

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРОПОГЛИНАЛЬНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА
ОСНОВІ СИМУЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ**

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF VIBRATION
ABSORPTION PROPERTIES OF FOAM MATERIALS BASED ON
SIMULATION ANALYSIS**

**Мікуліч О.А., д.т.н., проф., Коменда Н.В., к.т.н., доц., Войтюк І.М.,
аспірант (Луцький національний технічний університет)**

**Mikulich O.A., Doctor of Engineering, Professor, Komenda N.V.,
Ph.D., Associate Professor, Voitiuk I.M., Ph.D. student (Lutsk National
Technical University)**

У роботі описано метод оцінки оптимальності механічних характеристик спінених матеріалів на основі симуляційного аналізу. Запропонований метод базується на числовому інтерполюванні залежності механічних характеристик піноматеріалів від масштабних факторів, які визначені на основі експериментальних досліджень для певних типів піни. Розроблений підхід дав змогу оцінити вплив густини матеріалу та розмірів пор на зміну зсувно-оберткових хвиль у середовищі.

The paper describes a simulation approach to assessing the optimality of the mechanical characteristics of foam materials. The proposed method is based on the numerical interpolation of the dependence of the mechanical characteristics of foam materials on scale factors, which are obtained based on experimental studies for certain types of foams.

According to the developed methodology, at the first stage, it is necessary to determine the scale effects and mechanical characteristics of the investigated structurally heterogeneous materials based on the experiment. In the second stage, by the change in the dependence of the input data (density and cell size), it is necessary to choose a mathematical model that would allow the most accurate description of the mechanical characteristics' dependence on the material's microstructure. In the third stage, wave propagation speeds in a foam medium under low-frequency loads are calculated based on the obtained analytical formulas. In the fourth and fifth stages, the change in wave propagation speeds in foam media is analyzed.

Based on the constructed model, the values of the mechanical characteristics of foamed materials were calculated when the cell size and material density changed. Based on the formulas for calculating the speed of propagation of a shear-rotation wave, the effect of changing the characteristics of density and cell size on the change in the speed of propagation of a shear-rotation wave in a structurally heterogeneous material was studied.

The approach proposed in the work, which is based on the method of analytical and numerical modeling in combination with the use of experimental studies, can be used not only for foam but also porous and other types of structurally heterogeneous materials. The advantage of this approach is the possibility to evaluate the change in the mechanical characteristics of foam materials, which are widely used in production, in particular, and in construction, without special laboratory studies. This approach significantly expands the scope of application of foamed polymers and allows them to optimize their use.

Ключові слова: симуляційний аналіз, пінисті матеріали, теорія пружності Коссерра.

Keywords: simulation analysis, foam materials, Cosserat elasticity.

Вступ. Істотне зростання застосування у будівництві пінистих, пористих та інших структурно-неоднорідних матеріалів пояснюється їх низькою густиною та високими вібропоглинаючими та теплозберігаючими характеристиками. Використання піноматеріалів, що мають різну структуру, густину та тип пористості, має низку переваг у порівнянні з аналогічними неспіненими пластиковими елементами, серед яких слід відмітити зменшення споживання матеріалу, кращі механічні, теплові та фізичні властивості.

Тому для оцінки оптимальності ефективних характеристик таких матеріалів необхідно розробляти методики аналізу впливу зміни мікроструктури матеріалів на їх ефективні (вібропоглинальні та теплозберігаючі) властивості. Такі методики мають поєднувати аналітичні підходи, результати експериментальних досліджень та методи математичного моделювання.

Велика кількість досліджень, результати яких представлені у літературі, стосуються експериментальних оцінок механічної поведінки певних типів пінистих матеріалів: оцінки механічної поведінки, визначення механічних та (чи) міцнісних характеристик. У [1] представлено результати дослідження впливу додавання екструдера до мікропористої піни на зміну механічних властивостей матеріалу. В [2] запропоновано новий адитивний метод отримання полімерних пін на основі прямого бульбашкового запису. Такий підхід дозволяє отримати полімерні піни з практично однаковими розмірами пор, об'ємною часткою та зв'язністю. У [3] показано можливість проведення оптимізації термічних і механічних властивостей композиту поліпропілен-воластоніт на основі експериментів, відібраних за підходом Бокса-Бенкена. У [4] досліджено переваги використання ізоціанату, який має ненасичені зв'язки та високу активність, при виготовленні поліуретанової піни.

