

CELIČNI KOVINSKI MATERIALI

Branko Nečemer, Franc Zupanič, Zoran Ren

STROKOVNI ČLANEK

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

POVZETEK

Celični kovinski materiali se zaradi svojih ugodnih kombinacij mehanskih in fizikalnih lastnosti vse pogosteje uporabljajo v sodobni tehnični praksi. Zaradi porozne celične strukture je ena od njihovih glavnih prednosti sorazmerno majhna masa ob dokaj veliki nosilnosti. V splošnem delimo porozne celične materiale na odprto- in zaprtocelične, ki se med seboj razlikujejo po načinu izdelave. Celični materiali se uporabljajo v različnih industrijskih panogah, kot so avtomobilska, letalska, ladjedelniška industrija za povečanje togosti votlih strojnih delov, absorpcijo mehanske energije, polnilo filtrov ipd. V tem prispevku so na kratko predstavljene tudi celični avksetični materiali, ki imajo negativno vrednost Poissonovega razmerja.

Ključne besede: celični kovinski materiali, odprtocelična struktura, zaprtocelična struktura, avksentični materiali

Porous metal materials

ABSTRACT

Cellular metallic materials have been increasingly used in modern engineering practice due to their favourable combination of mechanical and physical properties. One of the main advantages of the cellular structure is a relatively low weight at significant stiffness. Cellular materials have open or closed cell structure, which differ in the manufacturing technology. Cellular materials are used in different industrial branches such as the automotive industry, aeronautical industry, nautical industry, where they are used to increase the stiffness of the hollow machine parts, for the absorption of the mechanical energy, for the filters, etc. A short presentation of the cellular auxetic materials with a negative Poisson's number is also given in this paper.

Keywords: cellular metal materials, open-cell structure, closed-cell structure, auxetic materials

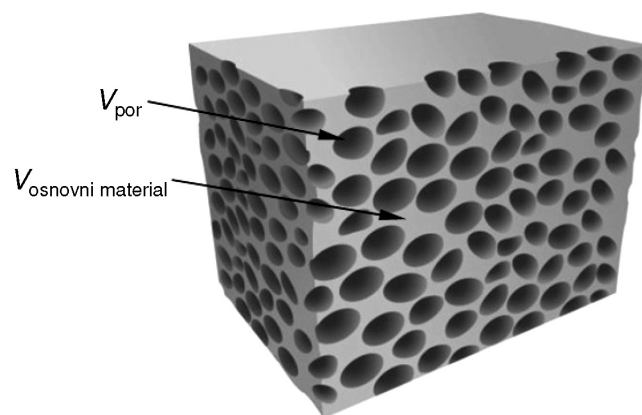
1 UVOD

Celični kovinski materiali se dandanes vse pogosteje uporabljajo v sodobni tehnični praksi. Celični materiali z visoko stopnjo poroznosti imajo ugodno kombinacijo mehanskih in fizikalnih lastnosti. Ti materiali sestojijo iz mreže povezanih volumenskih

