

УДК 539.3

О. М. Склепус, М. Г. Склепус

МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛОВИХ МАШИН ТА ПРИЛАДІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ПОВЗКОСТІ

Наведено огляд моделей елементів теплових машин та приладів, що працюють в умовах повзкості.

Постановка проблеми. Напруження і деформації, що виникають при навантажуванні деталей, змінюються з часом, навіть якщо навантаження залишаються постійними. Це явище називається повзкістю матеріалу. Один бік цього явища – зростання з часом деформацій – називається безпосередньо повзкістю, а другий – зменшення з часом напружень – релаксацією.

Високі температури, корозія, значні експлуатаційні тиски і навантаження – це умови, за яких актуальним стає врахування повзкості матеріалу конструкцій. За наявності повзкості міцність залежатиме від часового фактора. Повзкість призводить до поступового збільшення деформацій і перерозподілу напружень у конструкціях. З часом у найбільш навантажених місцях конструкцій виникають значні деформації, котрі спричиняють пошкоджуваність матеріалу, послаблення рознімних (різбових) і нерознімних (зварювальних, паяних, заклепкових) з'єднань, викликають руйнування конструкцій. Зазначені фактори значно впливають на надійність конструкції, і тому їх необхідно враховувати у процесі проектування.

З викладеного випливає, що особливістю розрахунків на повзкість є врахування фактора часу, що звичайно не береться до уваги в розрахунках методами опору матеріалів, теорії пружності або пластичності.

Аналіз публікацій. Основні фундаментальні роботи з розрахунку деталей машин на повзкість опубліковано в середині ХХ ст. у працях Ю. М. Работнова [1], Л. М. Качанова [2], Н. Н. Малініна [3, 4] та інших. Разом з тим розвиток галузей сучасного машинобудування висуває нові проблеми розрахунку щодо повзкості конструкцій машин [5 – 9].

Мета статті – розглянути моделі елементів теплових машин та приладів, які працюють в умовах повзкості.

Основна частина. Питання про необхідність урахування у процесі проектування повзкості вирішується залежно від матеріалу, температури нагрівання і ступеня напруженості конструкцій.

Для сталевих і чавунних деталей явище повзкості є суттєвим за температури понад 300 °С, до того ж з підвищенням температури процес повзкості відбувається інтенсивніше. Однак для низки матеріалів, як наприклад, для металів з низькою температурою топлення (свинець, алюміній, дуралюміній та ін.), а також високополімерних матеріалів (гума, пластмаси тощо) явище повзкості вельми помітно й при кімнатній температурі.

Зазвичай повзкість враховується при розрахунках і конструюванні деталей машин, що перебувають в експлуатації довгий термін у нагрітому стані. У таких умовах працюють, наприклад, елементи конструкцій парових і газових турбін, реактивних двигунів, теплообмінних апаратів, вузли обладнання нафтової промисловості, деталі хімічних апаратів та теплових приладів.

Турбінні установки. Бажання позбавитися недоліків двигунів внутрішнього згоряння дало поштовх до створення газотурбінних установок (ГТУ). Газотурбінна установка – це тепла машина, в якій робочим тілом є продукти згоряння рідкого або газоподібного палива, а двигуном є турбіна, яка обертається на валу під дією струменя газу. Газові турбіни дедалі частіше застосовують як стаціонарні двигуни силових установок і електростанцій. Використання газових турбін, зокрема, як основного елемента авіаційних реактивних двигунів, дало змогу досягти значних швидкості і висоти польоту, а також збільшення вантажопідйомності літаків.

Сучасні газові турбіни в основному працюють на рідкому паливі. З успіхом використовується газоподібне паливо – природний або штучний газ. Як робоче тіло можна застосовувати суміш подрібненого твердого палива. У двигунах, що працюють за замкненим циклом, застосовуються повітря, гелій, азот, вуглекислий газ. У подібних установках для нагрівання робочого тіла використовуються спеціальні котли із зовнішньою топкою, в якій можна спалювати будь-яке паливо. Робочим тілом для парових турбін, як правило, є водяна пара.

