

METHODOLOGY FOR EVALUATING CHANGES IN PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF FOAM MATERIALSO. Mikulich^{1*}, V. Khvesyk²¹Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine²Liubeshiv Technical College, Liubeshiv, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES

AM
CM

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

ABSTRACT

An analytical-numerical approach for studying the dynamic stress state of foam materials (auxetics) with negative Poisson's coefficients is developed in the article. Auxetics have the property of expanding during axial stretching. This effect results from the unique structure of these materials, which are formed by combining different types of nanotubes. Special interest in auxetics arises during the development of methods for increasing the operational characteristics of classical materials by creating structures that have adaptive mechanical reactions to external influences. To model the dynamic stress state, the Cosserat moment continuum model with compressed rotation – the couple stress elasticity – was used. The development of the analytical-numerical approach was carried out with the simultaneous use of the Fourier transform in the time variable and the method of integral equations. The use of such an approach made it possible to reduce the solution of a non-stationary problem to a finite system of the issues written in the form of a system of integral equations with established singular features. Analytical equations for determining radial stresses in the medium in integral form were obtained in the article. Numerical modelling was carried out for the case of an infinite structural-inhomogeneous medium weakened with tunnel cavities. The numerical analysis was carried out for the case under the action of an impulse load applied to the boundary of the tunnel cavity in the radial direction. Based on the developed approach, the distribution of dynamic radial stresses in foam materials with a positive and negative Poisson's ratio was studied. The impact of the impulse duration on the stress state of the bodies made with classical and auxetic foam was studied. The developed approach makes it possible to evaluate the influence of the change in the microstructure of the material on the propagation of non-stationary processes in foam materials with a positive and negative Poisson's ratio.

Key words:

impulse loading,
moment stresses,
auxetics,
foam materials,
dynamic stress state

Article history:

Received 02.09.2022

Accepted 20.10.2022

***Corresponding author:**

shyprao@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi48.893

To cite this article:

Mikulich, O., & Khvesyk, V. (2022). Methodology for evaluating changes in performance characteristics of foam materials. *Agricultural Machines*, 48, 110-117. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.893>

УДК 539.3

**МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЗМІНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПІНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ****О.А. Мікуліч^{1*}, В.О. Хвесик²**¹Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна²Любешівський технічний коледж, Любешів, Україна

AGRICULTURAL MACHINES

**АМ
СМ**

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

АНОТАЦІЯ

Розроблено аналітично-числовий підхід для дослідження динамічного напруженого стану пінистих матеріалів із від'ємним коефіцієнтів Пуассона – ауксетиків. Ауксетики мають властивість розширюватися за осьового розтягу. Цей ефект є результатом особливої структури таких матеріалів, що формуються шляхом комбінації різних видів нанотрубок. Особливий інтерес до ауксетиків виникає під час розроблення методів підвищення експлуатаційних характеристик класичних матеріалів шляхом створення структур, що мають адаптивні механічні реакції на зовнішні впливи. Для моделювання динамічного напруженого стану використано модель моментного континууму Коссера зі стисненим обертанням – моментну теорію пружності. Побудови аналітично-числового підходу здійснено за сумісного використання перетворення Фур'є за часом та методу інтегральних рівнянь. Використання цього підходу дозволило звести розв'язання нестационарної задачі до скінченної системи задач, що записані у вигляді системи інтегральних рівнянь, які мають усталені сингулярні особливості. Отримано залежності для визначення радіальних напружень у середовищі в інтегральній формі. Числове моделювання проведено для випадку нескінченного структурно-неоднорідного середовища, що послаблене тунельними порожнинами. Числовий аналіз проведено для випадку дії імпульсного навантаження, що прикладене до границі тунельної порожнини у радіальному напрямку. На основі розробленого підходу досліджено розподіл радіальних напружень у пінистих матеріалах із додатнім та від'ємним коефіцієнтом Пуассона і вивчено вплив тривалості імпульсу на напружений стан тіл. Розроблений підхід дозволяє оцінити вплив зміни мікроструктури матеріалу на перебіг нестационарних процесів у пінистих матеріалах із додатнім та від'ємним коефіцієнтом Пуассона.