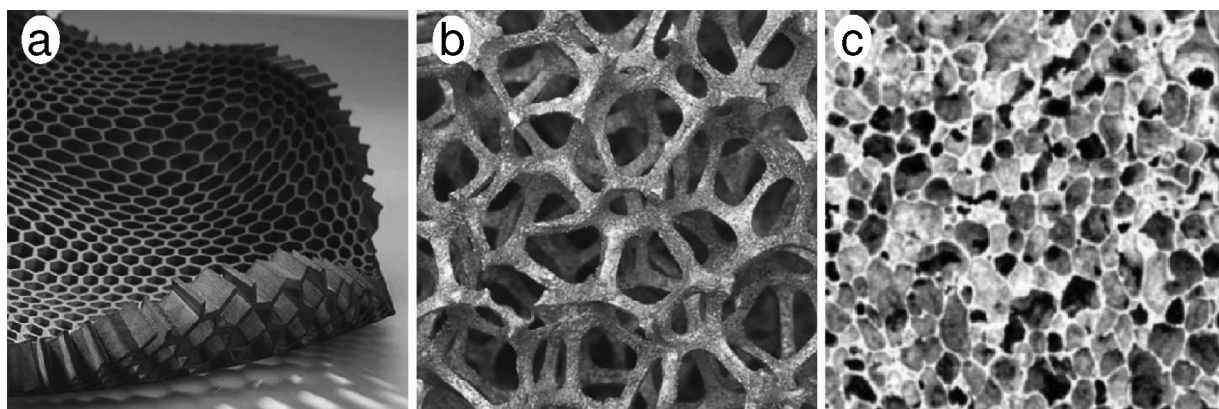
opornikov ali plošč. V splošnem ločimo tri glavne oblike celičnih struktur, ki so prikazane na **sliki 1**: (a) satovja, (b) odprte celice in (c) zaprte celice [3]. Najpomembnejša lastnost celičnih materialov je majhna relativna gostota in velika togost glede na specifično maso [1, 2]. Mehanske lastnosti celičnih materialov so odvisne od relativne gostote (enačba (1)) oziroma poroznosti (enačba (2)). Relativna gostota je definirana kot razmerje med gostoto celičnega materiala (ρ^*) in gostoto osnovnega materiala (ρ_s). Poroznost pa je definirana kot razmerje med volumnom por (V_{por}) in volumnom materiala ($V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}$) (**slika 2**). Uporabna relativna gostota celičnega poroznega materiala je v območju od 0,001 do 0,3 [17].

$$\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{V_{\text{osnovni material}}}{V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}} \quad (1)$$

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{V_{\text{por}}}{V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}} \quad (2)$$



Slika 2: Celični porozni material



Slika 1: Tri glavne vrste celičnih poroznih materialov so: (a) satovje, (b) odprte celice in (c) zaprte celice [1].

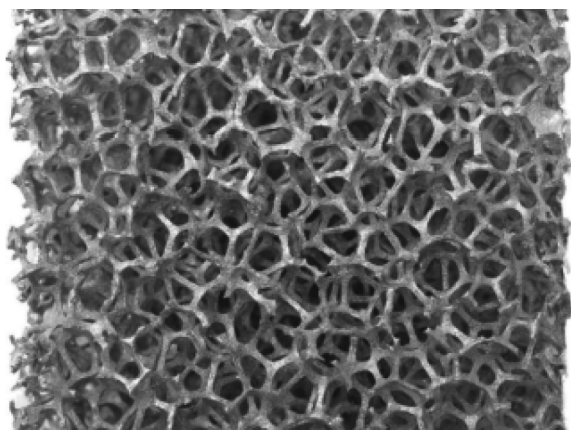
Celične porozne materiale delimo po strukturi v dve skupini: odprto- in zaprtocelične strukture. Pomembni lastnosti celičnih poroznih struktur sta tudi geometrija in topologija (pravilne in nepravilne oblike celic). Odprtocelični materiali dosegajo relativne gostote od 0,1 do 0,3, zaprtocelični pa od 0,001 do 0,13. Odprtocelične materiale z relativno gostoto $\rho^*/\rho_s < 0,1$ imenujemo tudi pene.

Prednosti celičnih poroznih materialov so lahke strukture, visoka zvočna izolativnost, dušilnost, visoka absorpcija mehanske energije, trajnost ob dinamični obremenitvi in reciklaži ipd. Industrijskim celičnim materialom lahko prilagodimo lastnosti z ustrezno kombinacijo parametrov in ustreznih postopkov izdelave za doseganje želenih mehanskih (trdnost, togost) in termičnih lastnosti (toplotna prevodnost) za uporabo v različne namene. Najpogostejši načini izdelave celičnih poroznih kovin so kontinuirano litje s penjenjem, sintranje prahov, filtracija in enosmerno vlivanje staljene kovine, lepljenje tankih folij ter eksplozijsko varjenje.