Проте, такі результати не дозволяють узагальнити отримані дані на випадок досліджень для інших типів пін чи провести оптимізацію режимів експлуатації цих матеріалів. Тому науковий інтерес становить можливість підбору оптимальних характеристик структурно-неоднорідних матеріалів для оптимізації вібропоглинальних, теплоізоляційних та інших їх характеристик. Для розробки методики оцінки оптимальності мікроструктури піноматеріалів необхідно використовувати аналітичні підходи у рамках уточнених моделей механіки суцільного середовища, що дозволяють враховувати дискретність та неоднорідність структури таких матеріалів. Крім того, розробка таких методів вимагає побудови моделей опису залежності фізичних характеристик матеріалів від їх масштабних факторів, які б враховували нелінійну залежність вхідних параметрів.

У роботах R.S. Lakes [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**-7] на основі розробленої експериментальної методики визначено механічні характеристики пінистих матеріалів у рамках моментного континууму Коссера. При цьому враховано вплив обертально-зсувних деформацій мікрочастинок середовища та визначено розмірні фактори для спінених пінополіуретанів при згині та крученні.

У [8] розроблено методику аналітичного визначення швидкостей поширення хвиль зсуву-обертання у рамках моментного континууму Коссера, що дає можливість враховувати вплив мікроструктури матеріалу.

Постановка мети та задач досліджень. Метою роботи є розробка методу симуляційного аналізу, що ґрунтується на використанні аналітичних підходів до визначення швидкості поширення хвиль у рамках континууму Коссера [8] сумісно з методами моделювання зміни механічних характеристики піноматеріалів при зміні їх мікроструктури та густини на основі використання результатів експериментальних досліджень для деяких типів пін [5-7]. Розроблений метод аналітико-числового моделювання, заснований на запропонованих у роботі підходах, зручний і практичний для спінених, пористих та інших типів структурно неоднорідних матеріалів.

Основна частина. У літературі в роботах R.S. Lakes та його учнів отримані експериментальним шляхом значення розмірних факторів для декількох видів пін: WF300, WF110, WF51 [5]. На основі цих даних можна визначити значення пружних характеристик досліджуваних пін у рамках континууму Коссера [5, 6]. Ці пружні характеристики матеріалів дають можливість врахувати структурну неоднорідність пін.

У роботі [8] отримано аналітичні залежності для визначення швидкостей поширення хвиль зсуву-обертання у мікропористому середовищі у рамках моментного континууму Коссера. Числові розрахунки зміни швидкості поширення хвиль обертання від частоти прикладеного навантаження проведено для випадку пінополіуретанових пін.

Використовуючи методи математичного моделювання, у роботі розроблено модель, яка характеризує зміну механічних характеристик матеріалу при зміні пористості та густини піни. У побудову моделі в якості вихідних даних закладено величини розмірних ефектів, визначених експериментально [5].

Запропонована методика оцінки оптимальності ефективних характеристик структурно-неоднорідних матеріалів ґрунтується на поєднанні побудованих математичних моделей з аналітичними підходами до визначення швидкостей поширення хвиль у моментому континуумі Коссера. Структура розробленої методики представлена на рис. 1.



Рис. 1. Методика оцінки оптимальності ефективних характеристик структурно-неоднорідних матеріалів

Відповідно до розробленої методики, на першому етапі необхідно визначити розмірні фактори та механічні характеристики досліджуваних структурно-неоднорідних матеріалів на основі розроблених у [5] методик. У таблиці 1 наведено експериментальні дані для таких типів піни: WF300, WF110 та WF55, що отримані R.S.Lakes [5-7].

Таблиця 1

Значення характеристик поліуретанових піні [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

| Тип піни | WF300 | WF110 | WF51 |
|--|-------|-------|------|
| Модуль зсуву G , МПа | 285 | 104 | 65 |
| Розмірний ефект при згині ℓ_b , мм | 0.77 | 0.33 | 0.55 |
| Стала моментної теорії пружності, N^2 | 0.04 | 0.04 | 0.01 |
| Розмір комірок h , мм | 0.65 | 0.5 | 0.4 |
| Густина матеріалу ρ , кг/м ³ | 380 | 340 | 60 |