Ключові слова:

імпульсне навантаження,
моментні напруження,
ауксетики,
пінисті матеріали,
динамічний напружений стан

Історія публікації:

Отримано 02.09.2022

Затверджено 20.10.2022

***Автор для листування:**

shyprao@gmail.com

DOI: 10.36910/acm.vi48.893

Цитувати цю статтю:

Мікуліч, О. А., & Хвесик, В. О. (2022). Методика оцінювання зміни експлуатаційних характеристик пінистих матеріалів. *Сільськогосподарські машини*, 48, 110-117. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.893>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В останні роки значна кількість наукових праць присвячена створенню нового класу матеріалів – ауксетиків, що мають від’ємний коефіцієнт Пуассона. Цей ефект є результатом особливої структури цих матеріалів, що формуються шляхом комбінації різних видів нанотрубок. Особливий інтерес до ауксетиків виникає під час розроблення наукових методів підвищення експлуатаційних характеристик класичних матеріалів шляхом створення структур, що мають адаптивні механічні реакції на зовнішні впливи. Переважна кількість наукових досліджень, результати яких представлені у технічній літературі, присвячена пінистим ауксетик-матеріалам, що мають широке застосування та можуть бути виготовлені із полімерів.

У зв’язку зі зростанням вимог до конструкційних матеріалів в останні роки широкого розвитку набули неруйнівні методи діагностування матеріалів (*Ostash et al., 2013; Ostash et al., 2014; Skalsky et al., 2014; Куриляк & Назарчук, 2011*), що можуть бути застосовані для дослідження властивостей ауксетиків.

У науковій праці *Evans (1991)* описано інтерес до ауксетиків у зв’язку з особливими властивостями цих матеріалів: модуль зсуву цих матеріалів може істотно перевищувати їх об’ємний модуль пружності, що діаметрально протилежно порівняно із класичними матеріалами. У науковій праці *Kurashige et al. (2005)* описані дослідження поведінки пінистих середовищ, насичених рідиною, за дії раптового навантаження. Матеріали із від’ємним коефіцієнтом Пуассона мають особливі акустичні властивості, що пов’язані із структурою ауксетиків (*Chen & Lakes, 1989*).

Основний метод отримання пінистих ауксетичних матеріалів, який описано у наукових працях (*Brandel & Lakes, 2001; Friis et al., 1988; Lakes, 1991; Lakes, 2016; Rueger & Lakes, 2016*), полягає у всебічному стиску початкового пінистого середовища із його нагріванням до температури розм’якшення та подальшим охолодженням до кімнатної температури.

Аналіз мікроструктури отриманих піно-ауксетичних середовищ показав, що у процесі отримання матеріалу ребра пор прогинаються усередину, тому за розтягу цих тіл поперечний

переріз збільшується, як описано у науковій праці (*Friis et al., 1988*). Значна кількість наукових робіт присвячена дослідженню особливих властивостей матеріалів із від’ємним коефіцієнтом Пуассона. У науковій праці (*Rueger & Lakes, 2016*) визначено пружні характеристики пінистих ауксетиків, причому, із урахуванням впливу мікроструктури середовища. З огляду на зазначене, вивчення поведінки таких нетрадиційних матеріалів як ауксетики є важливим із точки зору фундаментальних досліджень та практичного застосування.

Мета дослідження – розроблення методики оцінювання зміни експлуатаційних характеристик пінистих ауксетик-середовищ, що послаблені тунельними порожнинами довільного перерізу, за дії імпульсного навантаження, яке прикладене до їх границі. Аналітико-числова методика розроблена для поліуретанових структур у рамках псевдо-континуума Коссера, що дає можливість ураховувати вплив мікроструктури матеріалу.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо пружне пінисте ізотропне ауксетик-середовище, послаблене тунельною порожниною. Позначимо через L його границю. Віднесемо його до Декартової системи координат $x_1x_2x_3$ (рис. 1), яку розмістимо у центрі ваги тіла (точка O). Вісь x_3 спрямуємо вздовж осі перерізу.

