

УДК 539.376

Прогнозування циклічної довговічності тонкостінних циліндричних оболонок за умов двовісного комбінованого навантаження

В.П. Голуб; А.В. Плащинська; А.В. Романов

Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ, Київ, Україна

Анотація. Розглянуто задачу прогнозування циклічної довговічності елементів конструкцій внаслідок розвитку процесу класичної втоми. Розв'язок ґрунтується на використанні методів розрахунку довговічності, що побудовані на основі критеріїв довготривалого руйнування та концепції еквівалентних напружень. Застосування концепції еквівалентних напружень дозволяє складні режими циклічного навантаження звести до одновісного симетричного циклу. В якості критеріїв руйнування розглянуто критерій максимальних нормальних напружень, критерій максимальних дотичних напружень та критерій питомої енергії формозміни. Розв'язано задачу розрахунку числа циклів до руйнування внаслідок класичної втоми тонкостінних циліндричних оболонок за умов комбінованого багатоциклового навантаження розтягом-стиском та крученням із конструкційної сталі 45 та сталі JIS SNCM8, згином та крученням із конструкційної сталі 20 і сталі St 460. Результати розрахунків апробовано експериментально.

Ключові слова: тонкостінні циліндричні оболонки; двовісне циклічне навантаження; класична втома, число циклів до руйнування; критерії руйнування; матеріальні константи; експериментальна апробація.

Розглядається руйнування внаслідок втоми тонкостінних циліндричних оболонок за умов комбінованого навантаження симетричним циклічним розтягом-стиском та симетричним циклічним крутним моментом, симетричним циклічним моментом згину та симетричним циклічним крутним моментом. В якості критеріїв руйнування розглядаються критерій максимальних нормальних напружень, критерій максимальних дотичних напружень і критерій питомої енергії формозміни. Циклічна довговічність n_R при комбінованому циклічному навантаженні згідно із концепцією еквівалентних напружень задається співвідношенням

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma(\sigma_n(n_R))^{q_\sigma}}, \quad (1)$$

де функція $\sigma_n(n_R)$ розглядається в якості еквівалентного напруження.

Задача полягає у розробці методу розрахунку й у розв'язку задач визначення числа циклів до руйнування тонкостінних циліндричних оболонок внаслідок багатоциклової втоми за умов двовісного комбінованого навантаження розтягом-стиском і крученням, згином і крученням та в експериментальній апробації результатів розрахунків.

Розв'язкове рівняння для довговічності n_R оболонок внаслідок втоми при двовісному навантаженні на основі критерію максимальних нормальних

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n(n_R)} + \left[\frac{\tau_a}{\sigma_n(n_R)} \right]^2 = 1, \quad (2)$$

з урахуванням (1) отримуємо у вигляді:

$$n_R = \frac{2^q}{(1+q_\sigma)D_\sigma(\sigma_a)^{q_\sigma}} \left\{ 1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{\tau_a}{\sigma_a} \right)^2} \right\}^{-q_\sigma}. \quad (3)$$

Розв'язкове рівняння для довговічності оболонок внаслідок втоми при двовісному навантаженні на основі критерію максимальних дотичних напружень

$$\left[\frac{\sigma_a}{\sigma_n(n_R)} \right]^2 + \left[\frac{2\tau_a}{\sigma_n(n_R)} \right]^2 = 1, \quad (4)$$

отримуємо у вигляді:

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma(\sigma_a)^{q_\sigma}} \left\{ 1 + 4 \left(\frac{\tau_a}{\sigma_a} \right)^2 \right\}^{-\frac{q_\sigma}{2}}. \quad (5)$$

Розв’язкове рівняння для довговічності n_R оболонок внаслідок втоми при двовісному навантаженні на основі критерію питомої енергії формозміни:

$$\left[\frac{\sigma_a}{\sigma_n(n_R)} \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}\tau_a}{\sigma_n(n_R)} \right]^2 = 1, \quad (6)$$

отримуємо у вигляді:

$$n_R = \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma(\sigma_a)^{q_\sigma}} \left\{ 1 + 3 \left(\frac{\tau_a}{\sigma_a} \right)^2 \right\}^{-\frac{q_\sigma}{2}}. \quad (7)$$

