

Materiały auksetyczne – struktury, potencjalne zastosowanie

Auxetic materials – structures, potential application

Iwona Masłowska - Lipowicz*, Łucja Wyreńska, Beata Szalek, Piotr Olszewski,
Robert Gajewski

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Przemysłu Skórzanego

Streszczenie

Dokonano przeglądu literatury pod kątem badań materiałów auksetycznych, które posiadają ujemny współczynnik Poisson'a (NPR) charakteryzujący odpowiedź materiału na naprężenie jednoosiowe. Struktury i materiały auksetyczne zachowują się sprzecznie z intuicją, tzn. przy jednoosiowym rozciąganiu, rozszerzają się poprzecznie, co wynika z ich skomplikowanych struktur geometrycznych. Opisano reprezentatywne modele strukturalne (re-entrant, struktury składające się z tzw. sztywnych lub półsztywnych obracających się jednostek, struktury chiralne, przędze auksetyczne i struktury włóknkowo-zgrubieniowe) oraz zastosowanie materiałów auksetycznych wynikające z ich właściwości. Właściwości materiałów auksetycznych, np. synklastyczna krzywizna zginania, zmienna przepuszczalność, zwiększona odporność na wgniecenia, wysoka odporność na pękanie oraz tłumienie i pochłanianie dźwięku stwarzają szerokie możliwości ich zastosowania, m.in. w materiałach biomedycznych, materiałach amortyzujących, urządzeniach do pozyskiwania energii, wyposażeniu sportowym, filtrach, robotyce, tekstyliach czy materiałach stosowanych w przemyśle lotniczym oraz budownictwie.

Abstract

The literature was reviewed in terms of research on auxetic materials with a negative Poisson's ratio (NPR) characterizing the material's response to uniaxial stress. Auxetic structures and materials behave counter-intuitively, i.e. when stretched uniaxially, they expand laterally due to their complex geometric structures. Representative structural models are described (re-entrant, structures consisting of so-called rigid or semi-rigid rotating units, chiral structures, auxetic yarns and fibril-noodle structures) and the use of auxetic materials resulting from their properties. Properties of auxetic materials, e.g. synclastic bending curvature, variable permeability, high shear stiffness, increased resistance to indentation, high resistance to cracking and sound attenuation and absorption create a wide range of applications, including in biomedical materials, shock-absorbing materials, energy generation devices, sports equipment, filters, robotics, textiles or materials used in the aerospace industry and construction.

Słowa kluczowe: materiały auksetyczne, auksetyki, włókna auksetyczne, ujemny współczynnik Poisson'a, zastosowanie materiałów auksetycznych

Keywords: auxetic materials, auxetics, auxetic fibers, negative Poisson's ratio, use of auxetic materials

* autor korespondencyjny: dr inż. Iwona Masłowska - Lipowicz: i.maslowska@ips.lodz.pl

1. Wstęp

Materiały i struktury auksetyczne posiadają ujemny współczynnik Poisson’a (NPR). Współczynnik Poisson’a ciała stałego charakteryzuje jego odpowiedź na naprężenie jednoosiowe. Definiuje się go jako ujemny stosunek odkształcenia poprzecznego do odpowiedniego odkształcenia osiowego. Współczynnik Poisson’a jest wielkością bezwymiarową, nie określa sprężystości materiału, a jedynie sposób, w jaki się on odkształca. Wyznacza się według wzoru (1):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (1)$$

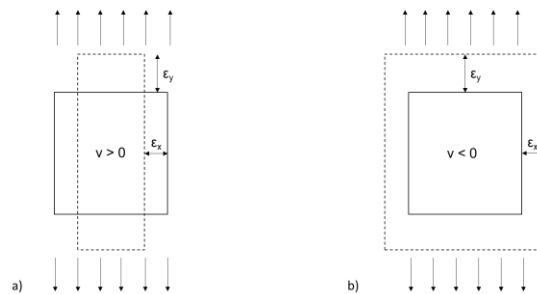
gdzie:

ν – współczynnik Poisson’a;

ε_x – odkształcenie wzdłuż osi x ,

ε_y – odkształcenie wzdłuż osi y .

Auksetyki wykazują zachowania sprzeczne z intuicją. Przy jednoosiowym ściskaniu (rozciąganiu) te materiały i struktury kurczą się (rozszerzają) poprzecznie.