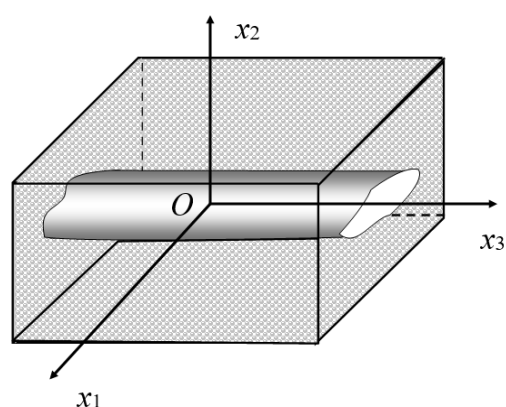


Рис. 1 – Моделювання об’єкту дослідження

Дослідимо розподіл у тілі динамічних радіальних напружень за дії імпульсного навантаження, що прикладене до границі порожнини. За числових розрахунків зміну

інтенсивності імпульсу з часом представимо у вигляді:

$$\phi(\tau) = p_* \tau^{n_*} e^{-\alpha_* \tau}, \tau > 0, n_* \geq 0, \quad (1)$$

де p_* , n_* , α_* – сталі; $\tau = c_1 t/a$ – безрозмірний часовий параметр; c_1 – швидкість хвиль розширення, $c_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$; ρ – густина; μ , λ – сталі Ляме; a – деякий характерний розмір.

Дослідження динамічного напруженого стану пінистих середовищ проведемо із використанням рівняння моментної теорії пружності зі стисненим обертанням – апарат псевдоконтинууму Коссера, що враховують внутрішній момент кількості руху мікрочастинок (Savin & Shulga, 1967):

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } u + \text{rot rot} \left(\frac{B}{4} \Delta u - \mu u \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де Δ – оператор Лапласа; $u(x, t) = [u_j(x, t)]$, $j = 1, 2$ – вектор переміщень; $x = (x_1, x_2)$; B – стала, що відповідає мікроструктурі матеріалу ($B = \gamma + \varepsilon$).

Граничні умови задачі записуються у вигляді:

$$\sigma_r|_L = \sigma_0 \phi(t), \tau_{r\theta}|_L = 0. \quad (3)$$

Представимо вектор переміщень $u(x, t)$ у вигляді суми потенціальної φ та вихрової ψ функцій:

$$u = \text{grad} \varphi + \text{rot} \bar{\psi}. \quad (4)$$

Підставивши (4) у рівняння (2), отримаємо два рівняння гіперболічного та параболічного типу:

$$\Delta \varphi - \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

$$l^2 \Delta \psi - \Delta \psi + \frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0, \quad (6)$$

де c_2 – швидкість хвиль зсуву, $c_2 = \sqrt{\mu/\rho}$; l – масштабний фактор, $l^2 = B/(4\mu)$.

Із отриманих рівнянь (5) та (6) зрозуміло, що у моментному псевдоконтинуумі Коссера хвилі зсуву і хвилі поперечного обертання мають дисперсійні властивості та утворюють хвилі зсуву-обертання.

Застосуємо до отриманих хвильових рівнянь перетворення Фур'є за часовою змінною t :

$$\tilde{f}(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-i\omega t} dt, \quad (7)$$

Це дозволить визначити швидкість поширення хвиль:

$$c_3 = \sqrt{c_2(\sqrt{c_2^2 + 4l^2\omega^2} + c_2)}/2, \quad (8)$$

$$c_4^2 = \sqrt{c_2(\sqrt{c_2^2 + 4l^2\omega^2} - c_2)}/2. \quad (9)$$

Залежності (8) та (9) показують, що при $l \rightarrow 0$ швидкість першої з хвиль $c_3 \rightarrow c_2$, а друга, з уявним хвильовим числом $i\omega/c_4$, зникає.

