УДК 539.3 https://doi.org/10.15407/itm2021.04.104

К. В. АВРАМОВ[2,3], Б. В. УСПЕНСЬКИЙ[1], І. І. ДЕРЕВЯНКО[3,1]

НЕЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ САНДВІЧ-ПЛАСТИНИ ЗІ СТІЛЬНИКОВИМ НАПОВНЮВАЧЕМ, СТВОРЕНИМ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

[1] *Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, вул. Пожарського, 2/10, 61046, Харків, Україна; e-mail:admi@ipmach.kharkov.ua*
[2] *Національний технічний університет «ХПІ» Міністерство освіти і науки України, вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна; e-mail:omsroot@kpi.kharkov.ua*
[3]*Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля» вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна; e-mail: info@yuzhnoye.com*

Розглянуто тришарову сандвіч-пластину зі стільниковим заповнювачем, який надруковано за допомогою FDM-технології з полікарбонату. Верхню та нижню поверхні пластини створено з вуглепластику. Для дослідження відгуку сандвіч-пластини стільниковий заповнювач замінюється однорідним шаром з відповідними механічними властивостями. Для верифікації моделі заповнювача використано скінченно-елементне моделювання репрезентативного об'єму заповнювача за допомогою програмного комплексу ANSYS. При описі динаміки конструкції застосовано модифікацію зсувної теорії високого порядку. Для моделювання нелінійних вимушених коливань пластини використано метод заданих форм. Методом Релея–Рітца обчислюються власні частоти та форми коливань пластини, за якими розкладаються переміщення її точок у нелінійних коливаннях. Частотний відгук системи розраховано методом продовження розв'язку двоточкової крайової задачі для нелінійних звичайних диференційних рівнянь та методом мультиплікаторів Флоке, що дозволяє визначити стійкість та біфуркації періодичних розв'язків. Для аналізу резонансної поведінки системи отримується її частотний відгук.

Запропоновану методику застосовано для аналізу вимушених коливань квадратної тришарової пластини, защемленої за контуром. Результати аналізу вільних коливань пластини порівняно зі скінченно-елементним моделюванням за допомогою ANSYS та проведено аналіз збіжності результатів при підвищенні кількості базисних функцій. Порівняння свідчить про високу збіжність результатів. Аналіз вимушених коливань показує, що пластина здійснює суттєво нелінійні коливання, амплітудно-частотна характеристика яких має дві сідло-вузлові біфуркації, в яких змінюється стійкість періодичного руху системи. Нелінійні коливання пластини поблизу першого основного резонансу є моногармонійними. Для їх розрахунку може використовуватися метод гармонічного балансу.

Ключові слова: *сандвіч-пластина, стільниковий наповнювач, гомогенізований простір, частотний відгук.*

1. *Wilkins D. J., Bert C. W., Egle D. M.* Free vibrations of orthotropic sandwich conical shells with various boundary conditions. Journal of Sound and Vibration. 1970. 13. V. P. 211–228. https://doi.org/10.1016/S0022-460X(70)81175-0
2. *Kanematsu H. H., Hirano Y.* Bending and vibration of CFRP – faced rectangular sandwich plates. Composite Structures. 1988. V. 10. P. 145–163. https://doi.org/10.1016/0263-8223(88)90044-X
3. *Lee L. J., Fan Y. J.* Bending and vibration analysis of composite sandwich plates. Composite Structures. 1996. V. 60. P. 103–112. https://doi.org/10.1016/0045-7949(95)00357-6
4. *Frostig Y., Baruch M., Vilnay O., Sheinman I.* High-oder theory for sandwich beam with transversely flexible core. ASCE Journal of Engineering Mechanics. 1992. V. 118 (5). P. 1026–1043. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:5(1026)
5. *Frostig Y., Thomsen O. T.* High-order free vibration of sandwich panels with a flexible core. International Journal of Solids and Structures. 2004. V. 41. P. 1697–1724. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2003.09.051
6. *Frostig Y., Thomsen O. T.* On the free vibration of sandwich panels with a transversely flexible and temperature-dependent core material – Part I: Mathematical formulation. Composites Science and Technology. 2009. V. 69. P. 856–862. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.003
7. *Yu S. D., Cleghorn W. L.* Free flexural vibration analysis of symmetric honeycomb panels. Journal of Sound and Vibration. 2005. V. 284. P. 189–204. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.06.028
8. *Malekzadeh K., Khalili M. R., Mittal R. K.* Local and global damped vibrations of plates with a viscoelastic soft flexible core: An improved high-order approach. Journal of Sandwich Structures and Materials. 2005. V. 7. P. 431–456. https://doi.org/10.1177/1099636205053748
9. *Yongqiang L., Zhiqiang J.* Free flexural vibration analysis of symmetric rectangular honeycomb panels with SCSC edge supports. Composite Structures. 2008. V. 83. P. 154–158. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.04.004
10. *Kheirikhah M. M., Khalili S. M. R., Fard K. M.* Biaxial buckling analysis of soft-core composite sandwich plates using improved high-order theory. European Journal of Mechanics A/Solids. 2012. V. 31. P. 54–66. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.07.003
11. *Ramian A., Jafari-Talookolaei R.-A., Valvo P. S., Abedi M.* Free vibration analysis of sandwich plates with compressible core in contact with fluid. Thin–Walled Structures. 2020. V. 157. Paper No. 107088. alled Structures. 2020. V. 157. Paper no. 107088. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107088