Rys. 1. Schemat nieodkształconego (linia ciągła) i odkształconego (linia przerywana) materiału: a) konwencjonalnego b) auksetycznego; ν - współczynnik Poisson’a; ε_x – odkształcenie wzdłuż osi x , ε_y – odkształcenie wzdłuż osi y [źródło: opracowanie własne].

Pierwsze wzmianki na temat możliwości istnienia materiałów charakteryzujących się ujemnym współczynnikiem Poisson’a można znaleźć w pracy Voigta [3] z początku XX wieku.

Pierwsze badanie eksperymentalne sugerujące istnienie materiałów auksetycznych w przyrodzie odnotowano w 1882 roku dla monokryształów pirytu żelaza, których współczynnik Poisson'a oszacowano na -0,14. Innymi przykładami naturalnych materiałów auksetycznych są α -krystobalit, skóra strzyków krów, grafit pirolityczny, polimorficzne silikony, zeolity, krzemiany i krystaliczny kadm [1, 2].

Następnie Lempriere [4] przedstawił teoretyczne rozważania dotyczące trójwymiarowych materiałów izotropowych charakteryzujących się ujemnym współczynnikiem Poisson'a. W ogólnym przypadku, na gruncie klasycznej teorii sprężystości oraz zakładając termodynamiczną stabilność materiałów, przyjmuje się, że współczynnik Poisson'a dla materiałów izotropowych może przyjmować wartości z przedziału [-1, 1] w przypadku dwuwymiarowej teorii sprężystości oraz wartości z przedziału [-1, 0,5] dla materiałów trójwymiarowych [5]. W przypadku materiałów anizotropowych nie ma takich ograniczeń. W latach osiemdziesiątych XX wieku Gibson [6] opublikowała prace dotyczącą materiałów komórkowych zawierającą m.in. wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych nad materiałami charakteryzującymi się ujemnym współczynnikiem Poisson'a, a Lakes [7] zaprezentował metodę wytworzenia syntetycznej próbki pianki o właściwościach auksetycznych.

Literatura ostatnich lat licznie opisuje struktury, których wielkość odkształcenia, a przez to także i współczynnik Poisson'a zależą od warunków zewnętrznych np. temperatury, pola magnetycznego, działającej siły lub przemieszczenia. W wielu pracach [8 - 14] pokazano, że za pomocą powyższych czynników można sterować wartością współczynnika Poisson'a tak, aby struktura w pewnych warunkach wykazywała zachowanie auksetyczne, a w innych warunkach - nie.

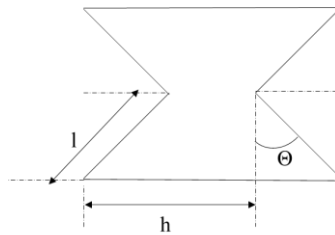
Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy o materiałach auksetycznych zarówno w kontekście ich struktur oraz właściwości jak i potencjalnego zastosowania.

2. Wybrane modele struktur auksetycznych

Wiele ośrodków naukowych bada nowe mechanizmy deformacji prowadzące do zachowania auksetycznego o dużej sterowalności i niskich kosztach produkcji. Reprezentatywne mechanizmy to struktury re-entrant [15-20], obracające się sztywne lub półsztywne jednostki [21-26], struktury chiralne [27, 28], struktury włókienkowe/guzkowe [29, 30], spiralna przędza auksetyczna [31].

2.1. Re-entrant

Jednym z najwcześniej opracowanych modeli struktur z ujemnym współczynnikiem Poisson'a są struktury plastrów miodu „re-entrant”. Przymiotnik „reentrant” oznacza, iż kształt posiada w swojej budowie kąt większy niż 180° skierowany do wewnątrz (Rys. 2).



Rys. 2. Podstawowa heksagonalna komórka struktury plastrów miodu re-entrant, [źródło: opracowanie własne wg [35]].

Graficzne opracowanie dwuwymiarowych struktur auksetycznych re-entrant: plastra miodu (z ang. honeycomb) struktury trójkątnej oraz struktury gwiazdowej zamieszczone jest w Handbook of mechanics of materials [32]. Trójwymiarowe struktury re-entrant doskonale ilustrują autorzy publikacji [33].