Задача визначення коефіцієнтів q_σ , D_σ зводиться до мінімізації функціонала:

$$\Phi(q_\sigma D_\sigma) = \sum_{j=1}^s \left\{ n_{Rj}(\sigma_{aj}) - \frac{1}{(1+q_\sigma)D_\sigma(\sigma_a)^{q_\sigma}} \right\}^2, \quad (8)$$

де σ_{aj} , $n_{Rj}(\sigma_{aj})$ – набір дискретних значень амплітуд циклічних нормальних напружень та відповідних їм чисел циклів до руйнування. У якості матеріальної константи розглядається також параметр $\mu = \tau_{-1}/\sigma_{-1}$, що задає відношення між фізичними межами втоми τ_{-1} та σ_{-1} за умов одновісного симетричного кручення та одновісного симетричного розтягу-стиску відповідно.

Розв’язано задачі розрахунку циклічної довговічності внаслідок втоми тонкостінних циліндричних оболонок за умов комбінованого навантаження циклічним розтягом-стиском та циклічним крученням із конструкційної сталі 45 та сталі JIS SNCM8. Значення коефіцієнтів на основі експериментальних даних з [1], [2], для зазначених вище матеріалів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Константи матеріалів

Матеріал	D_σ , МПа ^{-q} цикл ⁻¹	q_σ	μ
Сталь 45	$2,24 \cdot 10^{-45}$	15,87	0,68
JIS SNCM8 Steel	$6,27 \cdot 10^{-40}$	12,19	0,67

Розраховано залежність числа циклів до руйнування оболонок n_R від амплітуди циклічних нормальних напружень σ_a та де прийнято, що $v = \tau_a/\sigma_a = const$ при комбінованому навантаженні циклічним розтягом-стиском та циклічним крученням (рис. 1). Маркерами нанесені дані експериментів, що запозичені з [1], [2].

Розв’язано задачі розрахунку циклічної довговічності внаслідок втоми тонкостінних циліндричних оболонок із конструкційної сталі 20 і сталі St 460 за умов комбінованого навантаження циклічним згином та циклічним крученням. Константи матеріалу для досліджених матеріалів на основі експериментальних даних з [2], [3] наведені в табл. 2.

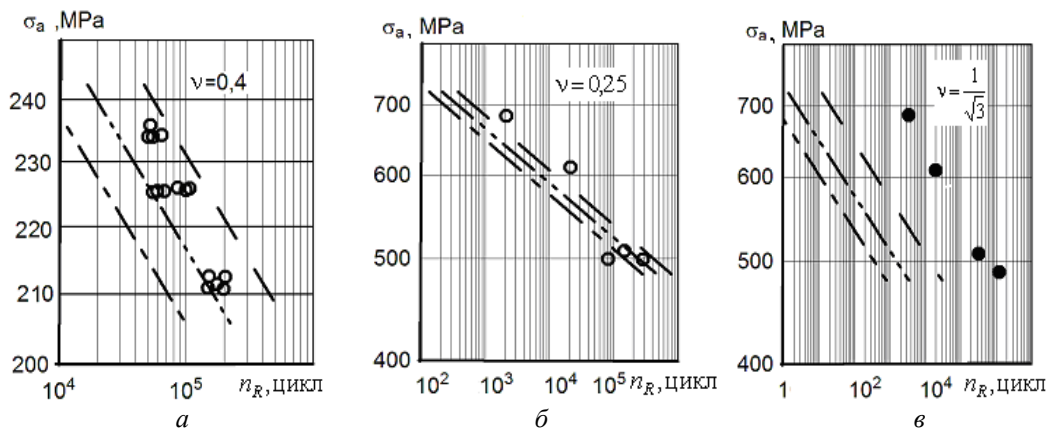


Рис. 1. Розрахункові (лінії) та експериментальні (маркери) результати циклічної довговічності тонкостінних циліндричних оболонок із сталі 45 (а) і сталі JIS SNCM8 (б, в) при комбінованому навантаженні циклічним розтягом-стиском та циклічним крученням за рівняннями (3) (— —), (5) (— · —), (7) (— · · —)

Таблиця 2

Константи матеріалів

Матеріал	D_{σ} , МПа ^{-q} цикл ⁻¹	q_{σ}	μ
Сталь 20	$2,99 \cdot 10^{-13}$	3,10	1,2–1,8
Сталь St 460	$2,49 \cdot 10^{-19}$	5,46	0,72

Розраховано залежність числа циклів до руйнування оболонок n_R від амплітуди згинних циклічних напружень σ_a при $\nu = const$ (рис. 2) при комбінованому навантаженні циклічним згином та циклічним крученням. Маркерами нанесені дані експериментів [2, 3].

