

УДК 539.3

Л. В. Автономова, В. І. Конохов, С. О. Назаренко

АНАЛІЗ СТАТИКО-ДИНАМІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ ДВИГУНІВ

Розглянуто метод чисельного аналізу статико-динамічного стану елементів турбокомпресорів двигунів. Наведено характерні картини розподілу інтенсивності напружень у полі відцентрових сил та інтенсивності напружень на власних формах коливань для коліс турбін.

Постановка проблеми. Газотурбінний наддув є найбільш ефективним засобом підвищення потужності, поліпшення паливної економічності і екологічної чистоти дизелів [1]. Для форсування двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) шляхом наддува на двигуні встановлюють турбокомпресор (ТКР) – компактний агрегат, котрий складається з турбіни, яка утилізує остаточну енергію відпрацьованих у циліндрах ДВЗ газів, і компресора, який використовує цю енергію для примусового нагнітання повітря в циліндри двигуна з попереднім охолодженням або без нього. Встановлення ТКР без суттєвих змін в конструкції двигуна дозволяє підвищити його потужність на 50 – 100 %, а питому паливну економічність на 5 – 10 г/кВт·год. Вага ТКР складає до 5 % від ваги ДВЗ, вартість – близько 10 %. Агрегат являє собою поєднання двох лопаткових машин, зв'язаних між собою і циліндрами дизеля загальним робочим тілом, суперечливими вимогами (критеріями) та набором динамічних, міцностних, екологічних, технологічних і економічних обмежень. Якщо на початковому етапі застосування ТКР головним критерієм якості було підвищення потужності, то нині такими критеріями є паливна економічність, прийомистість і екологічна чистота двигуна. Прагнення до якомога повного використання енергії вихлопних газів, підвищення економічності, застосування турбонаддування у автомобільних двигунах (в тому числі карбюраторних), які працюють в широкому діапазоні режимів, призвело до істотного підвищення динамічної, температурної і статичної навантаженості робочих коліс ТКР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений авторами докладний аналіз сучасної наукової літератури свідчить про те, що можливості класичних методів, які базуються на розв'язуванні системи рівнянь у частинних похідних крайових задач математичної фізики, дуже обмежені.

Метою статті є розроблення на єдиній методологічній основі взаємозв'язаної математичної моделі, яка дозволить описати статичний та динамічний стани елементів ТКР на базі методу скінченних елементів (МСЕ).

Виклад основного матеріалу. Сучасні машини створюють як комбінацію багатьох взаємодіючих між собою і з зовнішнім середовищем конструктивних елементів, яку описує досить складна математична модель. Задачу аналізу характеристик якості двигунів $J = J(u, y)$ описує в загальному вигляді вираз

$$A(y, u, t) = 0, \quad (1)$$

де A – рівняння стану в операторній формі, які характеризують математичні зв'язки між заданими u та визначаємими y фізичними величинами, структура і параметри яких залежать від типу досліджуємого явища, складу системи, граничних умов, навантажень і умов сполучення; y – вектор (функція) змінних стану (переміщення, температури і т. д.), що утворюють простір рішень; u – вектор (функція) параметрів конструкції, що варіюють та визначають (характеристики фізико-механічних властивостей матеріалів, геометричні розміри тощо); t – час.

Повна модель ТКР зв'язана з розв'язуванням задач термогазодинаміки, міцності та коливань. Математична модель ДВЗ з газотурбінним наддуванням заснована на термодинамічному методі розрахунку, згідно з яким проточна частина двигуна поділена на зони: компресора ТКР, впускного колектора, циліндрів двигуна, впускного колектора, турбіни ТКР, які, у свою чергу, складаються з елементів нижчого рівня. Зміна параметрів стану робочого тіла (тиску, температури і об'єму робочого тіла) за часом в кожній із зон обчислюється з системи диференціальних рівнянь, які описують загальні закони збереження маси, енергії та кількості руху (або рівняння стану) і доповнюються емпіричними співвідношеннями для коефіцієнтів.

Так, при сталому режимі (основному робочому), який устанавлюється при досить тривалому

прогріві після включення і сталій зовнішній температурі, для елементів ТКР найбільш актуальною є квазістатична задача термопружності. Таку задачу можна розглядати як стаціонарну ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$).

Відповідно до гіпотези Дюамеля–Неймана узагальнені рівняння стану прийнято у вигляді тензорно-лінійних співвідношень:

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl}\sigma_{kl} + \alpha_{ij}T, \quad (2)$$

де A_{ijkl} , α_{ij} – компоненти тензорів, якими визначаються властивості деформування та температурного розширення матеріалу; T – поле температур, компоненти якого залежать від вектора просторових координат точок тіла та відповідають крайовим умовам.

Більшість конструкційних матеріалів можна розглядати як кусково-однорідні із різними фізико-механічними властивостями в межах однорідних областей. Останні можуть відповідати ізотропним або анізотропним матеріалам. У межах пружного деформування співвідношення (2) задовольняють узагальненому закону Гука.

Для пружно-пластичного деформування ці співвідношення у формі змінних параметрів пружності відповідають теорії малих пружно-пластичних деформацій Ілюшина і компоненти тензора A_{ijkl} визначаються за формулою:

$$A_{ijkl} = \frac{1}{E_*} [(1 + \nu_*)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu_*\delta_{ij}\delta_{kl}], \quad (3)$$

де E_* , ν_* – змінні параметри пружності, що зв'язані за діаграмою деформування матеріалу.

