

УДК 677.025

О.П. КИЗИМЧУК, В.Г. ЗДОРЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ АУКЗЕТИК МАТЕРІАЛІВ

У статті розглянуто геометричні моделі структур, які дають можливість реалізувати здатність аукзетик матеріалів розширюватися при розтягненні та зменшуватися по ширині при стисканні. Автором проаналізовано існуючі класифікації аукзетик матеріалів та детально розглянуто класифікацію за принципом організації структури матеріалу, у відповідності до якої розділяють реентерабельні та стержньові структури, структури обертання та ламінати кутового згину, тверді молекули, мікропористі та рідкокристалічні полімери. В статті розглянуті приклади геометричних структур кожного класу та наведено відповідні формули для розрахунку коефіцієнту Пуассону, які доводять можливість отримання його від'ємного значення.

Ключові слова: аукзетик матеріал, коефіцієнт Пуассона, структури обертання, стержньові структури, реентерабельні структури.

Останніми роками зростає зацікавленість у матеріалах з незвичними властивостями. Серед таких матеріалів особливе місце посідають аукзетик матеріали, які здатні розширюватися при розтягненні та звужуватися при стисканні [1]. І саме це привертає увагу науковців всього світу до розробки та вироблення таких матеріалів. На сьогоднішній день різноманітні структури та моделі запропоновані для досягнення аукзетик ефектів в матеріалах.

Існує декілька підходів до класифікації аукзетик матеріалів: за походженням матеріалу [2] (природні, біологічні, синтезовані); за можливим технічним використанням [3] (композиційні матеріали, пористі та гранульовані матеріали, кристалічні тіла, молекули тощо); за рівнем створення структури [3] (макроскопічний, мезоскопічний, мікроскопічний, молекулярний). Однак самою розповсюдженою є класифікація за принципом організації структури матеріалу та її механіки [4, 5]. За даним принципом головні аукзетик структури можна розділити на наступні класи: реентерабельні дво- та тривимірні структури [6, 7], стержньові структури [8], жорсткі та напівжорсткі структури обертання [9, 10], ламінати кутового згину [11], тверді молекули [12], мікропористі полімери [13] та рідкокристалічні полімери [14].

Дані геометричні структури дозволяють краще зрозуміти як аукзетик ефекти можуть бути досягнуті, як такі матеріали можуть бути вироблені і які властивості можуть бути оптимізовані та прогнозовані. В даній статті наведено систематизований огляд геометричних моделей структур аукзетик матеріалів.

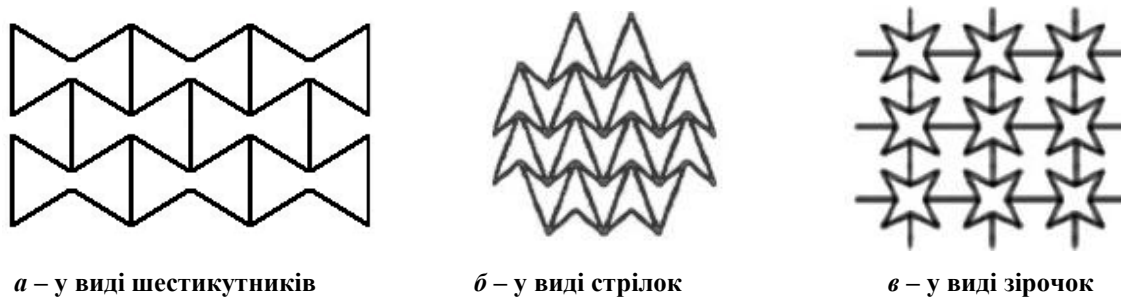
Постановка завдання

Метою цієї роботи є аналіз геометричних структур, які визначають особливості властивостей аукзетик матеріалів.