За компактністю й економічністю газові турбіни переважають сучасні двигуни внутрішнього згоряння. Ефективність газової турбіни перш за все залежить від температури робочого газу. Якщо при температурі газу 550 – 600 °С ефективний ККД ГТУ становить лише 20 – 22 %, то з підвищенням температури до 900 – 1000 °С він досягає 32 – 35 %, а при температурі, вищій 1300 °С, – понад 50 %.

Підвищення початкової температури газу перед турбіною досягають завдяки використанню жароміцних матеріалів та ефективному охолодженню деталей турбін.

Явище повзкості металів якраз і зацікавило техніків на початку ХХ ст. через те, що повзкість спостерігалася в деталях парових турбін – корпусі, трубопроводах, міжdiskових діафрагмах, дисках і лопатках, що працюють за високих температур. У диску і лопатках виникають напруження від відцентрових сил, які не можна зменшити за рахунок збільшення товщини або зміни форми профілю. Повільне зростання деформацій повзкості внаслідок дії цих напружень може порушити нормальну роботу машин, викликати ослаблення посадки диска на вал, зачіпання робочих лопаток за корпус турбіни. Стала очевидною необхідність оцінювати здатність матеріалів опиратися повзкості. У наш час дослідження повзкості набули актуальності.

Робочі лопатки осевих турбомашин при повзкості розраховують на розтяг і згин. Математичною моделлю лопаток може бути прямий або криволінійний брус, балка прямокутного профілю перерізу, скручений кривий стрижень, пластина або оболонка тонкостінних профілів.

У процесі проектування корпус турбіни розглядається як тонкостінна циліндрична оболонка, що перебуває під дією внутрішнього тиску. Для тонкостінного циліндра може бути враховано затиснення торців.

Діафрагми турбіни (рис. 1) є рознімними. Верхні половини їх установлені у кришці корпусу, а нижні – у корпусі турбіни. У розрахунках діафрагму вважають напівкільцевою пластиною, обертою по зовнішньому контуру і навантаженою рівномірним тиском. Таким шляхом проектується тіло діафрагми, але відомо, що небезпечними місцями в цих конструкціях є зони зварення лопаток з тілом і ободом, і врахування цього факту потребує окремих досліджень. Напрямні лопатки діафрагми можуть розраховуватися тими ж самими методами, що й робочі лопатки машини.

Для турбінних установок активного типу важливою задачею є визначення профілю обертового диска за заданим законом зміни напружень і деформації по радіусу диску. У результаті знаходиться форма диска рівного опору повзкості.

Особливістю конструкції турбінних установок реактивного типу (рис. 2) є те, що робочі лопатки

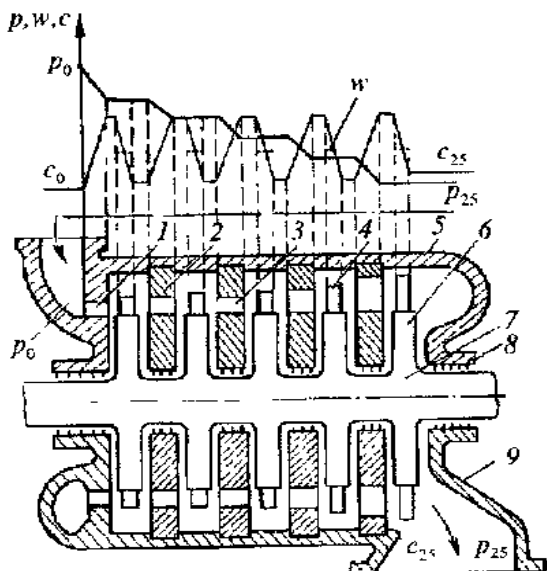


Рис. 1. Схема багатоступінчастої активної турбіни зі ступенями тиску:

- 1, 3 – соплові лопатки відповідно першого і третього ступенів;
- 2 – діафрагма;
- 4 – робочі лопатки;
- 5 – кришка корпусу;
- 6 – диск;
- 7 – вал;
- 8 – кінцеве ущільнення;
- 9 – корпус турбіни