Застосовуючи перетворення Фур'є (7) до рівняння (2), отримаємо аналоги рівнянь усталених коливань із циклічною частотою ω :

$$(\lambda + \mu) \partial_j \tilde{\theta} + \frac{B}{4} \Delta \partial_j \tilde{\theta} - \frac{B}{4} \Delta \Delta \tilde{u}_j + \mu \Delta \tilde{u}_j + \omega^2 \tilde{u}_j = 0, \quad (10)$$

де \tilde{u}_j – Фур'є-зображення переміщень; $\tilde{\theta} = \partial_j \tilde{u}_j$.

Виокремивши вплив часового фактору, подальші дослідження будемо проводити в області Фур'є-зображень. Граничні умови задачі в зображеннях зводяться до вигляду:

$$\tilde{\sigma}_r|_L = \sigma_0 \tilde{\phi}(\omega), \tilde{\tau}_{r\theta}|_L = 0, \quad (11)$$

де $\tilde{\phi}(\omega)$ – Фур'є-зображення функції (1).

Для розв'язання поставленої задачі в області Фур'є-зображень використаємо метод граничних інтегральних рівнянь. У випадку першої основної задачі потенціальне зображення загального розв'язку для переміщень виберемо у вигляді, що представлено у науковій праці (Bonnet, 1995):

$$\tilde{y}_k(x, \omega) = \int_L p_j(x^0, \omega) \cdot U_{jk}^*(x, x^0, \omega) ds, \quad (12)$$

де p_1, p_2 – невідомі потенціальні функції; $k = 1, 2$; L – границя перерізу тунельної порожнини.

Інтегрування рівняння (12) вздовж границі проводиться за змінними $x^0 = \{x_1^0; x_2^0\}$.

У рамках моментного псевдоконтинууму Коссера представлення для зображень U_{jk}^* побудоване для випадку врахування умови випромінювання Зомерфельда:

$$U_{jk}^* = U_{jk}^{*kl} + U_{jk}^{*m}, \quad (13)$$

де U_{jk}^{*kl} – фундаментальний тензор переміщень класичної теорії пружності.

Фундаментальний тензор переміщень класичної теорії пружності:

$$U_{jk}^{*kl} = \frac{1}{2\pi\mu} (K_0(\kappa_2 r) \delta_{jk} + \frac{1}{\kappa_2^2} \partial_k \partial_j (K_0(\kappa_1 r) - K_0(\kappa_2 r))), \quad (14)$$

де U_{jk}^{*m} – фундаментальний тензор, який враховує оберально-зсувні деформації у псевдоконтинуумі Коссера.

Фундаментальний тензор, що враховує вплив оберально-зсувних деформацій у псевдоконтинуумі Коссера:

$$U_{jk}^{*m} = -\frac{D}{2\pi\mu} \Delta (\Delta \delta_{jk} - \partial_k \partial_j) D_m K_0(\kappa_m r), \quad (15)$$

де $\kappa_m = i\omega/c_m$; $m = 2, 3, 4$ – хвильові числа; $K_0(\kappa_m r)$ – модифікована функція Бесселя третього роду нульового порядку (функція Макдональда); $r = \sqrt{(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2}$ – відстань; $j, k = 1, 2$.

