ресурсного проектування литих деталей ДВЗ.

- 19.Акимов О.В. Научные методы модернизации технологии изготовления отливок блок-картера цилиндров DAEWOO SENS /В.И.Алехин, О.В.Акимов, А.П.Марченко, А.А.Ребик //Вісник Національного технічного університету «ХПІ».- Харків: НТУ «ХПІ», — 2008.— Вип. 14. — С.3—7.

Здобувачем розроблені наукові методи модернізації технології виготовлення відливів блоку-картерів ДВЗ.

- 20.Акимов О.В. Научные основы и методы компьютерно-интегрированного ресурсного проектирования литых деталей блок-картера ДВЗ /О.В.Акимов //Двигатели внутреннего сгорания.- Харьков: НТУ «ХПИ», — 2008. — №1. — С. 120—124.

- 21.Акимов О.В. Научные методы компьютерно-интегрированного проектирования блок-картера двигателя DAEWOO SENS /В.И.Алехин, О.В.Акимов, А.П.Марченко //Двигатели внутреннего сгорания.- Харьков: НТУ «ХПИ», — 2008. — №2. — С. 77—82.

Здобувачем розроблені наукові методи комп'ютерно-інтегрованого проектування відливів блоку-картерів ДВЗ.

- 22.Акимов О.В. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование материалов для блок-картера ДВЗ /О.В.Акимов, А.П.Марченко //Східно-Європейський журнал передових технологій.- Харків,—2008.—№5/1(35)— С. 52—57.

Здобувачем розроблена наукова методологія експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання матеріалів для блоку-картера ДВЗ.

- 23.Пат. 77767 Україна, МПК(2006) B22F 3/26, B22C 9/00, B22F 3/12, B22F 3/24, Спосіб виготовлення порожнистих прес-форм методом лазерного порошкового спікання / Чернишов С.І., Вітязев Ю.Б., Таран Б.П., Акімов О.В. СадовниченкоЄ.О., Триньова Т.Л.; заявник та патентовласник ЗАТ «Конструкторсько-технологічне бюро верифікаційного моделювання і підготовки виробництва». — № 20041007994; заявл. 04.10.04; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1.

Здобувачем розроблена наукова методологія інженерного моделювання порожнистих прес-форм для подальшого виготовлення методом лазерного порошкового спікання.

- 24.Акимов О.В. Двухуровневые сети принятия решений и управления качеством отливок в литейном производстве / О.В. Акимов, М.Н. Литвиненко, Г.В. Ткаченко //Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье: междунар. науч.-техн. конф., 3-5 мая 1994г.: тезисы докл.—Харьков, 1994г.—Ч.1.—С. 128—129.

Здобувачем розроблена загальна методологія побудови і функціонування дворівневих мереж керування якістю.

- 25.Акимов О.В. Некоторые аспекты управления качеством отливок при помощи ЭВМ /О.В.Акимов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: междунар. науч.-техн. конф, 12-14 мая 1997г.: труды. — Харьков, 1997г. — С.147—148.
- 26.Акимов О.В. Некоторые аспекты создания интегрированных компьютерных систем управления качеством в литейном производстве /О.В.Акимов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: сб. научн. тр. ХГПУ.— Харьков, 1998 г. — С.479—484.
- 27.Акимов О.В. Тенденции развития и применения автоматизированных компьютерных систем для проектирования и обеспечения качества литейных изделий /О.В.Акимов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Зб. наук. праць ХДПУ.— Харьков, 1999.—Вип.7, у 4 частинах.— Ч.2.—С. 4—9.
- 28.Акимов О.В. Современный САПР в литейном производстве / О.В.Акимов //Металлообработка. Оборудование. Инструмент для профессионалов. — Київ, 2006. — № 1(73).— С. 32—35.

АНОТАЦІЇ

Акімов О. В. Наукові основи конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Дисертацію присвячено розробці наукових основ конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ на базі використання сучасних експериментальних методів, комп'ютерно-інтегрованого інструментарію і методик ресурсного проектування для створення литих деталей, що забезпечують задані експлуатаційні характеристики, ресурс, зниження собівартості, часу проектування і запуску у виробництво, підвищення конкурентоспроможності і надійності двигунів внутрішнього згоряння. Запропоновано науково підтверджені і всесторонньо досліджені принципово нові рішення і концептуальні підходи для литих деталей ДВЗ, що відрізняються від раніше використовуваних, наявністю безперервного зв'язку і обміном даними між процесами конструкторського і технологічного проектування.

Розроблено заходи щодо модернізації конструкцій литих деталей ДВЗ з врахуванням 3-х мірного розподілу залишкової ливарної напруги, неоднорідності механічних властивостей сплаву в різних перетинах виливка, універсальні методи проведення конструкційних розрахунків блоку-картера циліндрів ДВЗ з врахуванням динамічних, статичних, монтажних навантажень і напрямів залишкової ливарної напруги.

Ключові слова: проектування, конструювання, виробництво двигунів; комп'ютерно-інтегроване проектування; розробка деталей двигунів; міцність, надійність та ресурс двигунів.

