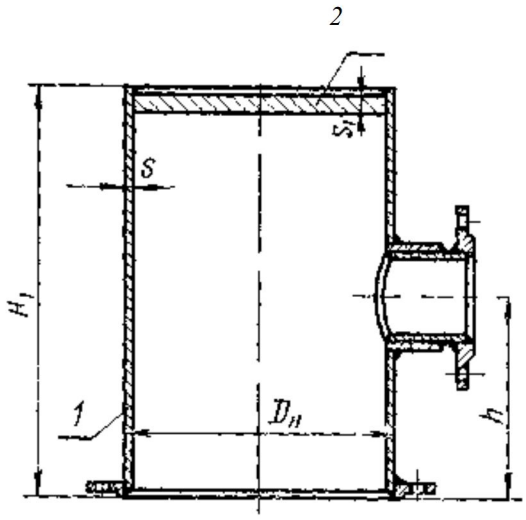
УДК 539.3

О. М. Склепус

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗУЧОСТІ ТА РУЙНУВАННЯ ПЛАСКИХ ДНИЩ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Проведено комп'ютерне дослідження пласких сталевих днищ, приварених до оболонкової камери теплообмінника. За розрахунками параметра пошкоджуваності визначено ресурс роботи днищ.

Постановка проблеми і аналіз публікацій. На сучасному етапі розвитку техніки значна увага конструкторів й інженерів приділяється створенню машин і апаратів з найкращими технічними властивостями, що забезпечують скорочення витрат сировини, палива і енергії на їхнє виготовлення й експлуатацію [1–7].



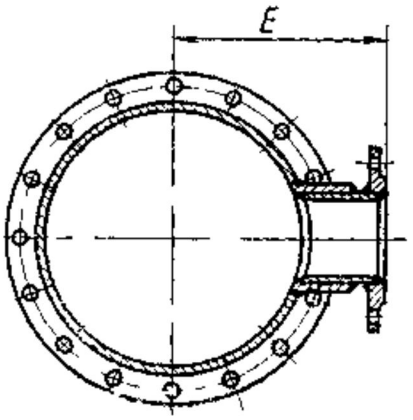


Рис. 1. Камера теплообмінника:
1 – камера; 2 – пласке днище

Задача технічного прогресу в галузі теплообмінної апаратури енергетичних установок полягає в тому, щоб створювати більш дешеві у виготовленні і економічні в експлуатації апарати [6]. Крім того, для транспортних теплосилових агрегатів найважливішим є забезпечення жорстких габаритних і силових вимог [1, 4].

Температури більше 500ºС, корозія і значні перепади тиску, які мають місце в областях високого і середнього тисків високотемпературних теплообмінних апаратів можуть призвести до недопустимо великих деформацій, передчасних поломок і руйнувань найбільш навантажених деталей теплообмінників, до яких належать і пласкі днища (рис. 1). За цих умов стає актуальним враховування повзучості матеріалу пласких днищ [1, 4, 7]. За наявності повзучості міцність стає залежною від часового фактору, тому в задачу розрахунку міцності конструкції включається, перш за все, розрахунок на довговічність [1, 5, 7]. Повзучість призводить також до поступового збільшення прогинів пласких днищ і перерозподілу напружень в ній. Обидва ці фактори здійснюють значний вплив на надійність конструкції і також повинні враховуватися при проектуванні.

Мета статті. У статті досліджується повзучість та руйнування пласких днищ сучасних теплообмінних апаратів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження мікроструктури кристалічних конструкційних матеріалів за допомогою електронного й оптичного мікроскопів показують, що, навіть у ненавантаженому стані, розглянуті матеріали містять різні мікротріщини, пори, порожнини, сторонні включення й інші дефекти. Ще більш складна картина, пов'язана з ростом наявних дефектів структури і появою нових дефектів по границях зерен, спостерігається в умовах повзучості [1].

© О. М. Склепус

У деяких матеріалах, таких як мідь, пошкодження видні візуально, а, наприклад, в алюмінієвих сплавах пошкодження важко спостерігати навіть за допомогою оптичного мікроскопа.

Очевидно, що процеси повзучості і пошкоджуваності матеріалу є взаємозалежними. Для опису цих процесів формулюються феноменологічні теорії, що описують макроскопічну поведінку матеріалів.