Результати та їх обговорення

Реентерабельна структура - структура, у якої кут в багатокутнику більший за 180° , тобто маємо ребро, яке спрямовано усередину [4]. Вперше [6] макроскопічна аукзетик структура була представлена у вигляді стільників зі видозмінених шестикутників (рис.1.а). Теоретично, при прикладенні одновісного навантаження, діагональні ребра такої структури вирівнюються, що призводить до розширення матеріалу, тобто маємо аукзетик ефект. Але в дійсності, у більшості стільників такого типу відбувається

згинання ребер, що є наслідком їх шарнірного кріплення та осьового розтягування. Однак, згинання ребер також призводить до появи аукзетик ефекту в стільниках такого типу.



a – у виді шестикутників

b – у виді стрілок

в – у виді зірочок

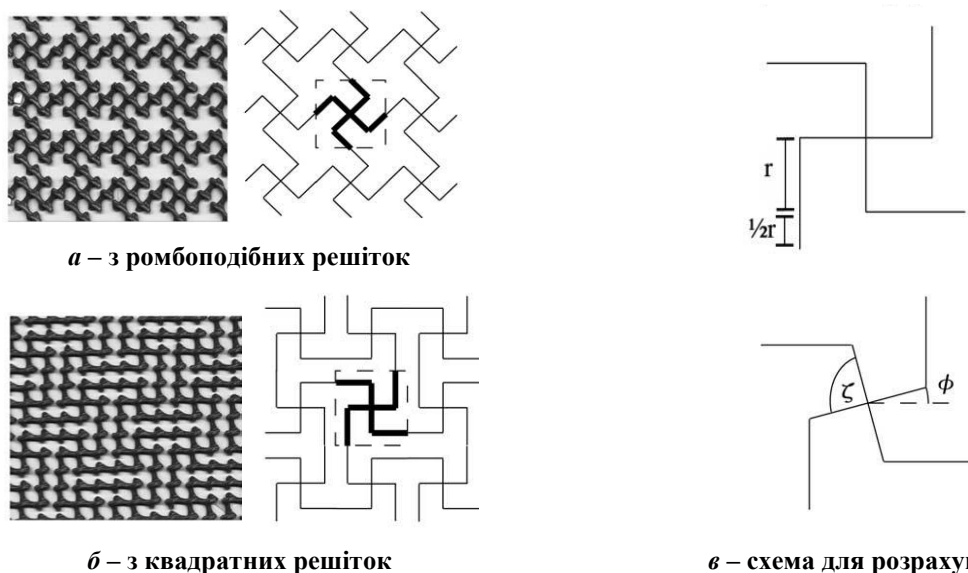
Рис.1. Геометрична модель плоскої структури з видозміненими стільниками

Дана структура описується наступними значеннями коефіцієнту Пуассона

$$\nu_{12} = \frac{\sin \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{\cos^2 \theta} \quad (1)$$

де h , l та θ – геометричні розміри чарунки, a – глибина чарунки,

Аукзетик ефекти можуть бути отримані і в інших видозмінених структурах. Так при однобічному розтяганні стільникових структур у вигляді подвійних стрілок (рис. 1, *b*) [15] або зірочок (рис. 1, *в*) [7] відбудеться переміщення та вигин ребер елементарного стільника, що також є проявом аукзетик властивості даних структур. Інші дві структури на основі видозмінених елементарних ланок сформовані з ромбовидних (рис. 2, *a*) та квадратних (рис. 2, *б*) решіток вилученням з них певних зв'язків. Аукзетик ефект в таких структурах отримують шляхом обертання та розширення кожної сторони елементарної ланки. Проведений аналіз таких структур [16] показав, що структури з квадратними елементарними ланками демонструють більший аукзетик ефект, ніж структури з ромбоподібними ланками.



a – з ромбоподібних решіток

б – з квадратних решіток

в – схема для розрахунку

Рис.2. Геометрична модель плоскої стільникової структури

Коефіцієнт Пуассона такої структури (рис.2., в) визначається з наступної залежності:

$$v_{yx} = \frac{\left[\cos \zeta_0 - \varphi_0 + \Delta\varphi \quad k-1 \quad -\cos \zeta_0 - \varphi_0 \right] \left(\frac{3}{2} + \sin \varphi_0 \right)}{\left[\sin \varphi_0 + \Delta\varphi \quad -\sin \varphi_0 \right] \left[\frac{3}{2} + \cos \zeta_0 - \varphi_0 \right]} \quad (2)$$

де $k = \Delta\zeta / \Delta\varphi$ – відношення деформацій кутів. Значення $k=0$ припускає відсутність одночасної деформації.