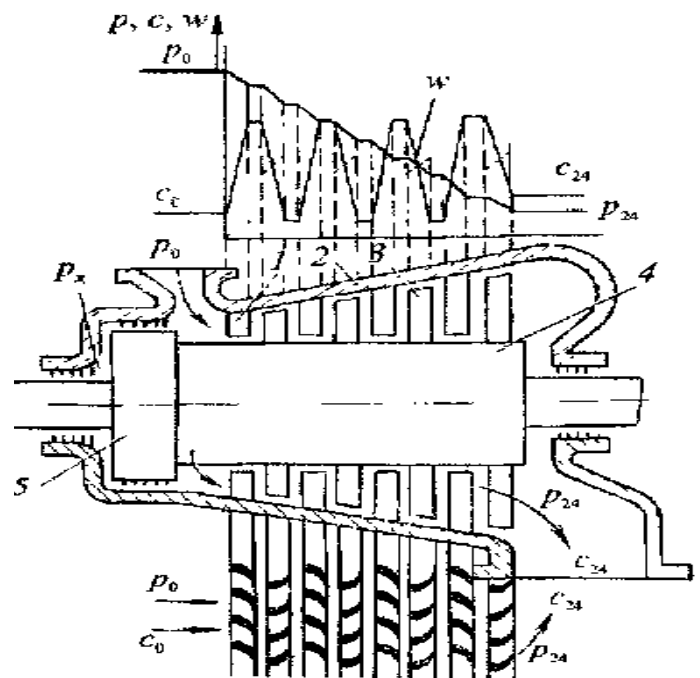


Рис. 2. Схема багатоступінчастої реактивної турбіни зі ступенями тиску:

- 1 – соплові лопатки;
- 2 – корпус;
- 3 – робочі лопатки;
- 4 – ротор;
- 5 – поршень думіса

ступенів у них закріплюються на роторі барабанного типу. У зв'язку з наявністю на робочих лопатках перепаду тиску на ротор діє значна осьова сила. У дослідженнях повзкості ротор розглядається як пустотілий товстостінний циліндр, що навантажений зовнішнім тиском, відцентровими силами, які передаються з робочих лопаток, та осьовою навантагою.

Теплообмінні апарати. Теплова енергія, отримана в будь-якому джерелі енергії (наприклад, в ядерному реакторі) йде на нагрівання робочого тіла й отримання пари, котра надає обертового руху паровій турбіні та зв'язаному з нею електричному генератору. Такий енергетичний цикл перетворення теплової енергії в електричну неможливий без неперервного підведення теплоти від джерела енергії до приймача. Передача теплоти може відбуватися безпосередньо робочим тілом, але частіше – у теплообмінних апаратах за допомогою нагрівного і нагріваного теплоносіїв.

Як теплоносії в теплообмінниках найчастіше використовують водяну пару, гарячу воду, повітря, димові гази, розтоплені метали.

Залежно від способу передачі теплоти та конструкції теплообмінні апарати поділяються на контактні (змішувальні) та поверхневі, які бувають регенеративними та рекуперативними (рис. 3).