2.2. Struktury składające się z tzw. sztywnych lub półsztywnych obracających się jednostek

Innym modelem struktur, które mogą posiadać właściwości auksetyczne są struktury składające się z tzw. sztywnych lub półsztywnych obracających się jednostek.

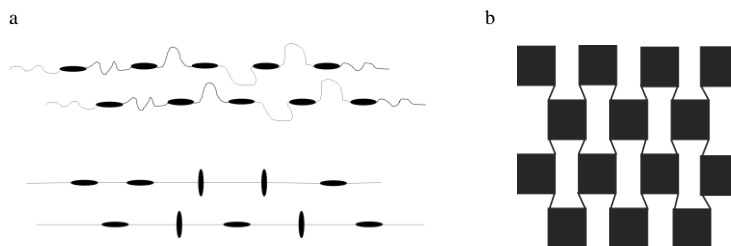
Konstrukcje z mechanizmem obrotowym składają się ze sztywnych elementów połączonych zawiasami. Sztywne jednostki są rozmieszczone według spójnej zasady, a ich początkowe pozycje są lekko nachylone w kierunku zgodnym lub przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, który jest przeciwny do kierunku przechylania się sąsiednich jednostek. Struktury te graficznie przedstawili autorzy podręcznika [32].

2.3. Struktury chiralne

Kolejnym modelem struktury auksetycznej są tzw. struktury chiralne, które po raz pierwszy zaprezentowane zostały w kontekście ujemnego współczynnika Poisson'a przez Pralla i Lakesa [34]. Słowo „chiralne” oznacza nienakładalność obiektu na jego lustrzane odbicie. Pojedyncza auksetyczna struktura składa się z centralnych węzłów - okręgów, prostokątów lub innych elementów geometrycznych oraz łączników. Struktura chiralna powstaje poprzez połączenie wielu pojedynczych komórek. Efekt auksetyczny uzyskiwany jest poprzez zawijanie i odwijanie łączników wokół węzłów w reakcji na zadaną siłę.

2.4. Struktury włókninkowo-guzkowe

Efekt ujemnej wartości współczynnika Poisson'a jest uzyskiwany dzięki wewnętrznej budowie składającej się ze zgrubień/guzków połączonych włóknami. Pod wpływem obciążenia następuje obrót zgrubień dookoła włókien prowadzący do wystąpienia właściwości auksetycznych.



Rys. 3. Typowy kształt struktur włóknisto-guzkowych: (a) pojedynczy model strukturalny typu fibryli dla polimeru ciekłokrystalicznego (typ wiązki) [36], (b) struktury wielowłókniste z prostokątnymi guzkami/zgrubieniami (typ sieci), [źródło: opracowanie własne wg [32]].

2.5. Spiralna przędza auksetyczne

Spiralna przędza auksetyczna to wyjątkowy materiał auksetyczny, który składa się z dwóch rodzajów nici [37]. Nić rdzeniowa jest gruba, ale jednocześnie elastyczna i w stanie wolnym od naprężeń ma prosty kształt. Nić rdzeniowa owinięta jest cienką i „sztywną” nicią, która stanowi drugi składnik przędzy auksetycznej. Efektywna średnica przędzy to suma średnicy nici rdzeniowej oraz dwukrotna średnica nici spiralnie owiniętej wokół niej. Kiedy na przędzę spiralną przyłożone jest obciążenie rozciągające, następuje radykalna zmiana z powodu różnicy wartości sztywności między dwiema nitkami – spiralnie zwinięta nić sztywniejsza (owijająca) prostuje się w kierunku obciążenia rozciągającego. W rezultacie nić rdzeniowa jest spiralnie zwijana wokół nici sztywniejszej. W tym stanie efektywna średnica odkształconego kształtu jest definiowana jako średnica nitki owijającej plus dwukrotność średnicy nici rdzeniowej (jest większa niż średnica pojedynczego włókna przędzy w stanie początkowym, zwiększa się pod wpływem obciążenia rozciągającego). W rezultacie cała tkanina złożona ze spiralnych przędz auksetycznych ma NPR i rozciąga się w kierunku prostopadłym do przyłożonego obciążenia.