У рамках феноменологічного підходу, увівши параметр пошкоджуваності при повзучості, згідно з Ю. Н. Работновим [1], можна розглядати обговорювані мікронеоднорідні матеріали, як деякі мікроскопічно однорідні пошкоджувані середовища. При цьому параметр пошкоджуваності може мати скалярну [1, 2], векторну [2] або тензорну [2] природу.

Скалярний параметр пошкоджуваності d вводиться в такий спосіб: $d = 0$ для неушкодженого матеріалу; $d = 1$ у момент руйнування при повзучості. Цей параметр є деякою мірою розтріскування матеріалу, однак, ми не будемо намагатися установити пряму залежність між кількістю тріщин на одиницю об'єму, їхніми розмірами й орієнтацією, з одного боку, і величиною параметра d – з іншої.

У роботі [4] надано експериментальне дослідження пласких днищ зі сталі 20 ($E = 1{,}643 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0{,}3$) діаметром $2R = 1{,}376$ м і товщиною $h = 0{,}04$ м, приварених до «короткої» циліндричної оболонки. Оболонка навантажувалася внутрішнім тиском повітря $P = 0{,}6$ МПа, подаваного від компресора. Досліди проводилися на спеціальному стенді [4] при температурі $500°C$.

За кривими повзучості і тривалої міцності, наведеними в [5], визначено сталі характеристики матеріалу для рівнянь, що описують процеси повзучості

$$\dot{p}_{kl} = \frac{3}{2} A t^{\theta} \sigma_i^{n-1} \frac{S_{kl}}{(1-d)^n} \ .$$

Швидкість зміни d вибирається як функція напруг [1]:

$$\dot{d} = \frac{B t^{\theta} \sigma_r^m}{(1-d)^{\phi}} \ .$$

Установлено, що для сталі 20 при температурі $500°C$: $\theta = -0{,}21$, $n = m = 6{,}12$, $\phi = 11{,}51$, $A = 1{,}19 \cdot 10^{-16}$ МПа$^{-n}$год$^{-(\theta+1)}$, $B = 8{,}38 \cdot 10^{-17}$ МПа$^{-m}$год$^{-(\theta+1)}$.

Як модель плаского сталевого днища, привареного до циліндричної оболонкової камери теплообмінника (рис. 1), вибираємо жорстко закріплену по контуру пластину. Пластина знаходиться під дією поперечної рівномірно розподіленої навантаги. Основні геометричні й фізичні співвідношення для швидкостей деформацій $\dot{\varepsilon}_{kl}$ та напружень $\dot{\sigma}_{kl}$ будуються на основі гіпотез Кірхгофа-Лява та закону Гука:

$$\dot{\varepsilon}_{11} = -z\dot{w}_{,11}, \qquad \dot{\varepsilon}_{22} = -z\dot{w}_{,22}, \qquad 2\dot{\varepsilon}_{12} = -2z\dot{w}_{,12},$$

де $\dot{w}(x_1, x_2, t)$ – швидкість прогину координатної поверхні пластини по осі Oz;

$$\dot{\sigma}_{11} = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\dot{\varepsilon}_{11}^e + \nu\dot{\varepsilon}_{22}^e\right); \qquad \dot{\sigma}_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}\left(\dot{\varepsilon}_{22}^e + \nu\dot{\varepsilon}_{11}^e\right); \qquad \dot{\sigma}_{12} = 2G\dot{\varepsilon}_{12}^e,$$

де E, G, ν – модуль пружності, модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона ізотропного матеріалу; $\dot{\varepsilon}_{kl}^e = \dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{p}_{kl}$ – швидкості пружних деформації. Тоді

$$\dot{\sigma}_{11} = \frac{E}{1-\nu^2}[\dot{\varepsilon}_{11} + \nu\dot{\varepsilon}_{22} - (\dot{p}_{11} + \nu\dot{p}_{22})];$$

$$\dot{\sigma}_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}[\dot{\varepsilon}_{22} + \nu\dot{\varepsilon}_{11} - (\dot{p}_{22} + \nu\dot{p}_{11})];$$

$$\dot{\sigma}_{12} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{12} - \dot{p}_{12}\right).$$

Більшість існуючих методів розрахунків на повзучість пластин складної геометричної форми базуються на застосуванні дискретних чисельних методів, таких як метод кінцевих елементів, метод скінчених різниць й інші. Сучасний розвиток теорії R-функцій дозволяє проводити розрахунки на повзучість пластин на основі аналітичного подання розв'язків крайових задач у вигляді структурних формул [3]. У сполученні з теорією R-функцій пропонується використовувати варіаційний принцип Лагранжа, метод Рітца та метод Рунге-Кутта-Мерсона для інтегрування початкових задач за часом.