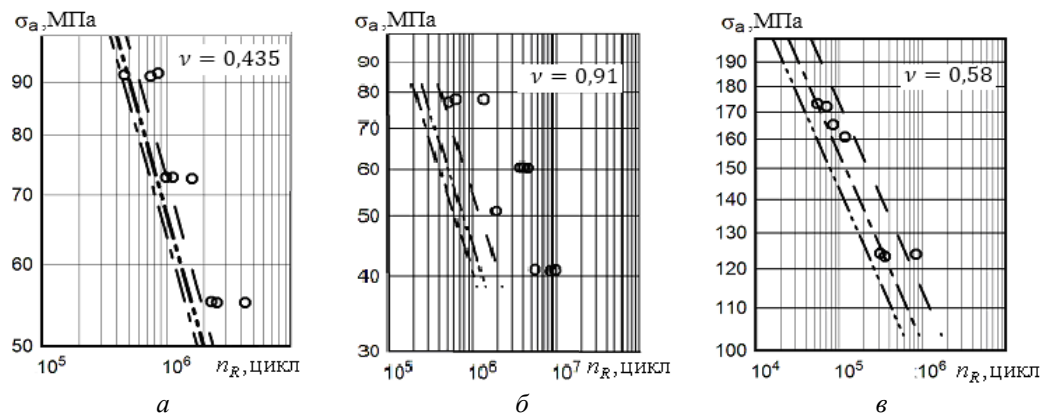


Рис. 2. Розрахункові (лінії) та експериментальні (маркери) результати циклічної довговічності тонкостінних циліндричних оболонок із сталі 20 (а, б) та сталі St 460 (в) при комбінованому навантаженні циклічним згином та циклічним крученням за рівняннями (3) (— —), (5) (— · —), (7) (— · · —)

Отримано задовільне узгодження результатів розрахунків з експериментальними даними, запозиченими з літератури. Точність залежить, насамперед від відповідності структури критерію руйнування внаслідок втоми до вихідної пластичної властивості матеріалу. Ці властивості задаються усередненими значеннями параметра μ , який для

досліджених матеріалів змінюється в межах від 0,67 до 1,2–1,8. Найкраще узгодження з експериментальними даними отримано для розрахунків, виконаних відповідно до критерію питомої енергії формозміни незалежно від характеру навантаження.

Список літератури

1. Tanaka K., Matsuoka S. The strength of JIS SNCM8 steel under combined alternating stresses // Advances in research on the strength and fracture of materials// Pergamon Press: New-York.-1978. – Vol. 28. – P. 1161-1168.
2. Панфилов Ю.А. Описание предельного состояния при переменной двухосной напряженности и его применение в расчетах. Сообщ. 1. Простое нагружение // Пробл. прочности, 1981. – № 1. – С. 49-53.
3. Sonsino C.M., Kueppers M. Multiaxial fatigue of welded joints under constant and variable amplitude loading // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 2001. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 309-327.

Prediction of fatigue durability of thin-walled cylindrical shells under biaxial combined loading conditions

V. Golub, A. Plashchynska, O. Romanov

Timoshenko Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract: The problem of predicting the fatigue life of structural elements due to the development of the classical fatigue process is considered. The solution is based on the use of methods for calculating durability, which are built based on long-term failure criteria and the concept of equivalent stresses. Using the concept of equivalent stresses allows complex cyclic loading modes to be reduced to a uniaxial symmetric cycle. The criterion of maximum normal stresses, the criterion of maximum tangential stresses, and the criterion of specific strain energy are considered as failure criteria. The problem of calculating the number of cycles to failure due to classical fatigue of thin-walled cylindrical shells under conditions of combined multi-cycle tension-compression and torsion loading from structural steel 45 and JIS SNCM8 steel, bending and torsion from structural steel 20 and St 460 steel is solved. The results of the calculations are tested experimentally.

Keywords: thin-walled cylindrical shells; biaxial cyclic loading; classical fatigue, number of cycles to failure; failure criteria; material constants; experimental validation.