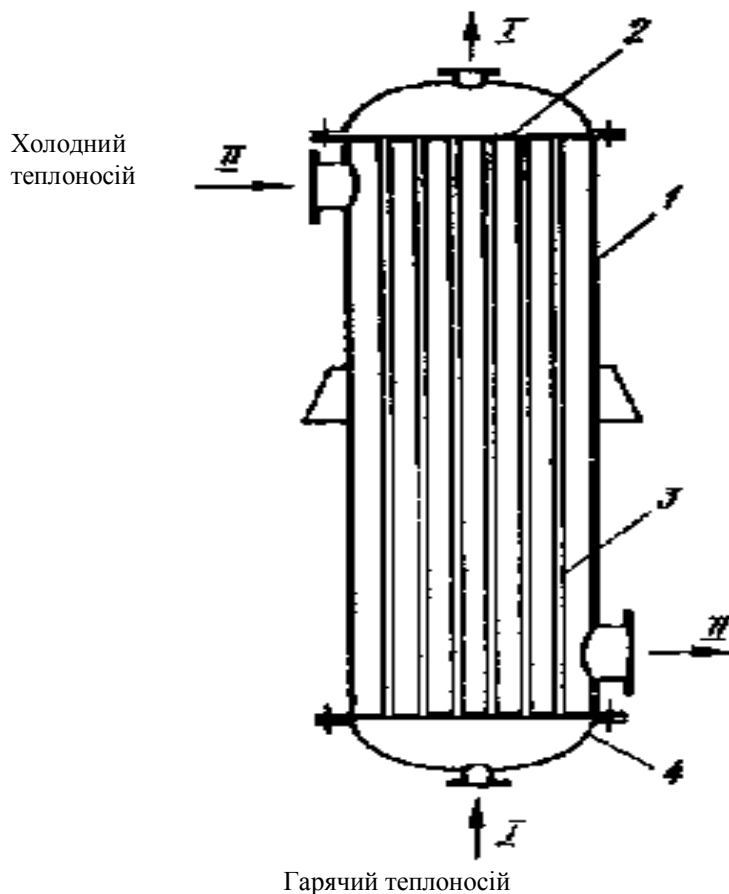


Рис. 3. Схема трубчастого рекуперативного теплообмінника

У рекуперативних апаратах теплота від гарячого теплоносія передається холодному неперервно, через роздільну стінку (наприклад, парові котли, підігрівачі конденсатори тощо). Схему трубчастого рекуперативного теплообмінника наведено на рис. 3. Теплообмінник складається з пучка труб 3, кінці яких закріплені у спеціальних трубних решітках 2. Пучок труб розташований всередині спільного кожуха 1, закритого днищами 4. При цьому один теплоносієй (I) рухається по трубах, а інший (II) – у просторі між кожухом і трубами (міжтрубному просторі).

Теплообмінні апарати повинні забезпечувати найбільш ефективний процес теплопередачі при мінімальній вазі конструкції і прийнятному гідравлічному опорі тракту, а також високу надійність у процесі тривалої експлуатації.

Експлуатаційна надійність досягається абсолютною герметичністю конструкції для запобігання змішанню теплоносіїв у першому і другому контурах. Це пов'язано з наведеною γ -активністю, яку отримує теплоносієй першого контуру під час проходження через реактор у результаті дії потоку нейтронів. Крім того, при порушенні

щільності покриттів тепловидільних елементів реактора теплоносієй першого контуру може заряджатися осколками ділення ядерного палива.

Саме собою зрозуміло, що матеріали теплообмінних апаратів повинні задовольняти вимогам сумісності з теплоносієями і мати гарну зварюваність, високу теплопровідність і достатню міцність.

Розглянемо математичні моделі, що використовуються у процесі проектування основних елементів конструкцій теплообмінних апаратів. При експлуатації теплообмінних апаратів на більшість їхніх елементів діє рівномірний внутрішній або зовнішній тиск. Корпус теплообмінника розраховується як

круговий циліндричний елемент під дією внутрішнього тиску. У дослідженнях треба враховувати наявність перфорації стінок корпуса та можливе послаблення конструкції за рахунок зварювання.

Днища апарата мають опуклу еліптичну або пласку форму, на них діє внутрішній тиск одного з теплоносіїв. Для збільшення опору повзкості днища можуть підсилюватися ребрами жорсткості.

Розрахунки трубних дощок можна виконувати, як для суцільних пластин. При цьому товщина трубної дошки встановлювалася за значенням умовної товщини суцільної пластини.

Міцність деталей, що тривало працюють за високої температури, може визначатися величиною гранично-допустимих за конструктивними умовами деформацій повзкості, наприклад, у роторах парових і газових турбін. Сучасні жароміцні сталі руйнуються з малим подовженням. У реальних конструкціях зазвичай можна допустити лише незначні деформації повзкості (порядку 1 %).

В інших задачах міцність визначається надійністю деталі протягом заданого терміну служби, наприклад труби котельного агрегата, паропроводи тощо. При цьому за основний параметр надійності беруть довговічність. У процесі визначення часу до руйнування конструкції зручно використовувати гіпотезу Качанова про крихке руйнування внаслідок розвитку пошкоджуваності. Пошкоджуваність характеризується деяким скалярним параметром $0 \leq d \leq 1$, який дорівнює $d = 0$ за відсутності пошкоджуваності та $d = 1$ – у момент крихкого руйнування.