Аналіз числових даних показав, що у випадку пінополіуретанів на другому етапі для побудови моделі зміни механічних характеристик піни (модуля зсуву) при зміні густини та пористості матеріалу найбільш ефективною є модель Кобба-Дугласа [9]:

$$G = a_G \cdot h^{b_G} \cdot \rho^{c_G}. \quad (1)$$

Значення сталих a_G , b_G , c_G визначено методами регресійного аналізу:

$$a_G = 4.259 \cdot 10^{21}, b_G = 3.9425, c_G = -0.236. \quad (2)$$

Для розрахунку швидкості поширення хвиль у пінистому середовищі при низькочастотних навантаженнях використано формулу [8]:

$$V_l^2 = \frac{c_2^2 + c_3^2}{\frac{c_2^2}{2\ell_c^2 \omega^2} - \aleph - 1 + \sqrt{\left(\frac{c_2^2}{2\ell_c^2 \omega^2} - \aleph - 1\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{\omega_*^2}\right) \frac{\aleph}{\ell_c^2}}}, \quad (3)$$

де

$$c_2^2 = \frac{G}{\rho}; c_3^2 = \frac{\kappa}{2\rho}; \ell_c^2 = \frac{\gamma}{2\kappa}; \aleph = \frac{c_2^2 + c_3^2}{c_2^2}; \omega_*^2 = \frac{2\kappa}{J}, \quad (4)$$

c_2 — швидкість хвиль зсуву, c_3 — швидкість хвиль обертання у моментному континуумі Коссера, ℓ_c — розмірний фактор [10], \aleph — моментна стала [8], ω_* — характерна частота, γ , κ — механічні

характеристики матеріалу у моментному континуумі Коссера [8, 10], J — момент інерції обертання одиничного об'єму [10].

На четвертому та п'ятому етапах відбувається аналіз зміни швидкостей поширення хвиль у пінистих середовищах. На основі розробленої моделі на другому етапі розраховується значення механічних характеристик піноматеріалів при зміні розміру пор та густини матеріалу. На основі формул (4) та (3) можна дослідити, як впливатиме зміна цих характеристик на зміну швидкостей поширення хвиль зсуву та хвиль обертання, швидкості зсуву-обертання у структурно-неоднорідному матеріалі.

На рис. 2 представлено результати числових досліджень впливу зміни швидкості поширення хвиль у пінистих матеріалах при зміні їх густини та пористості, отримані на основі розробленої методики. Вихідними параметрами для симуляційного аналізу були вибрані механічні характеристики пінополіуретану WF300. Числові дослідження проведені для випадку зменшення значень густини та розмірів пор матеріалу. Відповідність кривих на рис.2 вказана у таблиці 2.

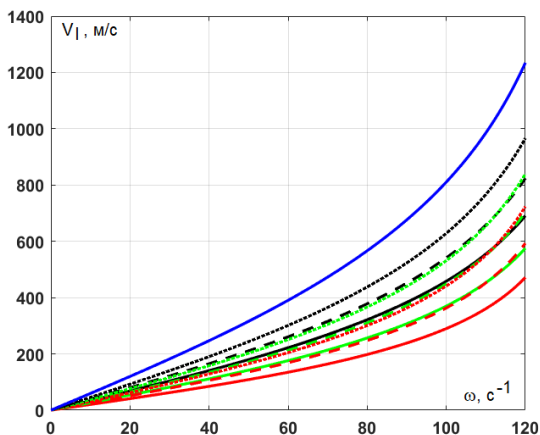


Рис. 2. Зміна швидкості поширення хвиль у пінистих матеріалах

Аналіз числових результатів рис. 2 показує, що зменшення пористості та густини матеріалу призводить до зниження швидкості поширення хвиль зсуву-обертання у пінистому середовищі.

Такий симуляційний аналіз дозволяє не тільки оптимізувати експлуатаційні характеристики матеріалу, а й визначити оптимальні

значення величин густини та пористості піни для отримання максимально потрібних результатів.

Таблиця 2

Зміна густини та пористості досліджуваних матеріалів

| | $h, \text{мм}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | Колір кривої | Тип кривої |
|--------------|----------------|-----------------------|--------------|------------|
| WF300 | 0.77 | 380 | Синій | _____ |
| | 0.65(-10%) | 342(-10%) | Чорний | |
| | 0.585(-20%) | 342(-10%) | Зелений | |
| | 0.52(-30%) | 342(-10%) | Червоний | |
| | 0.585(-20%) | 304(-20%) | Чорний | ----- |
| | 0.52(-30%) | 304(-20%) | Зелений | ----- |
| | 0.455(-40%) | 304(-20%) | Червоний | ----- |
| | 0.52(-30%) | 266(-30%) | Чорний | _____ |
| | 0.455(-40%) | 266(-30%) | Зелений | _____ |
| | 0.39 (-50%) | 266(-30%) | Червоний | _____ |