3. Potencjalne zastosowanie

Materiały auksetyczne oraz modele opisujące ich właściwości podlegają intensywnym badaniom nie tylko w zakresie badań podstawowych, ale także pod kątem możliwych zastosowań. Zachowania auksetyczne materiałów wywodzą się z mechanizmu deformacji określonych geometrii i struktur wewnętrznych w odpowiedzi na obciążenia jednoosiowe. W porównaniu z konwencjonalnymi materiałami o dodatnim współczynnikiem Poisson'a, oczekuje się, że materiały auksetyczne będą miały kilka interesujących cech w zakresie ich właściwości geometrycznych i mechanicznych.

Wśród tych właściwości wymienić można: synklastyczną krzywiznę zginania [39, 40], zmienną przepuszczalność [41], zwiększoną odporność na wgniecenia [40, 43, 45], wysoką odporność na pękanie [39, 44, 46, 47] oraz zdolność do tłumienia i pochłaniania dźwięku [48-51]. Te niezwykle właściwości oferują szerokie możliwości zastosowania materiałów auksetycznych, w tym m.in. w materiałach biomedycznych [52], materiałach amortyzujących [53], urządzeniach do pozyskiwania energii [54], wyposażeniu sportowym [45], filtrach [55], robotyce [56], tekstyliach [41, 57], czy materiałach stosowanych w przemyśle lotniczym [42] oraz budownictwie [58]. Z medycznych zastosowań należałoby wymienić auksetyczne bandaże, które skutecznie uciskają ranę, a także tzw. stenty, które prowadzą do zwiększenia przekroju, przez który przepływa krew tworząc pewien rodzaj sztucznych naczyń krwionośnych odpornych na niebezpieczne przewężenie przekroju naczyń [61].

3.1. Auksetyczne tekstylia

Auksetyczne materiały tekstylne (włókna, przędze, tkaniny, wzmocnienia tekstylne do zastosowań w materiałach kompozytowych) są przedmiotem zainteresowania wielu badaczy w ostatnich latach. Chociaż większość literatury wspomina, że tekstylne materiały auksetyczne mają lepsze właściwości niż materiały konwencjonalne, bardzo niewiele rodzajów materiałów auksetycznych zostało wytworzonych w skali większej niż laboratoryjna. Podstawowe ograniczenia wytwarzania auksetycznych tekstyliów to: niska stabilność strukturalna, niski powrót sprężystości, większa grubość i trudność w wytwarzaniu z powodu ich skomplikowanych struktur geometrycznych. Niewątpliwie auksetyczne materiały tekstylne mają duży potencjał, aby sklasyfikować je jako inteligentne tekstylia oraz zastosować np. w produkcji odzieży, ale jest to kwestia badań, które ciągle trwają.

W amerykańskim patencie [59] opracowano wielowarstwową podeszwę, w której jedna warstwa posiada właściwości auksetyczne, zapewniając w czasie wykonywania czynności (bieganie, skok itp.), powodującej zwiększone naprężenie boczne lub wzdłużne, większą przyczepność (poprzez zwiększenie powierzchni), a także amortyzację. Potwierdzono skuteczność obuwniczej wkładki auksetycznej w redukcji nacisku na przodostopie podczas użytkowania obuwia na wysokich obcasach. Dzięki zastosowaniu pianki auksetycznej spadło ciśnienie podeszwowe w przedniej części stopy, podczas gdy produkt handlowy, materiał tradycyjnie stosowany na wyściółki podeszwowe, zwiększał ciśnienie w okolicy drugiego – czwartego stawu śródstopno-paliczkowego [60].

Odpowiedni sposób odkształcenia pod wpływem naprężenia czyni z auksetyków materiał ochronny, który zastosowany może być w elementach chroniących ludzi przed kontuzjami czy skutkami uderzeń. Tworzone są z nich ochronne kaski, obuwie, kamizelki kuloodporne czy ochraniacze na kolana i golenie.

Odzież, czy obuwie wykonane z auksetyków bardzo łatwo dopasowują się do kształtu ciała człowieka poprawiając ergonomię i komfort użytkowania, a także w przypadku tekstyliów dla dzieci mogą wyeliminować problem krótkiego użytkowania elementów garderoby z powodu szybkiego wzrostu dzieci (rosnąca odzież) [41, 32].