12. *Li Y., Yao W., Wang T.* Free flexural vibration of thin-walled honeycomb sandwich cylindrical shells. Thin–Walled Structures. 2020. V. 157. Paper No. 107032. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107032
13. *Гудрамович В. С., Деменков А. Ф.* Упругопластические конструкции с несовершенствами формы и остаточными напряжениями. Киев: Наукова думка, 1991. 176 с.
14. *Гудрамович В. С., Скальський В. Р.,* Селіванов Ю. М. Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів / за ред. Назарчука З. Т. Львів: Простір-М, 2017. 492 с.
15. *Гудрамович В. С.* Міцність, надійність і ресурс конструкцій ракетно-космічної техніки і енергетики. Технічна механіка. 2021. № 2. С. 100–106. https://doi.org/10.15407/itm2021.02.100
16. *Catapano A., Montemurro M.* A multi-scale approach for the optimum design of sandwich plates with honeycomb core. Part I: homogenisation of core properties. Composite Structures. 2014. V. 118. P. 664–676. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.057
17. *Grediac M.* A finite element study of the transverse hear in honeycomb cores. International Journal of Solids and Structures. 1993. V. 30, No 13, P. 1777–1788. https://doi.org/10.1016/0020-7683(93)90233-W
18. *Jones R. M.* Mechanics of composite materials. CRC Press. 1998. 538 p.
19. *Ramian A., Jafari-Talookolaei R.-A., Valvo P. S., Abedi M.* Free vibration analysis of sandwich plates with compressible core in contact with fluid. Thin–Walled Structures. 2020. 157. Paper No. 107088. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107088
20. *Reddy J. N.* A simple higher-order theory for laminated composite plates. ASME Journal of Applied Mechanics. 1984. V. 51. P. 745–752. https://doi.org/10.1115/1.3167719
21. *Reddy J. N.* A refined nonlinear theory of plates with transverse shear deformation. International Journal of Solids and Structures. 1984. V. 20, No. 9/10. P. 881–896. https://doi.org/10.1016/0020-7683(84)90056-8
22. *Новожилов В. В.* Основы нелинейной теории упругости. Москва: ОГИЗ. 1948. 211 с.
23. *Meirovitch L.* Elements of Vibration Analysis. McGraw-Hill, New York. 1998. 560 p.
24. *Chernobryvko M. V., Avramov K. V., Romanenko V. N., Batutina T. J., Tonkonogenko A. M.* Free linear vibrations of thin axisymmetric parabolic shells. Meccanica. 2014. V. 49, № 12. P. 2839–2845. https://doi.org/10.1007/s11012-014-0027-6
25. *Parker T. S., Chua L. O.* Practical numerical algorithms for chaotic systems. New York: Springer-Verlag. 1989. 348 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3486-9
26. *Seydel R.* Tutorial on continuation. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1991. V. 1. P. 3–11. https://doi.org/10.1142/S0218127491000026
27. *Seydel R.* Nonlinear computation. International Journal of Bifurcation and Chaos. 1997. V. 7. P. 2105–2126. https://doi.org/10.1142/S0218127497001564
28. *Avramov K., Raimberdiyev T.* Bifurcations behavior of bending vibrations of beams with two breathing cracks. Engineering Fracture Mechanics. 2017. V. 178. P. 22–38. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.006
29. *Hohe J., Becker W.* Effective stress-strain relations for two-dimensional cellular sandwich cores: Homogenization, material models, and properties. Applied Mechanics Reviewer. 2002. V. 5, No. 1. P. 61–87. https://doi.org/10.1115/1.1425394
30. *Burton W. S., Noor A. K.* Assessment of continuum models for sandwich panel honeycomb cores. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1997. V. 145. P. 341–360. https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01196-6
31. *Avramov K.* Bifurcations of parametric oscillations of beams with three equilibrium. Acta Mechanica. 2003. V. 164. P. 115–138. https://doi.org/10.1007/s00707-003-0022-9
32. *Avramov K.* Nonlinear beam oscillations excited by lateral force at combination resonance. Journal of Sound and Vibration. 2002. V. 257. P. 337–359. https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5043
33. *Amabili M.* Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates. Cambridge University Press, New York. 2008. 390 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511619694

Отримано 21.04.2021,
в остаточному варіанті 24.11.2021