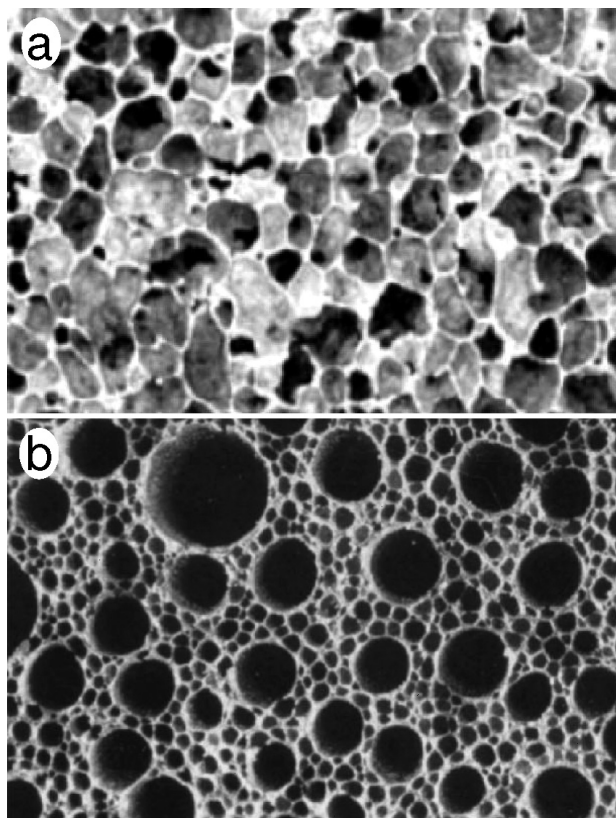
2 IZDELAVA CELIČNIH MATERIALOV

Izdelava odprtoceličnih materialov temelji na metodi repliciranja strukture osnovne polimerne pene, katere struktura se rabi kot negativ končne oblike kovinske celične strukture (slika 3). Postopek repliciranja lahko vključuje prekrivanje osnove s kovinsko paro, prekrivanje osnove z galvanotehniko (tehnika nanašanja kovinskih prevlek z elektrolizo) ali z litjem z iztaljenim jedrom [17]. Končni proizvod je celična kovina, katere struktura je enaka negativni strukturi polimerne pene. Oblika celične kovine ni odvisna od fizike penjenja kovinske osnove.

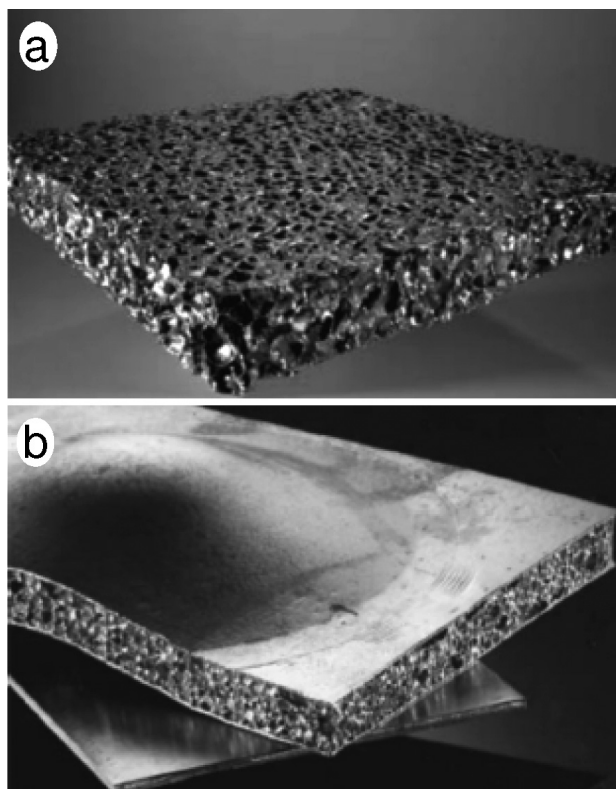
Pri izdelavi zaprtoceličnega materiala (slika 4) izrabljamo sam proces penjenja tekoče kovinske faze. Pri izdelavi zaprtoceličnega materiala lahko uporabimo različne metode, kot so na primer Cymat/Alcan