Наступна плоска аукзетик структура сформована з синусоїдальних зв'язок (рис. 3), аукзетик ефект якої оснований на перетворення видозмінених ланок в прямокутні. Тонка пластина, зроблена на основі такої структури, використовується у медицині для дифузії препаратів [17]. Синусоїдальні зв'язки в таких структурах можуть бути замінені на прямолінійні.

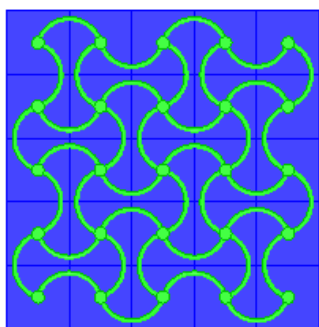
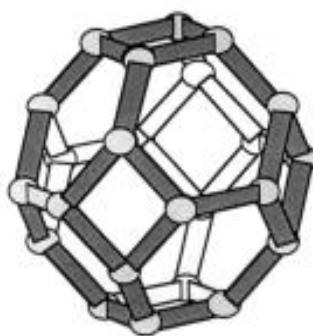
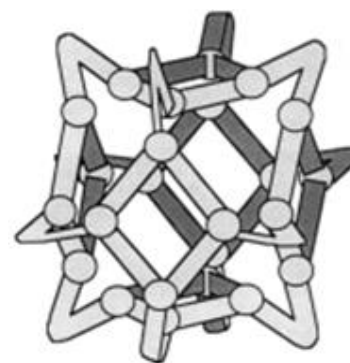


Рис.3. Плоска структура з синусоїдальними зв'язками



а – звичайна



б – видозмінена

Рис.4. Геометрична модель об'ємної структури

Окрім плоских структур з видозміненими елементами, аукзетик ефект можна отримати і при зміні тривимірних структур. Так на (рис.4, а) показана тривимірна елементарна ланка, яка при зміні положення її ребер (рис.4, б) перетворюється в аукзетик структуру [18]. При дії зусиль розтягування вздовж вертикальних ребер такої структури, бокові ребра висуватимуться назовні розширюючи матеріал. І навпаки, при стисканні ребра надалі намагатимуться зігнути до центру структури, зменшуючи елементарну ланку в усіх напрямках. Така модель, завдяки простоті розуміння механізму, найчастіше використовується для пояснення процесів, які відбуваються в аукзетик пінах.

Стержньові структури – інший вид структур, які використовуються для створення аукзетик стільників. В даному виді структур, елементарні ланки спочатку формуються приєднанням прямих елементів до центральних вузлів, які можуть бути як круглими, так і прямокутними, або іншої геометричної форми, а потім елементарні ланки зв'язуються між собою. Аукзетик ефекти досягають після прикладення навантаження в результаті обертання або розвертання стержнів навколо вузлів. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень [8] встановлено що коефіцієнт Пуассона матеріалів на основі такої структури (рис.5, а) наближається до -1. На відміну від інших аукзетик матеріалів, дана структура може підтримувати високий аукзетик ефект у широкому діапазоні деформації.

Стержньові аукзетик структури на даний час найбільше досліджується, особливо з точки зору механічних властивостей та можливості їх математичного опису. Аналітичний опис [8] такої структури полягає у визначенні деформації на основі законів механіки. На основі даної теорії створений та розвинений новий клас композиційних матеріалів (рис.6, в). В таких матеріалах одні й ті самі елементи

(стандартні блоки) формують асиметричні або симетричні структури. Кількість зв'язок між блоками може бути різною, однак стандартними вважаються елементи з 3, 4 або 6 стержнями. Очевидно, що аукзетик ефекти залежать від форми вузла та довжини зв'язок.