4. Podsumowanie

Struktury i materiały auksetyczne zachowują się sprzecznie z intuicją, tzn. przy jednoosiowym rozciąganiu, rozszerzają się poprzecznie, co wynika z ich skomplikowanych struktur geometrycznych. Reprezentatywne modele strukturalne auksetyków to m.in. re-entrant, struktury składające się z tzw. sztywnych lub półsztywnych obracających się jednostek, struktury chiralne, przedzie auksetyczne i struktury włókienkowo-zgrubieniowe.

Zastosowanie materiałów auksetycznych wynika z ich właściwości, np. synklastycznej krzywizny zginania, zmiennej przepuszczalności, wysokiej sztywności na ścinanie, zwiększonej odporności na wgniecenia, wysokiej odporności na pękanie oraz tłumienia i pochłaniania dźwięku.

Potencjalnymi obszarami zastosowań auksetyków są m.in. materiały biomedyczne, amortyzujące, urządzenia do pozyskiwania energii, wyposażenie sportowe, filtry, robotyka, tekstylia, czy materiały stosowane w przemyśle lotniczym oraz budownictwie.

Materiały auksetyczne mają olbrzymi potencjał, jednakże ich produkcja w celu powszechnego zastosowania jest ciągle ograniczona. Zagadnienie wymaga dalszych badań dotyczących zarówno właściwości, jak i możliwości aplikacyjnych auksetyków.

Źródło finansowania

Badania przedstawione w pracy powstały jako rezultat projektu badawczego NCBiR pt.: „Inteligentne obuwie rosnące wraz ze stopami dziecka” (Szybka Ścieżka POIR.04.01.04-00-0070/17).

Literatura

- [1] Lakes R. S., Witt R.: *Making and characterizing negative Poisson's ratio materials*, *IJMEE* **30** (1), 2000, str. 50-58.
- [2] Carneiro V. H., Meireles J., Puga H.: *Auxetic materials - a review*, *Materials Science Poland* **31**, 2013, str. 561-571.
- [3] Voigt W.: *Lehrbuch der Kristallphysik*, B. G. Teubner-Verlag, Leipzig, Berlin 1928.
- [4] Lempriere B. M.: *Poisson's ratio in orthotropic materials*, *AIAA Journal* **6**, 1968, str. 2226.
- [5] Wojciechowski K. W.: *Constant thermodynamic tension Monte Carlo studies of elastic properties of a two-dimensional system of hard cyclic hexamers*, *Molecular Physics* **61**, 1987, str. 1247.
- [6] Gibson L. J.: *The elastic and plastic behaviour of cellular materials - Ph.D. Thesis*, University of Cambridge, Cambridge 1981.
- [7] Lakes R. S.: *Foam structures with a negative Poisson's ratio*, *Science* **235**, 1987, str. 1038.
- [8] Shadrivov I. V., Lapine M., Kivshar Y. S., (eds.), *Nonlinear, tunable and active metamaterials*, Springer International Publishing, Switzerland 2015.