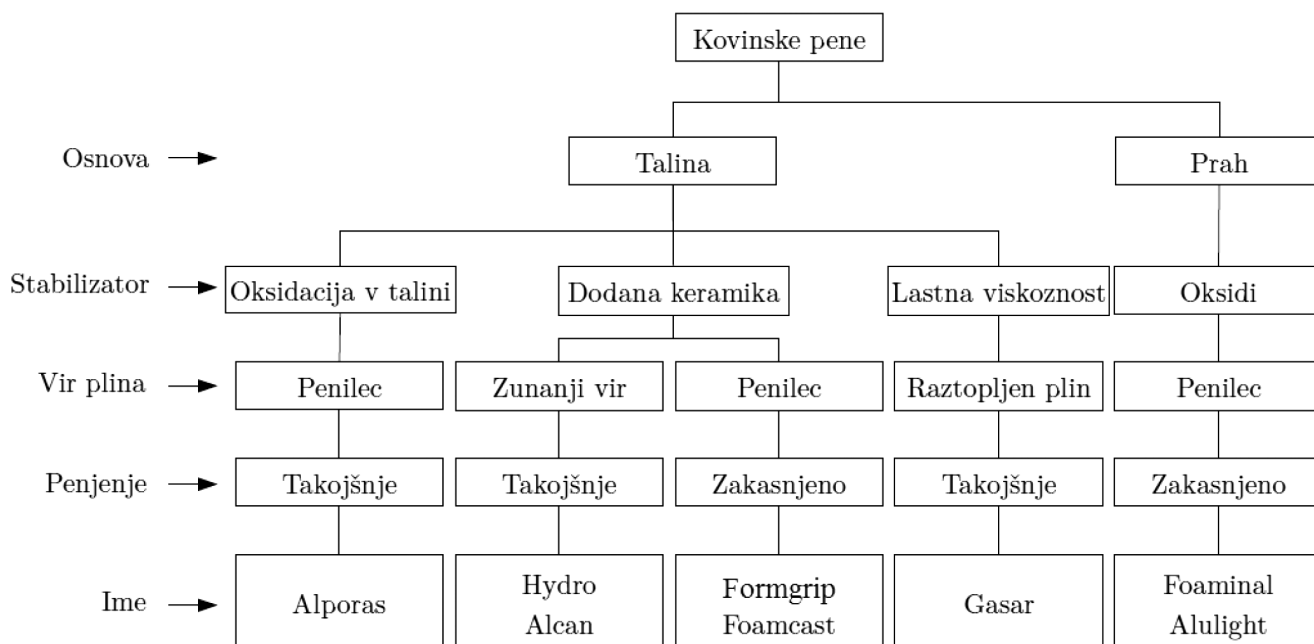
Slika 3: Kovinska pena, izdelana z metodo litja z izparljivim jedrom (Duocel)



Slika 4: Kovinska pena, izdelana s penjenjem ingota, ki vsebuje predhodno dodan penilec – Foamgrip (a), in pena, izdelana z evtektičnim strjevanjem kovinske taline – Gasar (b)



Slika 5: Kovinska pena, izdelana s vpihovanjem plina v aluminijevo talino – Cymat (a), in pena, proizvedena s penjenjem aluminijevega prahu med dvema jeklenima ploščama – Alulight (b)