Висновки. Запропонований у роботі підхід, що ґрунтується на методі аналітико-числового моделювання у поєднанні з використанням експериментальних досліджень, може бути використаний не лише для спінених, а й пористих та інших типів структурно-неоднорідних матеріалів. Перевагою такого підходу є можливість без спеціальних лабораторних досліджень оцінити зміну механічних характеристик спінених матеріалів, які широко використовуються у виробництві, зокрема, й у будівництві. Такий підхід значно розширює сферу застосування спінених полімерів та дозволяє оптимізувати їх використання.

References

1. Azimi, H., JAHANI, D., Mohebifar, A., Yazdan, M.: Optimization of mechanical properties of PP-polymer foam fabricated via extruder. Journal of Applied Research of Chemical -Polymer Engineering, 5(1): 105-120 (2021).
2. Visser, C., Amato, D., Mueller, J., Lewis, J.: Architected Polymer Foams via Direct Bubble Writing. Advanced Materials 31(46), 1904668 (2019).
3. Leontiadis, K., Tsiptsias C., Messaritakis, S., Terzaki, A., Xidas, P., Mystikos, K., Tzimpilis, E., Tsvintzelis, I.: Optimization of Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene-Wollastonite Composite Drawn Fibers Based on Surface Response Analysis. Polymers 14(5), 924 (2022).
4. Chen, Sh., Lei, Sh., Zhu Ju., Zhang T.: The Influence of Microstructure on Sound Absorption of Polyurethane Foams through Numerical Simulation. Macromoleculal Theory and Simulation, 30(5), 2000075 (2021).

5. Lakes, R.: Experimental evaluation of micromorphic elastic constants in foams and lattices. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik* 74, 31 (2023).
6. Lakes, R.: Softening of Cosserat sensitivity in a foam: Warp effects. *International Journal of Mechanical Sciences* 192, 106125, (2021).
7. Lakes, R.: Cosserat shape effects in the bending of foams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2086328 (2022).
8. Mikulich, O.: Wave Propagation Speed Analysis in Polyurethane Foams. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 465–472 (2023).
9. Mahaboob, B., Ajmath, K., Venkateswarlu, B., Narayana C., Praveen J.: On Cobb-Douglas production function model. *AIP Conference Proceedings*, 2177, 020040 (2019).
10. Erofeev, V.I.: *Wave Processes in Solids with Microstructure*. World Scientific, Singapore (2003).

Література

1. Azimi, H., JAHANI, D., Mohebifar, A., Yazdan, M.: Optimization of mechanical properties of PP-polymer foam fabricated via extruder. *Journal of Applied Research of Chemical -Polymer Engineering*, 5(1): 105-120 (2021).
2. Visser, C., Amato, D., Mueller, J., Lewis, J.: Architected Polymer Foams via Direct Bubble Writing. *Advanced Materials* 31(46), 1904668 (2019).
3. Leontiadis, K., Tsiptsias C., Messaritakis, S., Terzaki, A., Xidas, P., Mystikos, K., Tzimpilis, E., Tsvintzelis, I.: Optimization of Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene-Wollastonite Composite Drawn Fibers Based on Surface Response Analysis. *Polymers* 14(5), 924 (2022).
4. Chen, Sh., Lei, Sh., Zhu Ju., Zhang T.: The Influence of Microstructure on Sound Absorption of Polyurethane Foams through Numerical Simulation. *Macromoleculal Theory and Simulation*, 30(5), 2000075 (2021).
5. Lakes, R.: Experimental evaluation of micromorphic elastic constants in foams and lattices. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik* 74, 31 (2023).
6. Lakes, R.: Softening of Cosserat sensitivity in a foam: Warp effects. *International Journal of Mechanical Sciences* 192, 106125, (2021).
7. Lakes, R.: Cosserat shape effects in the bending of foams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2086328 (2022).
8. Mikulich, O.: Wave Propagation Speed Analysis in Polyurethane Foams. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 465–472 (2023).
9. Mahaboob, B., Ajmath, K., Venkateswarlu, B., Narayana C., Praveen J.: On Cobb-Douglas production function model. *AIP Conference Proceedings*, 2177, 020040 (2019).
10. Erofeev, V.I.: *Wave Processes in Solids with Microstructure*. World Scientific, Singapore (2003).