- [9] Lakes R. S.: *Cellular solids with tunable positive or negative thermal expansion of unbounded magnitude*, Applied Physics Letters **90**, 2007, str. 1-3.
- [10] Lakes R. S.: *Negative Poisson's ratio materials: auxetic solids*, Annual Review of Materials Research **47**, 2017, str. 63-81.
- [11] Grima J. N., Caruana-Gauci R., Dudek, M. R., Wojciechowski K. W., Gatt R.: *Smart metamaterials with tunable auxetic and other properties*, Smart Materials and Structures **22**, 2013, str. 1-10.
- [12] Li D., Dong L., Lakes R. S.: *A unit cell structure with tunable Poisson's ratio from positive to negative*, Materials Letters **164**, 2016, str. 456-459.
- [13] Li D., Maa J., Dong L., Lakes R. S.: *A bi-material structure with Poisson's ratio tunable from positive to negative via temperature control*, Materials Letters **181**, 2016, str. 285-288.
- [14] Ha C. S., Plesha M. E., Lakes R. S.: *Chiral three-dimensional lattices with tunable Poisson's ratio*, Smart Materials and Structures **25**, 2016, str. 1-11.
- [15] Masters I. G., Evans K. E.: *Models for the elastic deformation of honeycombs*, Composite Structures **35**, 1996, str. 403-422.
- [16] Yang L., Harrysson O., West H., Cormier D.: *Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing*, International Journal of Solids and Structures **69**, 2015, str. 475-490.
- [17] Larsen U. D., Signund O., Bouwsta S.: *Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio*, Journal of Microelectromechanical Systems **6**, 1997, str. 99-106.
- [18] Theocaris P. S., Stavroulakis G. E., Panagiotopoulos P. D.: *Negative Poisson's ratios in composites with star-shaped inclusions: a numerical homogenization approach*, Archive of Applied Mechanics **67**, 1997, str. 274-286.
- [19] Wang Z. P., Poh L. H., Dirrenberger J., Zhu Y., Forest S.: *Isogeometric shape optimization of smoothed petal auxetic structures via computational periodic homogenization*, Comput Methods in Applied Mechanics and Engineering **323**, 2017, str. 250-271.
- [20] Wang X. T., Wang B., Li X. W., Ma L.: *Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures*, International Journal of Mechanical Sciences **131**, 2017, str. 396-407.
- [21] Grima J. N., Evans K. E.: *Auxetic behavior from rotating squares*, Journal of Materials Science Letters **19**, 2000, str. 1563-1565.
- [22] Grima J. N., Farrugia P. S., Gatt R., Attard D.: *On the auxetic properties of rotating rhombi and parallelograms: a preliminary investigation*, Physica Status Solidi B **245**, 2008, str. 521-529.
- [23] Grima J. N., Gatt R., Alderson A., Evans K. E.: *On the auxetic properties of rotating rectangles with different connectivity*, Journal of the Physical Society in Japan **74**, 2005, str. 2866-2867.

- [24] Grima J. N., Chetcuti E., Manicaro E., Attard D., Camilleri M., Gatt R., Evans K. E.: *On the auxetic properties of generic rotating rigid triangles*, Proceedings of the Royal Society of London A **468**, 2012, str. 810-830.
- [25] Shan S., Kang S. H., Zhao Z., Fang L., Bertoldi K.: *Design of planar isotropic negative Poisson's ratio structures*, Extreme Mechanics Letters **4**, 2015, str. 96-102.
- [26] Kim J., Shin D., Yoo D. S., Ki K.: *Regularly configured structures with polygonal prisms for three-dimensional auxetic behavior*, Proceedings of the Royal Society of London A **473**, 2017, str. 1-15.
- [27] Prall D., Lakes R. S.: *Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1*, International Journal of Mechanical Sciences **39**, 1997, str. 305-314.
- [28] Grima J. N., Gatt R., Farrugia P. S.: *On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures*, Physica Status Solidi B **245**, 2008, str. 511-520.
- [29] Evans K. E., Caddock B. D.: *Microporous materials with negative Poisson's ratios II, mechanisms and interpretation*, Journal of Physics D: Applied Physics **22**, 1989, str. 1877-1883.
- [30] He C., Liu P., Griffin A. C.: *Toward negative Poisson ratio polymers through molecular design*, Macromolecules **31**, 1998, str. 3145-3147.
- [31] Miller W., Hook P. B., Smith C. W., Wang X., Evans K. E.: *The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite*, Composite Science Technology **69**, 2009, str. 651-655.
- [32] Cho H., Seo D., Kim D. N.: *Handbook of mechanics of materials*, Springer, Singapore 2019.
- [33] Wang X. T., Wang B., Li X. W., Ma L.: *Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures*, International Journal of Mechanical Sciences **131**, 2017, str. 396-407.
- [34] Prall D., Lakes R. S.: *Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of = -1*, International Journal of Molecular Sciences **39** (3), 1996, str. 305-314.
- [35] Idczak E.: *Optymalizacja topologiczna dwufazowych metamateriałów auksetycznych - rozprawa doktorska*, Politechnika Poznańska, Poznań 2019.
- [36] He C., Liu P., Griffin A.C.: *Toward negative Poisson ratio polymers through molecular design*, Macromolecules **31**, 1998, str. 3145-7.
- [37] Miller W., Hook P. B., Smith C. W., Wang X., Evans K. E.: *The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite*, Composite Science Technology **69**, 2009, str. 651-655.
- [38] Ge Z., Hu H., Liu S.: *A novel plied yarn structure with negative Poisson's ratio*, Journal of the Textile Institute **107** (5), 2016, str. 578-588.
- [39] Lakes R.: *Foam structures with a negative Poisson's ratio*, Science **235**, 1987, str. 1038-1041.
- [40] Evans K. E., Alderson A.: *Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking*, Advanced Materials **12**, 2000, str. 617-628.