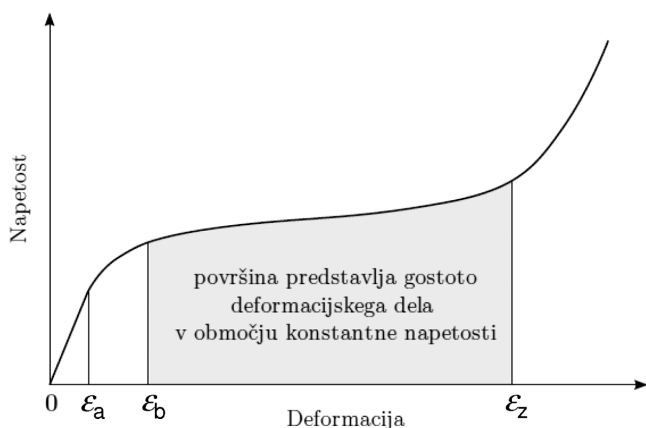


Slika 6: Izdelava zaprtoceličnih pen

(slika 5). Na sliki 6 je prikazana metoda Alporas, ki se prav tako uporablja za izdelavo zaprtoceličnega materiala. Glavni razliki sta v izbiri kovinske taline ali kovinskega prahu ter v izbiri vira plina, pri katerem lahko uporabimo zunanji vir plina, penilec (nastane ob razgradnji v talini) ali pa raztopljen plin. Med razlike posameznih metod spada čas začetka oz. sprožitve penjenja, ki je lahko takojšnja ali zakasnjena.

3 MEHANSKE LASTNOSTI CELIČNIH MATERIALOV

Celični materiali imajo pri tlačnih obremenitvah značilno razmerje napetost – specifična deformacija (slika 7), ki ga je mogoče razdeliti na štiri glavna območja:



Slika 7: Značilno razmerje napetosti celičnih materialov v odvisnosti od specifične deformacije pri tlačnih obremenitvah

- $(0-\varepsilon_a)$ elastični del: osnovni material celične strukture se deformira elastično in se po razbremenitvi vrne v začetno nedeformirano obliko;
- $(\varepsilon_a-\varepsilon_b)$ prehodni del v plastično območje: napetost v določenih točkah materiala celične strukture doseže napetost tečenja; posledično nastanejo na medceličnih stenah oziroma povezavah lokalna območja tečenja in prehod v plastično območje;
- $(\varepsilon_b-\varepsilon_z)$ konstantni del (konstantna napetost v plastičnem območju): po določeni specifični deformaciji doseže celični material nivo napetosti, ki je v zelo širokem območju specifičnih deformacij skoraj konstantna; v tem območju se pojavi uklon oziroma izrazita plastifikacija medceličnih sten in povezav; celični prostori se zmanjšujejo, relativna gostota pa posledično raste;
- $(\varepsilon_z<)$ povečanje togosti zaradi zgostitve celične strukture: po določeni stopnji specifične deformacije se medcelične stene in povezave začnejo sesedati, govorimo o zgostitvi materiala; togost oz. napetost v tem območju zelo hitro narašča, dokler deformirana celična struktura ne doseže togosti osnovnega materiala.

V tabeli 1 so navedene mehanske lastnosti nekaterih najpogostejših komercialnih celičnih materialov. Mehanske lastnosti, kot so napetost tečenja, modul elastičnosti, trdnost in količina absorbiranega dela, so odvisne tudi od relativne gostote, deformacijske hitrosti, uporabljenega polnila ter od oblikovnih parametrov celične strukture [17].

Tabela 1: Mehanske lastnosti kovinskih celičnih materialov [2]

Mehanska lastnost	Enota	Tržno ime celičnega materiala				
		Cymat	Alulight	Alporas	Duocel	Incofoam
Osnovni material		Al	Al	Al	Al	Ni
Relativna gostota	[%]	2,5–20,0	1,0–35,0	6,0–10,0	3,0–20,0	2,2–6,7
Poroznost	[%]	80–97,5	65–99	90–94	80–97	93,3–97,8
Struktura celic		zaprte	zaprte	zaprte	odprte	odprte
Modul elastičnosti	[GPa]	0,02–2,0	1,7–12	0,4–1,0	0,06–0,3	0,4–1,0
Strižni modul	[GPa]	0,001–1,0	0,6–5,2	0,3–0,35	0,02–0,1	0,17–0,37
Modul stisljivosti	[GPa]	0,02–3,2	1,8–13,0	0,9–1,2	0,06–0,3	0,4–1,0
Poissonovo število		0,31–0,34	0,31–0,34	0,31–0,34	0,31–0,35	0,31–0,36
Meja plastičnosti	[MPa]	0,04–7,0	2,0–20,0	1,6–1,8	0,9–2,7	0,6–1,1
Tlačna trdnost	[MPa]	0,04–7,0	1,9–14,0	1,3–1,7	0,9–3,0	0,6–1,2
Natezna trdnost	[MPa]	0,05–8,5	2,2–30,0	1,6–1,9	1,9–3,5	1,0–2,4
Deformacija zgostitve ε_z		0,6–0,9	0,4–0,8	0,7–0,82	0,8–0,9	0,9–0,94