Сталі рівняння (15):

$$D = \frac{c_3^2 c_4^2}{\omega^2 (c_3^2 + c_4^2)},$$

$$D_m = \left(\frac{1}{\kappa_m^2 - \kappa_3^2} - \frac{1}{\kappa_m^2 - \kappa_4^2} \right) \delta_{m2} - \frac{\delta_{m3}}{\kappa_{m-1}^2 - \kappa_m^2} + \frac{\delta_{m4}}{\kappa_{m-2}^2 - \kappa_m^2}.$$

Для задоволення умов на границі порожнини (11) розрахуємо напруження за формулами (Savin & Shulga, 1967):

$$\tilde{\sigma}_r = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \frac{1}{4} (e^{-2i\theta} (\sigma_{11} - \sigma_{22} + i(\tau_{12} + \tau_{21})) + e^{2i\theta} (\sigma_{11} - \sigma_{22} - i(\tau_{12} + \tau_{21}))), \quad (16)$$

$$\tilde{\tau}_{r\theta} = \frac{\tau_{12} - \tau_{21}}{2} + \frac{i}{4} (e^{2i\theta} (\sigma_{11} - \sigma_{22} - i(\tau_{12} + \tau_{21})) - e^{-2i\theta} (\sigma_{11} - \sigma_{22} + i(\tau_{12} + \tau_{21}))), \quad (17)$$

де θ – кут між нормаллю до площинки та віссю Ox_1 .

Підставляючи (12) з урахуванням виразів (14)–(15) у формули (16) та (17), отримаємо інтегральні представлення виду:

$$\tilde{\sigma}_r = \int_L (f_j(x, x^0) p_j) ds, \quad (18)$$

$$\tilde{\tau}_{r\theta} = \int_L (g_j(x, x^0) p_j) ds, \quad (19)$$

де f_j, g_j – відомі функції.

Виокремивши нерегулярні складові підінтегральних функцій та провівши граничний перехід на основі формул Племеля-Сохоцького у залежностях (18) та (19), отримаємо систему інтегральних рівнянь для визначення невідомих на границі функцій:

$$\text{Re}(q)/2 + \mathbf{v.p.} \int_L f_1(x, x^0) q d\zeta + \mathbf{v.p.} \int_L f_2(x, x^0) \bar{q} d\bar{\zeta} = \sigma_0 \tilde{\phi}(\omega), \quad (20)$$

$$\text{Im}(q(1 - (l/c_2)^2))/2 + \mathbf{v.p.} \int_L g_j(x, x^0) q d\zeta + \mathbf{v.p.} \int_L g_j(x, x^0) \bar{q} d\bar{\zeta} = 0, \quad (21)$$

де $p ds = -iq d\zeta$; $p = p_1 + ip_2$ – невідома функція; $\zeta = x_1^0 + ix_2^0$.

У рівняннях (20) та (21) інтеграл розуміється у сенсі головного значення.

Невідомі на границі функції визначалися числово на основі методики, розвинутої у науковій праці (Shvabyuk et al., 2015), яка ґрунтується на сумісному використанні методу механічних квадратур та колокації. У рамках запропонованого алгоритму для інтегралів, що містять особливості типу Коші, використано квадратурні формули підвищеної точності. Використання цього підходу дозволило звести задачу до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Для дослідження динамічної поведінки пінистих ауксетик-середовищ за дії імпульсного навантаження, що прикладене до границі порожнини, проводився розрахунок радіальних напружень у тлі:

$$\tilde{\sigma}_r = \mathbf{v} \cdot \mathbf{p} \cdot \int_L f_j(x, x^0) p_j ds. \quad (22)$$

Оригінали напружень знаходилися із використанням дискретного оберненого перетворення Фур'є:

$$\sigma_r(T_k) = \frac{2}{T} \operatorname{Re} \left(\sum_{n=0}^{K-1} \tilde{\sigma}_r(\omega_n) \exp\left(2\pi i \frac{nk}{K}\right) - \sum_{n=0}^{K-1} \tilde{\sigma}_r(\omega_n) \right), \quad (23)$$

де K – кількість елементів дискретної вибірки; $\omega_n = 2\pi n/T$ – частоти вибірки; $T_k = kT/K$; $k = 0..K-1$ – фіксовані моменти часу.