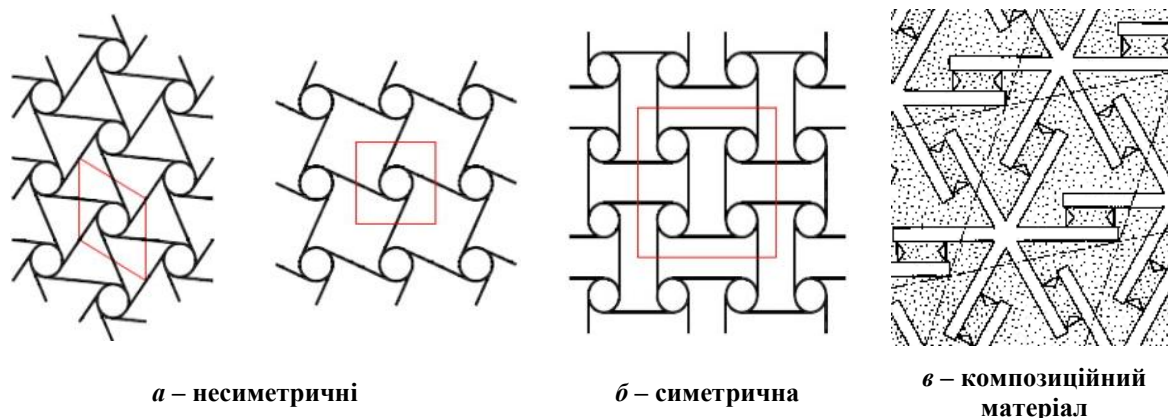


Рис.5. Геометричні моделі плоскої структури зі стержньовими стільниками

Структури обертання знайшли своє розповсюдження для досягнення аукзетик ефекту в пінах та сітчастих полімерах гіпотетичних наноструктур шляхом поєднання трикутників (рис.6, а) [10], квадратів (рис.6, б) [19], прямокутників (рис.6, в) [20] та тетраедрів [21] в певних вершинах. З'єднання може виконуватися шарнірно, або за рахунок пружин. Аукзетик ефект досягається обертанням елементарних ланок при навантаженні.



Рис. 6. Геометричні моделі структур обертання

Механізм структури, яка утворена поєднанням трикутників і яку звичайно називають зіркоподібною, описується наступним значенням коефіцієнту Пуассона:

$$v_{21} = v_{12}^{-1} = \frac{b \cos\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) + a \cos \frac{\theta}{2}}{b \sin\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) \tan\left(2\alpha + \frac{\theta}{2}\right) + a \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

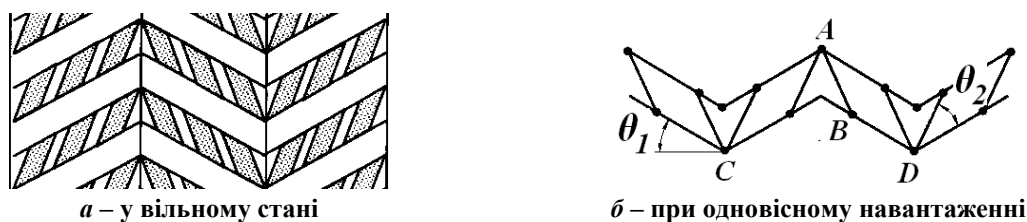
де a та b – довжина сторін трикутника; α – кут між сторонами трикутника; θ – кут розкриття системи.

Отже змінюючи довжину сторони a та кут розкриття θ можна змінювати коефіцієнт Пуассона в широких межах. В даній системі ні модуль Юнга, ні коефіцієнт Пуассона не залежать від напрямку прикладення зусилля, так як розвиток зіркоподібних структур відбувається в напрямку використання рівнобедрених трикутників.