Функціонал Лагранжа для пластин сформульовано у вигляді:

$$I = \frac{1}{2}\iint_{\Omega}\left(D_{11}\dot{w}_{,11}^2 + D_{22}\dot{w}_{,22}^2 + 2D_{33}\dot{w}_{,11}\dot{w}_{,22} + D_{44}\dot{w}_{,12}^2 + \right.$$

$$\left. + \dot{M}_{11}^c\dot{w}_{,11} + \dot{M}_{22}^c\dot{w}_{,22} + 2\dot{M}_{12}^c\dot{w}_{,12}\right)dx_1dx_2 - \iint_{\Omega}\dot{q}\dot{w}dx_1dx_2 . \qquad (1)$$

У функціоналі (1) введено позначення:

$$\dot{M}_{11}^c = \int_{(h)}\frac{Ez}{\left(1-\nu^2\right)}\left(\dot{p}_{11} + \nu\dot{p}_{22}\right)dz ;$$

$$\dot{M}_{22}^c = \int_{(h)}\frac{Ez}{\left(1-\nu^2\right)}\left(\dot{p}_{22} + \nu\dot{p}_{11}\right)dz ; \qquad \dot{M}_{12}^c = 2\int_{(h)}Gz\dot{p}_{12}dz . \qquad (2)$$

$$D_{11} = D_{22} = \int_{(h)}\frac{Ez^2}{\left(1-\nu^2\right)}dz ; \qquad D_{33} = \int_{(h)}\frac{Ez^2\nu}{\left(1-\nu^2\right)}dz ; \qquad D_{44} = \int_{(h)}\frac{2Ez^2}{\left(1+\nu\right)}dz .$$

Функціонал (1) сформульовано для швидкостей шуканих функцій, а в підсумку треба знайти значення самих функцій в довільний момент часу. Ця задача в роботі розв'язується кроковим методом інтегрування за часом по схемі Рунне-Кутта-Мерсона. Величини (2) грають роль додаткових навантажень у функціоналі (1) і на кожному кроці обчислюються по значенням шуканих функцій на попередньому кроці. Крайові задачі в початковий момент часу і на кожному часовому кроці розв'язуються варіаційно-структурним методом.

У розрахунках приварених по контуру днищ використані структури розв'язку для жорсткого закріплення:

$$\dot{w} = \omega^2 F_1 .$$

де $\omega = 0$ – рівняння жорстко закріпленої границі пластини, в якому $\omega = \frac{1}{2R}\left(R^2 - x_1^2 - x_2^2\right)$; F_1 – невизначений компонент структури розв'язку, що вибирається у вигляді степеневого полінома $F_1(x_1, x_2) = \sum_{k,l=0}^{N} C_{kl}x_1^k x_2^l$.

У роботі досліджувалися днища різної товщини. На рис. 2 показано зміну прогину в центрі нижнього днища в процесі досліджень. Тут суцільними лініями надані розрахункові дані про прогин: *1* – для днища товщиною $h = 35$ мм, *2* – для днища товщиною $h = 40$ мм, *3* – для днища товщиною $h = 45$ мм. Експериментальні дані роботи [4] про зростання прогинів показано точками. В таблиці 1 наведено результати розрахунку довговічності пласких днищ різної товщини. За час руйнування днища вважається момент часу коли значення скалярного параметра пошкоджуваності в будь-якій її точці досягає значення $d = 1$.

Усі розрахунки в роботі проводилися за допомогою розробленого на мові С++ програмного комплексу. Розрахункові дані отримані при таких параметрах дискретизації: кількість координатних функцій

дорівнює 28, при інтегруванні по товщині днища застосовувалася 6-точкова формула Гауса, кількість вузлів інтегрування по області дорівнювало 256.