Для оптимізації числових розрахунків представлення (23) обчислювалося на основі відомого алгоритму швидкого дискретного перетворення Фур'є (Ramamohan et al., 2010) при $K = 2^m$ (де m – ціле додатне число).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Із використанням розробленої методики досліджено динамічний напружений стан пінистого ауксетик-середовища, послабленого тунельною циліндричною порожниною. Числові розрахунки динамічних радіальних напружень виконані для пінистого поліуретану із від'ємним коефіцієнтом Пуассона, для якого у науковій праці (Rueger & Lakes, 2016) визначено фізичні характеристики: густина –

$\rho = 96 \text{ кг/м}^3$; модуль зсуву – $G = 16 \text{ кПа}$; масштабний фактор – $l = 2,3 \text{ мм}$; коефіцієнт Пуассона – $\nu = -0,8$.

Цей ауксетик-матеріал отримано із пінистого поліуретану з характеристиками: густиною, яка становить $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$; модулем зсуву $G = 45 \text{ кПа}$ та додатнім коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0,4$. Матеріал отримано шляхом всебічного стискання із нагріванням до температури розм'якшення. У результаті ребра пор матеріалу вгинаються всередину. За дії розтягувального навантаження цей матеріал розширюється внаслідок розкриття на зовні увігнутих ребер пор. Результати числових розрахунків відносних радіальних динамічних напружень для пінистого матеріалу із від'ємним значенням коефіцієнта Пуассона представлені на **рис. 2, а**. Аналогічні результати розрахунків для пінистого матеріалу з додатнім коефіцієнтом Пуассона, отримані у праці (Мікуліч, 2017), показані на **рис. 2, б**. Числові розрахунки для тривалості імпульсу $\tau^* = 1$ виконано для випадку, коли прикладене до границі навантаження задане у вигляді представлення (1) при $\alpha^* = 10$, $p^* = 185$, $n^* = 2$.

Аналізуючи графічні залежності на **рис. 2** доходимо висновку, що за дії імпульсного навантаження розподіл радіальних напружень у пінистому середовищі має знакозмінний характер. Поширення імпульсної хвилі в ауксетиках та неауксетиках характеризується наявністю полів як розтягувальних (під час проходження імпульсу), так і стискувальних (після проходження імпульсу) напружень. Стискувальні напруження, що виникають після проходження імпульсного навантаження у пінистих матеріалах із від'ємним коефіцієнтом Пуассона є меншими у 2,2 рази порівняно із відповідними напруженнями для початкового матеріалу.

Числові розрахунки продемонстрували, що в ауксетик-матеріалах за дії імпульсного навантаження є незначна коливність розподілу динамічних напружень у межах 0,5–1%. Для дослідження цього ефекту проведено числові розрахунки для різної тривалості імпульсу прикладеного навантаження.

На **рис. 3** представлені результати для випадку, коли тривалість імпульсу становить $\tau^* = 0,5$. Аналізуючи графічні залежності на **рис. 3** доходимо висновку, що за зменшення тривалості імпульсу відбувається зростання

коливності розподілу відносних динамічних радіальних напружень, що пов'язано із мікроструктурою ауксетиків. Це також підтвердили числові розрахунки для імпульсів тривалістю $\tau^* = 0,25$ та $\tau^* = 0,1$. Для $\tau^* = 0,5$ коливність розподілу динамічних напружень становить близько 2%, а для $\tau^* = 0,1$ – 6,5–7%.

Проведені числові розрахунки для пінистих ауксетик-матеріалів із значеннями

коефіцієнта Пуассона $\nu = -0,13$ (Lakes & Lowe, 2000), $\nu = -0,19$ (Friis et al., 1988), $\nu = -0,26$ (Lakes & Lowe, 2000) демонструють, що за зміни коефіцієнта Пуассона коливність розподілу радіальних напружень зменшується. Одночасно виконані числові розрахунки для пінистих матеріалів із додатнім коефіцієнтом Пуассона за різної тривалості навантаження цих ефектів не виявили.