Ламіinati кутового згину були розроблені для отримання аукзетик властивостей в композиційних матеріалах [11]. Прикладом такої структури може бути двофазний композиційний матеріал, який складається з жорстких включень та піддатливої матриці (рис.7, а). Заштрихованими

ділянками показана піддатлива фаза, яка моделюється розтягуванням жорстких стержнів. Це легко досягається за рахунок додаткового елемента, який переміщується всередині кожного стержня, збільшуючи при потребі його довжину.

Крім того, кожен зі стержнів може бути замінений парою жорстких паралельних стержнів, які скріплені двома трикутними зв'язками для запобігання ковзанню одного відносно іншого. Заповнення пустот, які сформовані стержнями, пружним матеріалом призводить до утворення складної аукзетик структури, характеристикою якої є параметри кутів θ_1 та θ_2 . На (рис.7, б) представлена геометрична модель, яка ілюструє деформацію структури. При дуже незначних деформаціях, зростання ширини АВ прямо пропорційно збільшенню довжини CD. Таким чином, композиційні матеріали на базі таких структур матимуть аукзетик властивості.



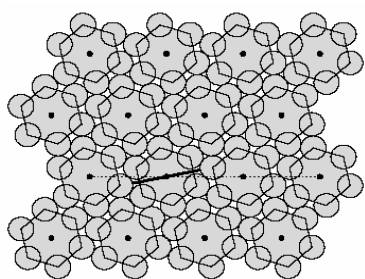
а – у вільному стані

б – при одновісному навантаженні

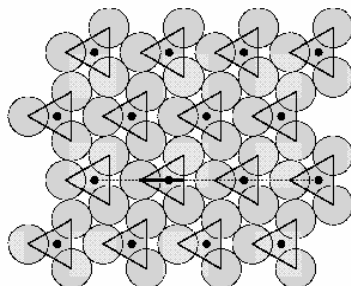
Рис.7. Геометричні моделі плоскої структури з кутовими згинами

Жорсткі молекули. Структури, основою яких є жорсткі «вільні» молекули [12], спрямовані на вибір такої міжмолекулярної взаємодії, яка забезпечує отримання термодинамічно стійкої еластичної ізотропної аукзетик фази у системі взаємодії часток. Така «молекулярна» модель циклічного гексамера (рис.8, а) була отримана і доведено, що його фаза, в якій коефіцієнт Пуассона приймає від'ємне значення, термодинамічно стійка в широкому діапазоні щільності при плюсових температурах. Від'ємне значення коефіцієнту Пуассона цієї системи, на відміну від інших, залежить лише від потенціалу міжмолекулярної взаємодії.

Мікропориста модель полімеру. Особливості будови такого полімеру [13] можна представити у вигляді простої геометричної структури (рис. 9). Вона складається з прямокутних вузлів та пружних фібрил. Деформація такого матеріалу викликає два протилежних процеси: бокові зміщення вузлів та обертання фібрил, що в сукупності призводить до від'ємного значення коефіцієнту Пуассона.