4 RAZVOJ IN UPORABNOST CELIČNIH KOVINSKIH MATERIALOV

Razvoj sodobnih celičnih kovinskih materialov, posebej kovinskih pen, je zelo pomemben, saj imajo celične kovine in zlitine kovin raznovrstne prednosti pred drugimi materiali, kot so: električna in toplotna prevodnost, velika trdnost ter velika toplotna obstojnost, majhna gostota (zelo lahke strukture), akustična izolativnost in dušilnost, hidrofobnost (majhna absorpcija vode), sposobnost absorpcije mehanskega dela z deformacijo, vzdržljivost pri dinamičnih obremenitvah, velika odpornost proti utrujanju, nevnjetljivost, možnost recikliranja in vedno bolj dostopne cene [4, 17].

Mikro- in makroskopske lastnosti celičnih kovinskih materialov so zelo privlačne za uporabo v številnih industrijskih panogah, kot so vesoljska, letalska, ladjedelniška, železniška in avtomobilska industrija. V avtomobilski industriji se celični kovinski materiali uporabljajo primarno kot elementi za absorbiranje velike količine mehanske energije s svojo deformacijo. Celični kovinski materiali se uporabljajo tudi v kompozitnih sendvičnih strukturah, ki so navadno sestavljene iz dveh »krovnih« plošč in vmesnega jedra, ki je iz celičnega materiala. Takšne sendvične strukture imajo večjo vlogo v različnih tehničnih aplikacijah zaradi visoke togosti, trdnosti in zmanjšane mase. V nekaterih primerih so posamezni celični elementi bistveni, saj so spojeni z uporabo različnih tehnologij, kot je sintranje, spajkanje in lepljenje. Slednje zagotavlja najbolj ekonomičen način spajanja in omogoča nadaljnje zmanjšanje stroškov in širitev potencialnih aplikacij [26].

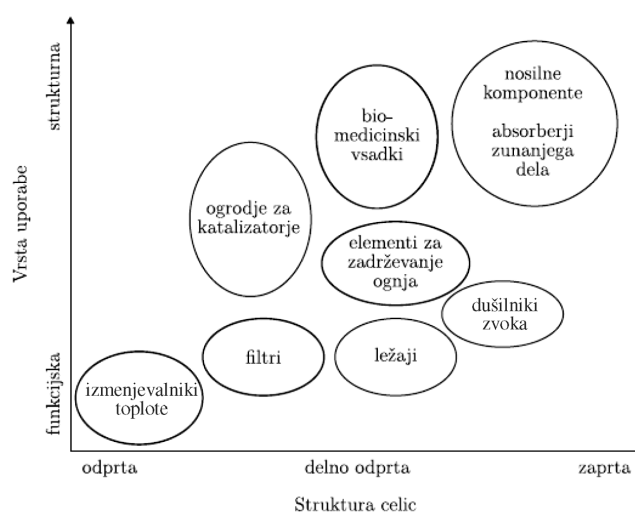
Celični materiali se uporabljajo tudi kot toplotni izmenjevalniki, filtri, ležaji, dušilniki zvoka, biomedicinski vsadki, kot elementi za zadrževanje ognja, kot ogrodja katalizatorjev in kot elementi za absorpcijo zunanjega mehanskega dela (**slika 8**). Elementi za absorpcijo dela se uporabljajo predvsem v vozilih, in

sicer na mestih deformacijskih con za izboljšanje pasivne varnosti v prometu. Togost elementov za izboljšanje pasivne varnosti je treba zelo previdno povečevati, da takšen element ohrani svojo varovalno funkcijo; ravno to omogočajo celični materiali. Porušitev celičnega materiala v tlačnem območju je namreč mogoče zelo dobro načrtovati z izbiro osnovnih lastnosti celičnega materiala, kot so vrsta osnovnega materiala, relativna gostota in velikost celic.