- [41] Wang Z., Hu H.: *Auxetic materials and their potential applications in textiles*, Textile Research Journal **84**, 2014, str. 1600-1611.
- [42] Underhill R. S.: *Defense applications of Auxetic materials*, Advanced Materials 1, 2014, str. 7-13.
- [43] Alderson K. L., Pickles A. P., Neale P. J., Evans K. E.: *Auxetic polyethylene: the effect of a negative Poisson's ratio on hardness*, Acta Metallurgica et Materialia **42**, 1994, str. 2261-2266.
- [44] Choi J. B., Lakes R. S.: *Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis*, International Journal of Fracture **80**, 1996, str. 73-83.
- [45] Liu Q.: *Literature review: materials with negative Poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence*, Defence Science and Technology Organisation, Victoria 2006.
- [46] Donoghue J. P., Alderson K. L., Evans K. E.: *The fracture toughness of composite laminates with a negative Poisson's ratio*, Physica Status Solidi B **246**, 2009, str. 2011-2017.
- [47] Maiti S. K., Ashby M. F., Gibson L. J.: *Fracture toughness of brittle cellular solids*, Scripta Metallurgica **18**, 1984, str. 213-217.
- [48] Chekkal I., Bianchi M., Remillat C., Becot F. X., Jaouen L., Scarpa F.: *Vibro-acoustic properties of auxetic open cell foam: model and experimental results*, Acta Acustica United Acustica **96**, 2010, str. 266-274.
- [49] Howell B., Prendergast P., Hansen L.: *Examination of acoustic behavior of negative poisson's ratio materials*, Applied Acoustics **43**, 1994, str. 141-148.
- [50] Alderson K. L., Webber R. S., Mohammed U. F., Murphy E., Evans K. E.: *An experimental study of ultrasonic attenuation in microporous polyethylene*, Applied Acoustics **50**, 1997, str. 23-33.
- [51] Scarpa F., Ciffo L. G., Yates J. R.: *Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam*, Smart Materials and Structures **13**, 2003, str. 49.
- [52] Bhullar S. K., Lala N. L., Ramkrishna S.: *Smart biomaterials - a review*, Review on Advanced Material Science **40**, 2015, str. 303-314.
- [53] Novak N., Vesenjajk M., Ren Z.: *Auxetic cellular materials - a review*, Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering **62**, 2016, str. 485-493.
- [54] Imbalzano G., Tran P., Ngo T. D., Lee P.V.: *Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance*, Journal of Sandwich Structures and Materials **19**, 2017, str. 291-316.
- [55] Alderson A., Rasburn J., Ameer-Beg S., Mullarkey P. G., Perrie W., Evans K. E.: *An auxetic filter: a tuneable filter displaying enhanced size selectivity or defouling properties*, Industrial and Engineering Chemistry **39**, 2000, str. 654-665.
- [56] Mark A. G., Palagi S., Qiu T., Fischer P.: *Auxetic metamaterial simplifies soft robot design*, Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Stockholm 2016.

- [57] Konaković M., Crane K., Deng B., Bouaziz S., Piker D., Pauly M.: *Beyond developable: computational design and fabrication with auxetic materials*, ACM Transactions on Graphics (TOG) **35**, 2016, str. 79-89.
- [58] Park D., Lee J., Romo A.: *Poisson's ratio material distributions*, Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, Newcastle 2015.
- [59] US9402439B2 *Auxetic structures and footwear with soles having auxetic structures*.
- [60] Stojmanovski Mercieca L. A., Formosa C., Grima J. N., Chockalingam N., Gatt R., Gatt A.: *On the use of auxetics in footwear: investigating the effect of padding and padding material on forefoot pressure in high heels*, Physical Status Solidi B **254**, 2017, str. 1-5.
- [61] Bhullar S. K., Lala N. L., Ramkrishna S.: *Smart biomaterials - a review*, Review on Advanced Material Science **40**, 2015, str. 303-314.