

УДК 539.3

ДЕФОРМУВАННЯ НЕТОНКИХ АНІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК, ЗАХИЩЕНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИМ МАТЕРІАЛОМ, ЗА ТЕРМОСИЛОВОЇ ДІЇ

Володимир Трач, Андрій Подворний, Олександр Бондарський

*Національний університет водного господарства та природокористування,
Луцький національний технічний університет*

trach-vm@ukr.net, a.v.podvornyi@nuwm.edu.ua, bondarskij22@ukr.net

Нещодавно з'явився новий вид композитних матеріалів, відомий як функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) [8, 9]. Відомо, що такий матеріал є неоднорідним композитом, виготовленим з різних фаз матеріальних складових. Одним з найсучасніших типів ФГМ є армуючий матеріал з вуглецевих нанотрубок [1]. Якщо ж в якості його матриці вибрати керамічну складову, то такий матеріал буде здатний протистояти високотемпературному впливу.

В цьому дослідженні представлено модифікацію функціоналу узагальненого варіаційного принципу Ху-Васідзу. Застосування такого підходу, на основі співвідношень лінійної теорії пружності анізотропного тіла, дозволило вивести тривимірну систему рівнянь. На цій основі запропоновано методику встановлення параметрів напружено-деформованого стану товстостінної шаруватої анізотропної циліндричної оболонки, що виготовлена з волокнистого композиту та шарів з ФГМ (кераміка-вуглецеві нанотрубки). Головні напрямки пружності таких матеріалів можуть не збігатись з осями криволінійної системи координат конструкції. В такому випадку необхідно враховувати ефект конструктивної анізотропії, викликаний розбіжністю між напрямками армування та осями оболонки [2, 4, 6, 7], який призводить до виникнення матеріалу з однією площиною пружної симетрії. Згідно з узагальненим законом Гука для нього деформації розтягу і зсуву, згину та кручення взаємопов'язані.

Для розв'язку отриманої системи рівнянь скористаємося процедурою методу Бубнова–Гальоркіна [4, 6]. Згідно з нею, розкладемо всі функції в тригонометричні ряди за твірною та коловою координатами циліндричної оболонки так, що б вони задовольняли крайові умови. Після деяких математичних перетворень отримаємо нескінченну систему диференціальних рівнянь в нормальній формі Коші. Розв'язок одновимірної системи проведемо за використання чисельного методу дискретної ортогоналізації.

Реалізація запропонованого підходу щодо встановлення параметрів напружено-деформованого стану представлена на прикладі товстостінної циліндричної оболонкової конструкції, виготовленої з композитного матеріалу (боропластику), захищеного з боку вищого температурного поля шаром ФГМ. Проаналізовано характер розподілу компонентів напружено-деформованого стану за товщиною оболонки залежно від такої комбінованої термосилової дії.

1. Аврамов К.В., Чернобричко М.В., Успенський Б.В. Вільні коливання функціонально-градієнтних наноармованих циліндричних оболонок // Космічна наука і технологія. – 2019. – **25**, № 2. – С. 23–37.
2. Баженов В.А., Семенюк М.П., Трач В.М. Нелінійне деформування, стійкість і закритична поведінка анізотропних оболонок: Монографія. – К.: Каравела, 2010. – 352 с.
3. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
4. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Панкратова Н.Д. Задачи теории упругости неоднородных тел. – К.: Наук. думка, 1991. – 216 с.
5. Николишин М.М., Ростун М.Й. Гранична рівновага виготовленої з функціонально-градієнтного матеріалу циліндричної оболонки з внутрішньою тріщиною довільної конфігурації // Прикарпатський вісник НТШ. – 2012. – № 1. – С. 26–34.
6. Семенюк М.П., Трач В.М., Подворний А.В. Напружено-деформований стан товстостінної анізотропної циліндричної оболонки // Прикл. механіка. – 2023. – **59**, № 1. – С. 91–102.
7. Трач В.М., Подворний А.В., Хоружий М.М. Деформування та стійкість нетонких анізотропних оболонок: Монографія. – К.: Каравела, 2019. – 273 с.
8. Amada S., Munekata T., Nagase Y., Ichikawa Y., Kirigai A., Zhifei Y. The Mechanical Structures of Bamboos in Viewpoint of Functionally Gradient and Composite Materials // Journal of Composite Materials. – 1996. – **30**, issue 7. – P. 800–819.
9. Shen Hui-Shen Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells. – CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York, 2009. – 266 p.

DEFORMATION OF NON-THIN ANISOTROPIC CYLINDRICAL SHELLS PROTECTED BY A FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIAL UNDER THERMAL POWER LOAD

The paper presents an approach to obtaining a three-dimensional system of equations that describes the stress-strain state of anisotropic cylindrical thick-walled shells under thermal power load. To protect the fibrous composite material of the shells, a functionally graded material (FGM) is used, the components of which can be ceramics and unidirectional carbon nanotubes. The procedure of the Bubnov-Gal'orkin method is used to reduce the system of equations to a one-dimensional one. The resulting one-dimensional problem is solved in the normal direction to the middle surface, using the discrete orthogonalization method.

The stress-strain state of an anisotropic thick-walled cylindrical shell protected from the side of higher temperatures by a layer of FGM was studied from the combined power and temperature effects.