Розрахунки деталей на повзкість базуються на результатах експериментального дослідження повзкості матеріалу при одноосьовому постійному в часі навантаженні. На базі даних експериментів формулюються феноменологічні теорії, що описують макроскопічну поведінку матеріалів. У загальному випадку складного напруженого стану за визначеної температури T пов'язуються між собою швидкості деформацій повзкості \dot{p}_{kl} з напруженнями σ_{kl} і структурними параметрами стану:

$$\dot{p}_{kl} = \lambda \sigma_e \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma_{kl}}, \quad (1)$$

де $\sigma_e = \sigma_e(\sigma_{kl}; T)$ – еквівалентне напруження, за яким встановлюється еквівалентність одноосьового і складного напруженого станів; $\lambda = \lambda(\sigma_{kl}, q_j; T)$ – скалярна функція; q_j ($j = \overline{1, n}$) – структурні параметри стану.

У визначальних співвідношеннях повзкості (1), які враховують пошкоджуваність та зміцнення матеріалу, можна прийняти, що

$$\lambda \sigma_e = \frac{A \sigma_e^n q^m}{(1-d)^\eta},$$

де A, m, n, η – параметри матеріалу; q – параметр зміцнення.

Фізичні співвідношення (1) є нелінійними, і внаслідок цього нелінійною буде крайова задача повзкості. Розв'язання нелінійної задачі повзкості являє собою складну проблему навіть для тіл канонічної форми. Для конструкцій складної геометричної форми переважно застосовують дискретні чисельні методи, зокрема метод кінцевих елементів, метод скінченних різниць та ін.

Сучасний розвиток теорії R-функцій дозволяє проводити розрахунки повзкості деталей складної форми на основі аналітичного подання розв'язків крайових задач у вигляді структурних формул [7–10]. У сполученні з теорією R-функцій ефективно використовуються варіаційний принцип Лагранжа, метод Рітца та метод Рунге-Кутта-Мерсона для інтегрування початкових задач за часом [7–9].

Висновки

Таким чином, розглянуто проблеми дослідження повзкості деталей сучасних машин, зроблено огляд моделей елементів турбінних машин і теплообмінних апаратів, які працюють в умовах повзкості. Наведені моделі можуть досліджуватися за допомогою сучасних методів розв'язання задач повзкості.

Список використаних джерел

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1966. – 752 с.
2. Качанов Л. М. Теория ползучести / Л. М. Качанов. – М. : Физматгиз, 1960. – 390 с.
3. Малинин Н. Н. Обзор отечественных работ по расчетам деталей машин на ползучесть / Н. Н. Малинин // Расчеты на прочность. – 1965. – Вып. 11. – С. 229–278.

4. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 398 с.
5. Murakami S. Progress of Continuum Damage Mechanics / S. Murakami // JSME Int. Journ. – 1987. – Vol. 30. – P. 701–710.
6. Altenbach H. Geometrically nonlinear bending of thin-walled shells and plates under creep-damage conditions / O. Morachkovsky, K. Naumenko, A. Sychov // Archive of Applied Mechanics. – 1997. – 67. – P. 339–352.
7. Золочевский А. А. Вариационно-структурный метод в задачах ползучести / А. А. Золочевский, В. Л. Рвачев, С. Н. Склепус // Мат. методи та фіз.-мех. поля.– 2001.– 44. № 1.– С. 135–138.
8. Склепус С. Н. Вариационно-структурный метод в задачах ползучести пологих оболочек сложной формы / С. Н. Склепус // Доповіді НАН України.– 2001.– № 9.– С. 73–78.
9. Склепус О. Вплив розривів у з'єднувальних швах на повзучість пластинчастих елементів конструкцій / О. Склепус // Машинознавство. – 2008. – № 1 (127). – С. 11–13.
10. Рвачев В. Л. Метод R-функции в задачах об изгибе и колебаниях пластин сложной формы / В. Л. Рвачев, Л. В. Курпа, Н. Г. Склепус, Л. Б. Учишвили. – К. : Наук. думка, 1973. – 123 с.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2008 р.