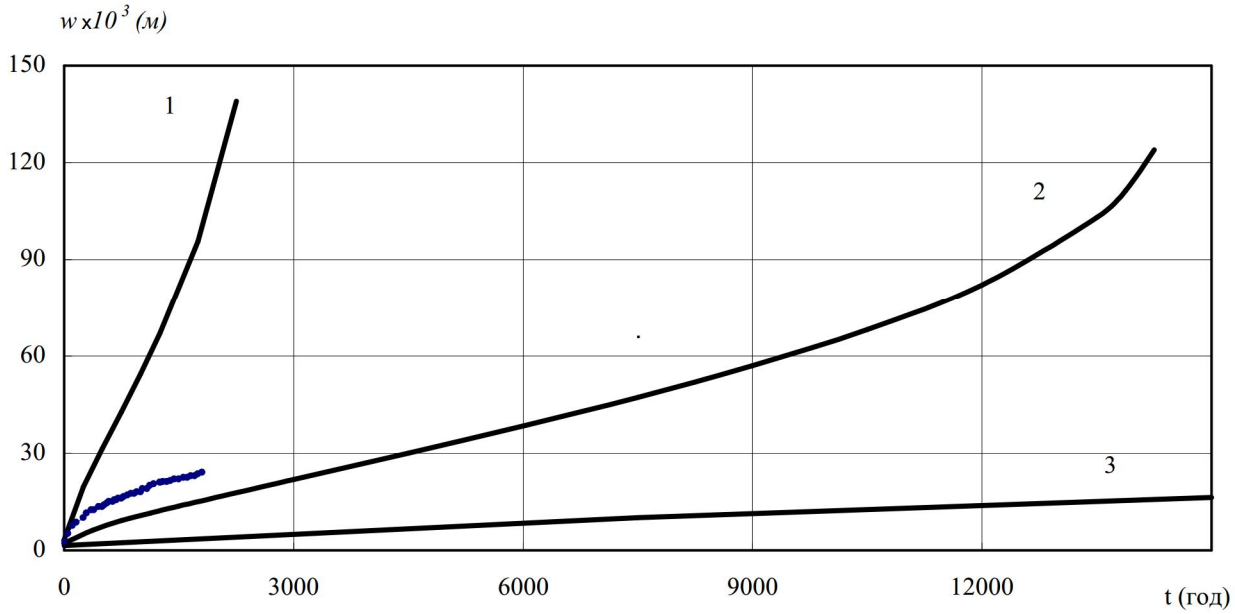


Рис. 2. Зростання прогинів у центрі нижнього днища

Таблиця 1

Ресурс роботи пласких днищ

Товщина днища *h*, мм	Ресурс роботи днища, год.
35	2520
40	15460
45	68050

Основні висновки. Таким чином, виконано комп'ютерне дослідження пласких сталевих днищ, приварених до оболонкової камери теплообмінника. Результати комп'ютерного дослідження прогинів порівнювалися з дослідними даними, отриманими для оболонки з привареним днищем, навантаженої внутрішнім тиском повітря, подаваного від компресора. За розрахунками параметра пошкоджуваності, який характеризує процеси руйнування в днищі, визначено довговічність днищ різної товщини. Використана методика і розроблене програмне забезпечення дозволяють виконувати проектні розрахунки пласких днищ будь-якої форми, які можуть мати різні отвори та ребра жорсткості.

Список використаних джерел

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций, М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. Murakami S. Progress of Continuum Damage Mechanics: JSME Int. Jorn. – 1987. – Vol. 30. – P. 701 – 710.

3. Рвачев В. Л. Метод R-функции в задачах об изгибе и колебаниях пластин сложной формы. / Рвачев В. Л., Курпа Л. В., Склепус Н. Г., Учишвили Л. Б. – К.: Наук. думка, 1973. – 123 с.

4. Урманчеев А. И. Исследование ползучести плоских днищ и трубных досок высокотемпературных энергетических установок. // Труды центрального котлотурбинного института. – 1982. – С. 87 –90.

5. Кац Ш. Н. Исследование длительной прочности углеродистых труб. // Теплоэнергетика. – 1955. – № 11. – С. 37 – 40.

6. Андреев М. М. и др. Теплообменная аппаратура энергетических установок. – М.: Машгиз, 1963. – 220 с.

7. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Sychov A. Geometrically nonlinear bending of thin-walled shells and plates under creep-damage conditions. Archive of Applied Mechanics. – 1997. – 67. – P. 339 – 352.

Стаття надійшла до редакції 21.06.07 р.