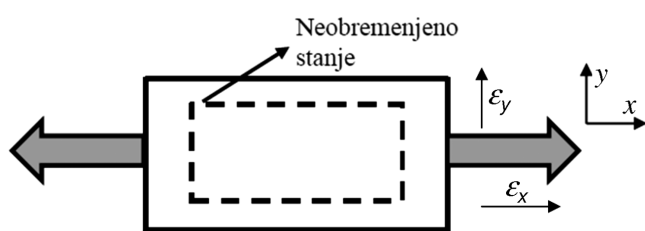
Pogosto so celični materiali uporabljeni tudi kot polnilo votlih konstrukcijskih delov in sestavnih oz. nosilnih elementov. Pri deformaciji takšnih delov se pojavi ugoden sinergijski učinek med komponentami, to je z votlim nosilcem in celičnim polnilom, kot je povečanje upogibne togosti, sprememba lastne frekvence nihanja, povečana dušilna sposobnost ipd.

5 AVKSETIČNI CELIČNI MATERIALI

Večina materialov ima pozitivno Poissonovo razmerje med prečno in vzdolžno deformacijo v razponu od 0 (porozni materiali, npr. pluta) do 0,5



Slika 8: Področja uporabe celičnih poroznih kovin glede na strukturo njihovih celic



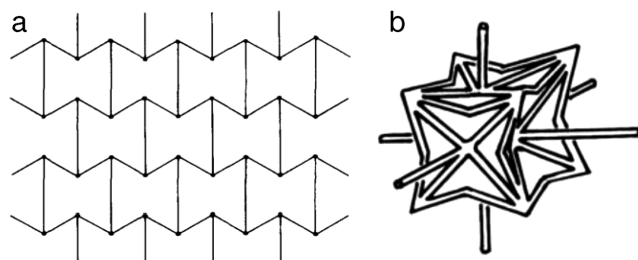
Slika 9: Shematični prikaz deformacije avksetičnih materialov ob natezni obremenitvi

(nestisljivi materiali, npr. guma) [19]. Obstajajo pa materiali oziroma materialne strukture z negativnim Poissonovim razmerjem, ki so znani kot »avksetični« materiali [19, 20]. Te materiale odlikuje bistveno povečanje/zmanjšanje njihovega volumna pri natezni/tlačni obremenitvi (**slika 9**) [5]. Avksetični materiali imajo zaradi svojih posebnih mehanskih lastnosti veliko potencialno uporabno vrednost v mnogih tehničnih aplikacijah. Vendar je njihova uporaba za zdaj še zelo redka, predvsem zaradi omejenega poznanja in zahtevnosti njihove izdelave.

Glede na poreklo lahko avksetične materiale razvrščamo na naravne in sintetične. Pri opazovanju mehanskih lastnosti naravnega avksetičnega materiala je veliko raziskovalcev dobilo navdih za iskanje osnovnih mehanizmov, ki povzročajo avksetično vedenje [18]. Te ugotovitve so bile uporabljene za oblikovanje sintetičnih materialov [18, 21]. V naravi avksetičnih materialov v makromerilu praktično ni, vendar pa obstajajo številni materiali, ki se vedejo avksetično v molekulskem merilu.