а – циклічний гексамер



б – циклічний тример

Рис.8. Геометрична структура з від'ємним коефіцієнтом Пуассона у щільному стані

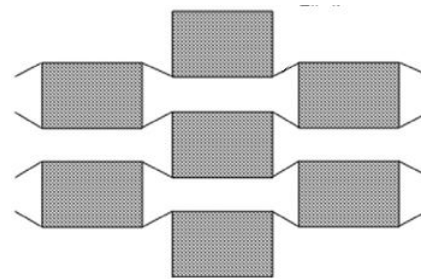


Рис.9. Геометрична модель мікропористої структури полімеру

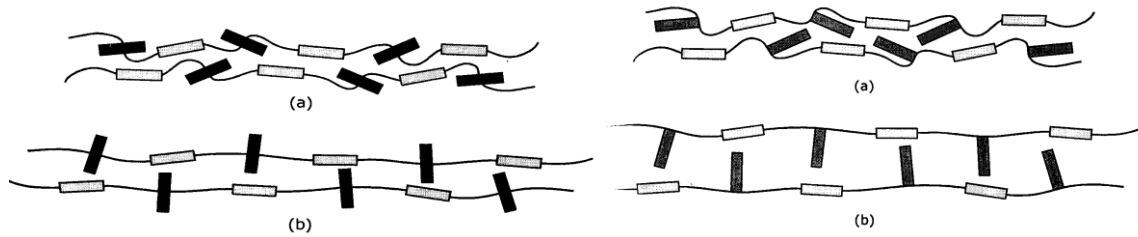


Рис.10. Положення поперечних ланцюгів рідкокристалічного полімеру:
a – у вільному стані та *b* – під дією зусиль розтягування

Рідкокристалічна модель полімеру в загальному вигляді оснований на використанні в якості шаблону реентерабельної макроскопічної структури. Такий рідкокристалічний полімер [14] являє собою ланцюг з жорстких молекул (стержні), які зв'язані гнучкими групами вздовж всієї довжини ланцюга (рис.10). Гнучкі групи зв'язані зі стержнями повністю або частково. У вільному стані всі стержні зорієнтовані вздовж ланцюга, а під дією розтягуючих зусиль відбувається поворот стержнів, внаслідок чого проявляються ауксетик властивості таких полімерів.

Висновки

Зважаючи на вищевикладене, бачимо, що ауксетик матеріали мають широке різноманіття геометричних структур, які визначають їх здатність розширюватися при розтягуванні. Проведений аналіз дозволяє визначати ряд структур, які можуть бути реалізовані в текстильних, і зокрема трикотажних, матеріалах як на макрорівні, так і на мікрорівні.

Список використаної літератури

1. Кизимчук О.П. «Auxetic» матеріали – новий клас текстильних матеріалів. // Вісник КНУТД. – Спеціальний випуск. – 2008. – №1, – Том 2. – С. 50–55.
2. G.N.Greaves. Poisson's ratio and modern materials / G.N.Greer, R.S.Lakes, T.Rouxel // Nature materials. – 2011. – Vol.10. – P.823–837.
3. Конек Д.А., Войцеховски К.В., Плескачевский Ю.М., Шилько С.В. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор). – 2004. – № 1. – том 10, – С. 35–69.
4. Yunan Pravoto. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio / Y.Pravoto // Computational Materials Science. – 2012. – Vol.58. – P. 140–153.
5. Liu Y. A review on auxetic structures and polymeric materials. / Liu Y., Hu H. // Scientific Research and Essays. – 2010. Vol. 5 (10) – P. 1052–1063.
6. Gibson LJ. The Mechanics of Two Dimensional Cellular Materials. / Gibson LJ, Ashby MF, Schajer GS, Robertson CI. // Proc Lond. Royal Soc. – 1982. – Vol. A382. – P. 25–42.
7. Theocaris PS. Negative Poisson's ratio in materials with a star-shaped microstructure. A numerical homogenization approach. / Theocaris PS, Stavroulakis GE, Panagiotopoulos PD. // Arch. Appl. Mech. – 1997. –Vol.67. –P.274–286.
8. Prall D. Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of -1. / Prall D, Lakes RS. // Int. J. Mech. Sci. – 1997. – Vol.39. – P.305–314.

