

УДК 539.3

ЧИСЕЛЬНЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ ФІЗИЧНО НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ ДЛЯ КОНІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАКЕТ З ПРЯМОКУТНИМИ ОТВОРАМИ

**Євген Сторожук, Володимир Максимюк,
Іван Чернишенко, Світлана Харенко**

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України

stevan@ukr.net, desc@inmech.kiev.ua, chernish23@ukr.net, svetlana_borisovna@ua.fm

У сучасному ракетобудуванні, як основні несучі елементи конструкцій, широко використовуються оболонки і пластини. Часто тонкостінні елементи ракетної техніки виготовляють з композитних матеріалів у вигляді сферичних, циліндричних та конічних оболонок (днище паливного бака, корпус (обтікач) ракети, міжступеневий і хвостовий відсіки ракети тощо). З конструктивних або технологічних міркувань зазначені елементи часто мають вирізи-люки та отвори найрізноманітнішої форми. Порушення суцільності викликають концентрацію напружень. При підвищених рівнях навантажень це може призвести до руйнування або появи неприпустимих деформацій. Тому дослідження концентрації напружень біля отворів та вирізів у таких елементах конструкцій з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів має особливо важливе значення.

У даній роботі розроблено чисельну методику розв'язання фізично нелінійних задач для тонкостінних елементів ракет конічної форми, виготовлених з нелінійно-пружних композитних матеріалів і ослаблених прямокутними отворами. Запропонована методика базується на використанні методу початкових напружень, методу Ньютона для обернення нелінійних фізичних співвідношень [1] і методу скінченних елементів з апроксимацією шуканих функцій бікубічними сплайнами.

Основні рівняння подамо в криволінійній ортогональній системі координат (l, ϑ, γ) , лінії l, ϑ якої збігаються з лініями головних кривин. Вважаємо, що процес навантаження оболонки відбувається за постійної температури та є активним і простим. За певних навантажень в оболонці проявляються нелінійні властивості матеріалу, але прогини й деформації залишаються малими. Зазначені передумови дозволяють скористатися геометрично лінійною теорією тонких оболонок [2] і деформаційною теорією пластичності анізотропних середовищ [1].

Геометричні співвідношення запишемо у векторній формі на основі теорії непологих оболонок, в якій виконуються гіпотези Кірхгофа–Лява:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial \bar{u}}{A_l \partial l} \cdot \bar{e}_l; \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial \bar{u}}{A_g \partial g} \cdot \bar{e}_g; \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial \bar{u}}{A_l \partial l} \cdot \bar{e}_g + \frac{\partial \bar{u}}{A_g \partial g} \cdot \bar{e}_l; \\ \mu_{11} = -\frac{\partial \bar{\varphi}}{A_l \partial l} \cdot \bar{e}_l; \quad \mu_{22} = -\frac{\partial \bar{\varphi}}{A_g \partial g} \cdot \bar{e}_g; \quad 2\mu_{12} = -\frac{\partial \bar{\varphi}}{A_l \partial l} \cdot \bar{e}_g - \frac{\partial \bar{\varphi}}{A_g \partial g} \cdot \bar{e}_l; \quad (1)$$

$$e_{11} = \varepsilon_{11} + \gamma \mu_{11}; \quad e_{22} = \varepsilon_{22} + \gamma \mu_{22}; \quad e_{12} = \varepsilon_{12} + 2\gamma \mu_{12},$$

де A_l, A_g – параметри Ламе; $\bar{u} = u\bar{e}_l + v\bar{e}_g + w\bar{n}$ – вектор переміщень точок серединної поверхні оболонки; $\bar{e}_l, \bar{e}_g, \bar{n}$ – орти криволінійної ортогональної системи координат (l, g, γ) ; $\bar{\varphi} = \varphi_l \bar{e}_l + \varphi_g \bar{e}_g$ – вектор кутів повороту дотичних до координатних ліній.

Фізичні співвідношення при плоскому напруженому стані у випадку збігу напрямків ортотропії матеріалу з напрямками осей координат (l, g, γ) мають вигляд [1]:

$$e_{11} = \left(\frac{1}{E_{11}} + \Psi q_{1111} \right) \sigma_{11} + \left(-\frac{\nu_{12}}{E_{22}} + \Psi q_{1122} \right) \sigma_{22}; \quad (2)$$

$$e_{22} = \left(-\frac{\nu_{21}}{E_{11}} + \Psi q_{2211} \right) \sigma_{11} + \left(\frac{1}{E_{22}} + \Psi q_{2222} \right) \sigma_{22}; \quad e_{12} = \left(\frac{1}{G_{12}} + 4\Psi q_{1212} \right) \sigma_{12},$$

де $E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}$ – пружні сталі композитного матеріалу; $\Psi(f)$ – функція, яка описує нелінійне деформування матеріалу; $q_{1111}, q_{2222}, q_{1122}, q_{1212}$ – компоненти тензора, що враховує анізотропію нелінійних властивостей композитного матеріалу.

З використанням розробленої методики і створеного програмного забезпечення досліджено концентрацію напружень у зрізаній конічній оболонці, яка виготовлена з ортотропного нелінійно-пружного 8-шарового органопластику, ослаблена двома прямокутними отворами, за дії осьового навантаження.

1. Гузь А.Н., Космодамианский А.С., Шевченко В.П. Механика композитов. Т. 7. Концентрация напряжений. – Киев: “А.С.К.”, 1998. – 387 с.
2. Гузь А.Н., Чернышенко И.С., Чехов Вал.Н., Чехов Вал.Н., Шнеренко К.И. Методы расчета оболочек. Т. 1. Теория тонких оболочек, ослабленных отверстиями. – Киев: Наук. думка, 1980. – 636 с.

NUMERICAL SOLUTION OF PHYSICALLY NONLINEAR PROBLEMS FOR CONICAL ROCKETRY STRUCTURES WITH RECTANGULAR HOLES

Using the developed numerical technique the influence of the nonlinear elasticity of the material and geometrical parameters on the stress concentration in thin-walled conical members of rockets with two rectangular holes is investigated.