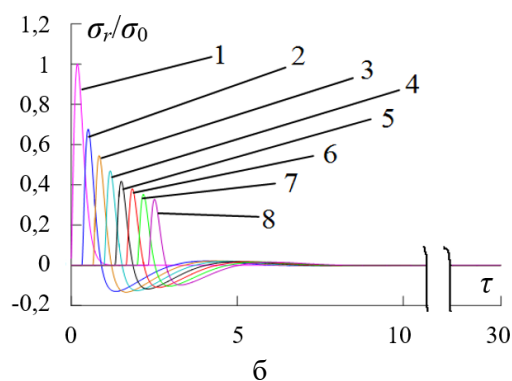
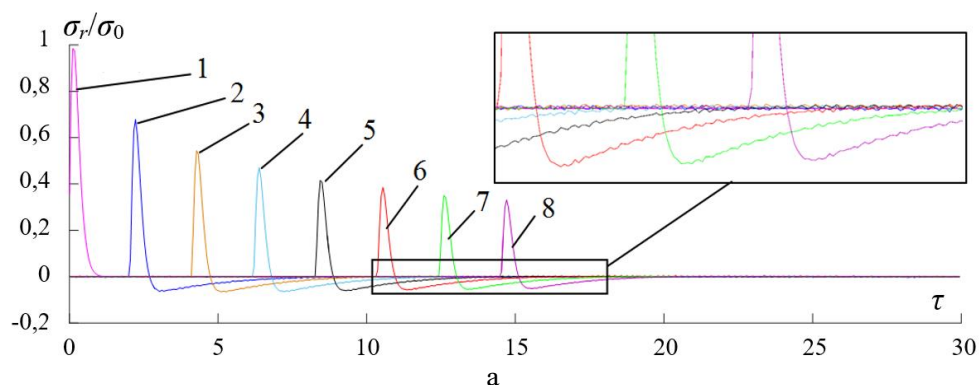


Рис. 2 – Розподіл динамічних радіальних напружень у пінистому поліуретані з від'ємним (а) та додатнім (б) коефіцієнтом Пуассона:

1 – на границі порожнини; 2–8 – у перерізах на відстані $\delta = (2 \dots 8)R$ від центру порожнини

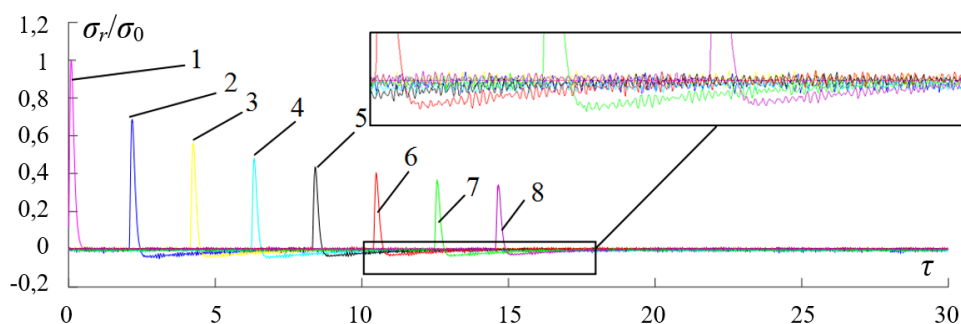


Рис. 3 – Розподіл динамічних радіальних напружень у пінистому поліуретані із від'ємним коефіцієнтом Пуассона за тривалості імпульсу $\tau^* = 0,5$

ВИСНОВКИ

Запропонована методика дослідження динамічного напруженого стану ауксетик-середовищ ґрунтується на сумісному використанні перетворення Фур'є за часом, методу граничних інтегральних рівнянь та методу механічних квадратур. Застосування дискретного перетворення лише на етапі пошуку оригіналів напружень забезпечує високу точність запропонованого підходу.

Також досліджено розподіл динамічних радіальних напружень у пінистих матеріалах із від'ємним коефіцієнтом Пуассона за дії імпульсного навантаження, що прикладене до границі порожнини на основі рівнянь моментного псевдоконтинууму Коссера.