9. Grima JN. On the auxetic properties of rotating rhombi and parallelograms: A preliminary investigation. / Grima JN, Farrugia PS, Gatt R, Attard D. // Phys. Stat. Sol. – 2008. – Vol.245. – P.521–529.
10. Grima JN. Auxetic behavior from rotating triangles. / Grima JN, Evans KE. // J.Mater. Sci. – 2006. – Vol.41. – P.3193–3196.
11. Hine PJ. Negative Poisson's ratios in angle-ply laminates. / Hine PJ, Duckett RA, Ward IM. // J. Mater. Sci. Lett. – 1997. – Vol.16. – P.541–544.
12. Tretiakov KV, Wojciechowski KW. Monte Carlo simulation of two-dimensional hard body systems with extreme values of the Poisson's ratio. Phys. Stat. Sol., – 2005, Vol.242: P.730–741.
13. Caddock BD. Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties'. / BD Caddock, KE Evans. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1989. – Vol.22. – P.1877–1882.
14. He CB, Liu PW, McMullan PJ, Griffin AC. Toward molecular auxetics: Main chain liquid crystalline polymers consisting of laterally attached para-quaterphenyls. Phys. Stat. Sol., – 2005. – Vol. 242. P.576–584.
15. Larsen UD. Design and fabrication of compliant mechanisms and material structures with negative Poisson's ratio. / Larsen UD, Sigmund O, Bouwstra S.// J. Microelectromech Syst. – 1997. – Vol.6. – P.99–106.
16. Lakes RS, Witt R. Making and characterizing negative Poisson's ratio materials. Inter. J. Mech. Eng. Edu., – 2002, Vol.30: P.50-58.
17. Dolla WJS. Structural and Drug Diffusion Models of Conventional and Auxetic Drug-eluting Stents. / Dolla WJS, Fricke BA, Becker BR. // J. Medical Devices. – 2007. – Vol.1. – P.47–55.
18. Lakes RS. Making and characterizing negative Poisson's ratio materials. / Lakes RS, Witt R. // Inter. J. Mech. Eng. Edu. – 2002. – Vol.30. – P.50–58.
19. Grima JN Auxetic behavior from rotating squares. / Grima JN, Evans KE. // J.Mater. Sci. Lett. - 2000. - Vol.19. – P.1563–1565.
20. Grima JN. Auxetic behaviour from rotating rigid units. / Grima JN, Alderson A, Evans KE. // Phys. Stat. Sol. (b). – 2005. –Vol.242. –P.561–575.
21. Alderson A. Molecular Origin of Auxetic Behavior in Tetrahedral Framework Silicates. / Alderson A, Evans KE. // Phys. Rev. Lett. – 2002. – Vol.89. – 225–503.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2013

Геометрические модели аукзетик материалов

Кизимчук Е.П., Здоренко В.Г.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

В статье рассмотрены геометрические модели структур, которые дают возможность реализовать способность аукзетик материалов расширяться при растяжении и уменьшаются по ширине при сжатии. Автором проанализированы существующие классификации аукзетик материалов и детально рассмотрена классификация по принципу организации структуры материала, в соответствии с которой выделяют реентерабельные, стержневые и поворотные структуры, ламинаты углового изгиба и твердые молекулы, микропористые и жидкокристаллические полимеры. В статье рассмотрены примеры геометрических структур каждого класса и приведены соответствующие формулы для расчета коэффициента Пуассона, которые доказывают возможность получения его отрицательного значения.

Ключевые слова: аукзетик материал, коэффициент Пуассона, поворотные структуры, стержневые структуры, реентерабельные структуры.

Geometric models of auxetic materials

O. Kyzymchuk, V. Zdorenko

Kiev National University of Technologies and Design

Geometric models of material's structures, which realize an ability of auxetic materials to expand transversely when pulled longitudinally and contract transversely when pushed longitudinally, are described at an article. The valid classifications of auxetic materials are analyzed by author and a classification based on mechanics and structural morphology is detailed. According to this classification all auxetic structures divide on re-entrant structure, chiral structure, rotating structure, angle-ply laminates, hard molecules, microporous polymers model and liquid crystalline polymer model. The examples of geometric model of each class and analytical dependences for Poisson ratio calculating are showed at article. They are describing a possibility of negative Poisson ratio.

Keywords: auxetic material, Poisson's ratio, rotating structure, chiral structure, re-entrant structure.