Крайова задача може бути зведена до варіаційної форми за допомогою множення рівняння (1) на довільний віртуальний Z із простору Z гладких “узагальнених” переміщень, що задовольняють крайовим умовам, і подальшого інтегрування за об'ємом тіла.

Варіаційні методи призводять до матричної алгебраїчної проблеми і стають зручною основою для побудови теоретично обґрунтованих розрахункових схем. Задачі теорії поля зводяться до системи рівнянь, аналогічної співвідношенням МСЕ для задач механіки деформованого твердого тіла, що є найбільш універсальним методом розрахунку [2, 3].

Після декомпозиції, суть якої у поділі системи (моделі) на підсистеми (подмоделі) зі збереженням структур і приналежності одних елементів і підсистем іншим, задачу комплексного аналізу можна розбити на такі етапи:

– задача теплопровідності $\Lambda \vec{T} = \vec{Q}$, де Λ – матриця теплопровідності, \vec{Q} – вектор узагальненого теплового навантаження;

– задача термопружності $K_{yy} \vec{y}_t = \vec{F}_t$, де \vec{y}_t – узагальнений вектор термопружних переміщень;

– задача аналізу резонансного стану колеса турбіни в полі відцентрових сил і теплових навантажень

$$K(\vec{u})\vec{y}_s = \vec{F}(\vec{u}), \quad [K + G(\vec{y}_s) - \lambda M] \vec{y}_d = 0, \quad (4)$$

де K – матриця жорсткості; M – матриця мас; \vec{F} – вектор відцентрових сил і теплових навантажень; $G(\vec{y}_s, \vec{u})$ – матриця геометричної жорсткості (зведених початкових напружень σ_{kl}), сформована на розв'язуванні \vec{y}_s статичної задачі; λ – квадрат власної частоти; \vec{y}_d – власна форма коливань.

Тепловий аналіз при перехідних режимах може бути і нелінійним, тоді як розрахунок напружень може виконуватися в лінійній постановці. Температурне навантаження має двояку дію: спричинює додаткові статичні напруження, зв'язані з градієнтом температур, і призводить до змін фізико-механічних характеристик матеріалу. Спільний розв'язок задач теплофізики і механіки дозволяє економити час, наприклад, за рахунок генерації єдиної сітки скінченних елементів (СЕ) та більш точно задавати навантаження.

У розв'язанні задачі комплексного аналізу були реалізовані алгоритми циклічної симетрії, що дає можливість при розгляданні сектору колеса відтворювати напружено-деформований стан (НДС) всього робочого колеса. Було з'ясовано, що температурні напруження для колеса турбіни ТКР-8.5-ТВ складають приблизно 5 – 7 % напружень від відцентрових сил. Основною розрахунковою моделлю аналізу НДС робочих коліс ТКР у полі відцентрових сил була прийнята модель сектору колеса як елемента на основі двадцятивузлових ізопараметричних СЕ, яка складається з однієї або двох

(двохярусні компресори) лопаток і відповідної частини маточини, а для турбін – ще й дільниці вала. На рисунку наведено характерні картини розподілу інтенсивності напружень σ_i .

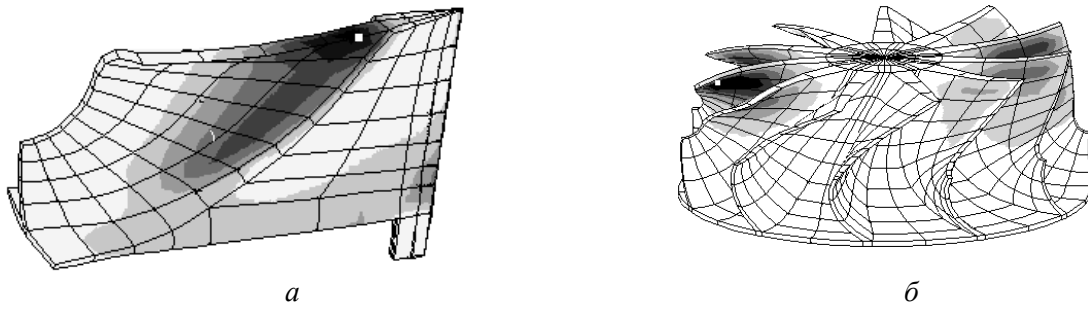


Рис. Характерні картини розподілу інтенсивності напружень σ_i : *a* – для коліс турбін у полі відцентрових сил; *б* – для турбін на першій власній формі коливань

Висновки. На базі універсального МСЕ розглянуто на єдиній методологічній основі підхід до аналізу статичної та динамічної поведінки елементів ТКР. Проаналізовано термонапружений стан коліс турбін, розподіл інтенсивності напружень у полі відцентрових сил та інтенсивності напружень на власних формах коливань коліс турбін, що дозволяє проводити перевірку надійності роботи ТКР на етапах життєвого циклу двигуна.

Список використаних джерел

1. Двигуни внутрішнього згоряння : сер. підруч. у 6 т. Т. 1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. / за ред. А. П. Марченка, А. Ф. Шеховцова – Х. : Вид. центр НТУ “ХПІ”, 2004.
2. Механіка зв'язаних полів в елементах конструкцій : в 5 т. / под общ. ред. А. Н. Гузя. – К. : Наук. думка, 1987–1989.
3. Назаренко С. А. Анализ чувствительности конструкций при воздействии физических полей различной природы / С. А. Назаренко // Вестн. НТУ “ХПИ”. – 2006. – № 32. – С. 119–122.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2009 р.