Числові розрахунки показали, що за зменшення тривалості дії прикладеного імпульсу проходження фронту хвилі у пінистих матеріалах із від'ємним коефіцієнтом Пуассона пов'язане з наявністю мікрозбурень, які виникають внаслідок обертальних переміщень мікрочастинок ауксетиків. Швидкість поширення хвиль у пінистих ауксетиках є меншою у 6 разів, ніж у пінистих матеріалах із додатнім коефіцієнтом Пуассона, що підтверджує ефективність їх використання для віброзахисту.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Bonnet, M. (1995). *Integral equations and boundary elements. Mechanical application of solids and fluids. (Équations intégrales et éléments de frontière. Application en mécanique des solides et des fluids)*. Paris, CNRS Éditions / Éditions EYROLLES.
- Brandel, B., & Lakes, R. S. (2001). Negative Poisson's ratio polyethylene foams. *Journal of Material Science*, 36, 5885-5893.
- Chen, C. P., & Lakes, R. S. (1989). Dynamic wave dispersion and loss properties of conventional and negative Poisson's ratio polymeric cellular materials. *Journal of Cellular Polymers*, 8, 343-359.
- Evans, K. E. (1991). Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour*, 15(4), 170-174.
- Friis, E. A., Lakes, R. S., & Park, J. B. (1988). Negative Poisson's ratio polymeric and metallic materials. *Journal of Material Science*, 23, 4406-4414.
- Kurashige, M., Sato, M., & Imai, K. (2005). Mandel and Cryer problems of fluid-saturated foams with negative Poisson's ratio. *Acta Mechanica*, 175(1-4), 25-43.
- Lakes, R. S. (1991). Experimental micro mechanics methods for conventional and negative Poisson's ratio cellular solids as Cosserat continua. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 113, 148-155.
- Lakes, R. S. (2016). Physical meaning of elastic constants in Cosserat, void, and microstretch elasticity. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 11(3), 217-229.
- Lakes, R. S., & Lowe, A. (2000). Negative Poisson's ratio foam as seat cushion material. *Cellular Polymers*, 19, 157-167.
- Ostash, O. P., Kiva, D. S., Uchanin, V. M., Semenets', O. I., Andreiko, I. M., & Golovatyuk, Yu. V. (2013). Diagnostics of technical condition of aircraft structures after long-term service. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 2, 15-22.
- Ostash, O. P., Vol'demarov, O. V., & Hladysh, P. V. (2014). Diagnostics of the structural-mechanical state of steels of steam pipelines by the coercimetric method and prediction of their service life. *Materials Science*, 49(5), 667-680.
- Ramamohan, K., Kim, D., & Hwang, J. (2010). *Fast Fourier transform: algorithms and applications*. New York, Springer.
- Rueger, Z., & Lakes, R. S. (2016). Cosserat elasticity of negative Poisson's ratio foam: experiment. *Smart Materials and Structures*, 25, 100-108.
- Savin, G. N., & Shulga, N. A. (1967). Dynamic plane problem of the moment theory of elasticity. *Applied Mechanics*, 3(6), 216-221.
- Shvabyuk, V., Sulym, H., & Mikulich, O. (2015) Stress state of plate with incisions under the action of oscillating concentrated forces. *Acta Mechanica et Automatica*, 9(3), 140-144.
- Skalsky, V., Nazarchuk, Z., Hirnyj, S., & Dobrovolska, L. (2014). Acoustic emission during crack propagation in nuclear RPV steels. *International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies*, 1, 45-48.
- Куриляк, Д. Б., & Назарчук, З. Т. (2011). Розвиток методів аналітичної регуляризації в теорії дифракції (*Development of analytical regularization methods in diffraction theory*). *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 47(2), 42-55.
- Мікулич, О. А. (2017). Розрахунок напруженого стану пінистих матеріалів за динамічних навантажень (*Calculation of the stress state of foam materials under dynamic loads*). *Наукові нотатки*, 58, 243-247.