Акимов О. В. Научные основы конструкторско-технологического проектирования литых деталей ДВС.- Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 - двигатели и энергетические установки. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2009.

Диссертация посвящена разработке научных основ конструкторско-технологического проектирования литых деталей ДВС на базе использования современных экспериментальных методов, компьютерно-интегрированного инструментария и методик ресурсного проектирования для создания литых деталей, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики, ресурс, снижение себестоимости, времени проектирования и запуска в производство, повышение конкурентоспособности и надежности двигателей внутреннего сгорания.

В диссертации для литых деталей ДВС были предложены научно подтвержденные и всесторонне исследованные принципиально новые решения и концептуальные подходы, отличающиеся от ранее используемых, наличием непрерывной связи и обменом данными между процессами конструкторского и технологического проектирования. Созданы и подтверждены усовершенствованные математические модели, а также системы ограничений, динамические начальные и граничные условия для представителей литых деталей ДВС и их выплавляемых моделей. Предложены и подтверждены существенные уточнения математических моделей, систем ограничений, динамических начальных и граничных условий для представителей литых деталей ДВС с учетом особенностей их технологического производства.

Разработана и исследована научная концепция снижения ресурсных затрат при проектировании, доводке, изготовлении и повышению ресурса при эксплуатации литых деталей ДВС. Практически реализован концептуальный подход применения компьютерно-интегрированных систем как инструментария для конструкторско-технологического проектирования литых деталей ДВС. Разработана и теоретически исследована методика комплексного подхода к динамическому анализу влияния факторов технологического процесса изготовления литых деталей ДВС на рабочие характеристики двигателя.

Предложена и практически связана научная методология совершенствования технологий литейного производства деталей ДВС с практической задачей повышения уровня технического совершенства ДВС и их узлов, теоретическими и практическими аспектами жизненного цикла литых деталей ДВС и применением инновационной схемы развития конструкций и технологий.

Разработанные методы конструирования литых деталей ДВС с учетом 3-х мерного распределения остаточных литейных напряжений, неоднородности механических свойств сплава в сечениях отливки, универсальные методы проведения конструкторских расчетов блок-картера цилиндров ДВС были внедрены в КП ХКБД, ОАО «Купянский литейный завод», ООО «Украинская литейная компания».

Универсальный метод проведения конструкторских расчетов блок-картера цилиндров ДВС с учетом динамических, статических нагрузок и литейных геометрических параметров применяется в настоящее время НТУ «ХПИ» и ООО

«Украинская литейная компания» (АО УПЭК) при подготовке производства отечественного двигателя для DAEWOO SENS 1,4л.

Универсальный численно аналитический метод динамических конструкторских расчетов турбины ТКР с учетом литейных геометрических параметров отливок, комплексный универсальный метод проведения литейных технологических расчетов турбины ТКР, комплексный универсальный метод проведения конструкторских и литейных технологических расчетов выплавляемой модели турбины ТКР были внедрены в ЗАО «Турбо-Веста» и использованы при проектировании всего модельного ряда ТКР.

Материалы диссертационных исследований внедрены в учебный процесс НТУ «ХПИ». Использование в методической работе научных результатов, полученных в диссертации, позволило в 2005 году открыть в НТУ «ХПИ» учебную подготовку по новой специальности 7.092.502 «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологические процессы и производства».

Ключевые слова: проектирование, конструирование, производство двигателей; компьютерно-интегрированное проектирование; разработка деталей двигателей; прочность, надежность и ресурс двигателей.

Akimov O. V. Scientific fundamentals design-engineering planning of the casting details of engines.- Manuscript.

The dissertation for presenting doctors degree in technical sciences of specialty 05.05.03 - engines and power plants. - National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, 2009.

Dissertation is devoted to development of scientific bases design-engineering planning of the casting details of engines on the base of the use of modern experimental methods, computer-integrated tools and methods of the resource planning for creation of the casting details, which provides the set operating descriptions, resource, decline of prime price, time of planning and start, in a production, increase of competitiveness and reliability of engines of internal combustion. The scientifically confirmed is offered and new decisions and conceptual approaches are comprehensively investigational on principle for the casting details of engines which differs from early in-use, by the presence of continuous connection and exchange of data between the processes of the designer and technological planning.

Measures are developed on modernization of constructions of the casting details of engines taking into account 3th the measured distributing of remaining casting tension, heterogeneity of mechanical properties of alloy, in the different crossings of founding, universal methods of lead through of construction calculations of block-crankcase of cylinders of engines taking into account the dynamic, static, assembling loadings and directions of remaining casting tension.

Keywords: planning, constructing, production of engines; computer-integrated planning; development of details of engines; durability, reliability and resource of engines.

ДЛЯ НОТАТОК

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Дьомін Д.О.

Підп. до друку 02.10.09 Формат видання 148x210
Формат паперу 60x84/16. Папір Captain. Друк – ризографія.
Обсяг 1,7 авт. арк. Наклад 100 прим. Зам. № 97