Prva obsežna raziskava na področju naravnih avksetičnih materialov je bila izvedena na silicijevem dioksidu (SiO_2), ki ima zelo podobno vedenje v primerjavi z avksetičnimi materiali. Silicijev dioksid ima zelo zanimivo vedenje in lastnosti pri visokih temperaturah in pritiskih. Znano je, da lahko SiO_2 obstaja v veliko različnih kristalnih oblikah, kot so kristobalit, tridimit, coesit, stishovite ... Te oblike (razen stishovit) so navadno tridimenzionalne mreže, zgrajene iz tetraedrov SiO_4^{4-} . Faze SiO_2 se rabijo kot modelni sistemi za študij visokotlačnih struktur, faznih prehodov in kemijskih vezi. Pri raziskavi so ugotovili, da ima analiziran material nasprotno od drugih silikatov negativno Poissonovo število (v odvisnosti od smeri obremenjevanja so vrednosti od +0,08 do -0,5) [8].

Negativno Poissonovo število imajo tudi nekateri zeoliti in že v letu 1928 analiziran pirolitski grafit [9]. Vsi preizkusi so bili do sedaj izvedeni na molekularni ravni, saj za zdaj še ni bilo mogoče izdelati materialov iz avksetičnih molekul in to vedenje prenesti na makroskopsko raven. Nekatero raziskavo [10] so sicer pokazale, da se lahko ob določenih deformacijah tudi koža vede kot avksetični material. Ob tem pa je treba

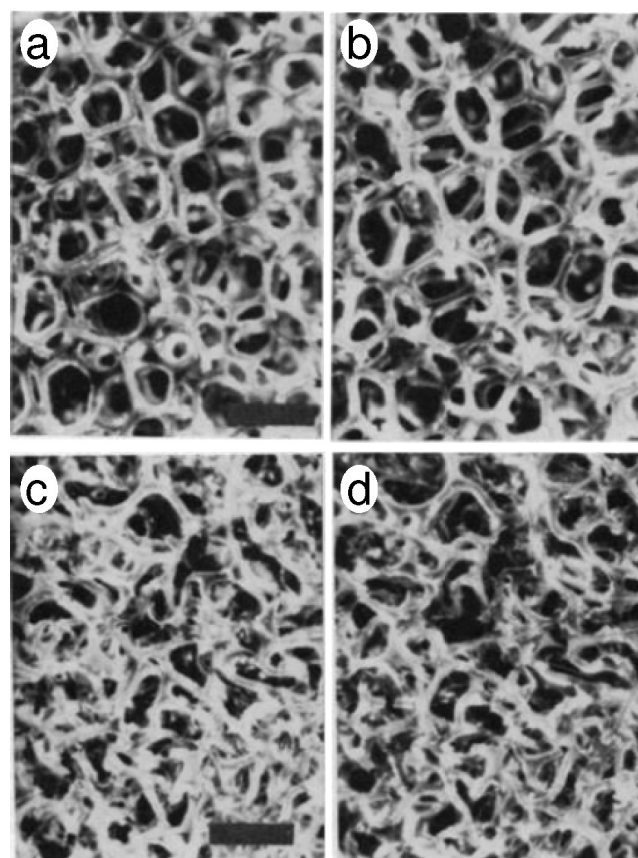


Slika 10: Idealizirana osnovna zgradba dvodimenzijske (a) in tridimenzijske (b) avksetične celične strukture [5]

poudariti, da je ob merjenju mehanskih lastnosti naravnih materialov zelo pomembno preučiti vpliv drugih dejavnikov na rezultate preizkusov, kot so na primer kemijske reakcije, vlažnost, temperatura ipd.

V zadnjih desetletjih je potekal razvoj avksetičnih metamaterialov.

Razvoj najpreprostejše realne 2D-strukture z avksetičnim vedenjem je prikazan na **sliki 10a** [5]. Leta 1987 so bili ustvarjeni prvi 3D sintetično narejeni porozni avksetični materiali, in sicer s preobrazbo osnovne celice konvencionalne odprtocelične pene, tako da so bile stene strukture upognjene proti notranjosti, kar je shematično prikazano na **sliki 10b** [5, 7]. Na mikroskopskih posnetkih strukture (**slika 5**) je lepo razvidno, da je zgradba avksetične strukture veliko



Slika 11: Primerjava strukture konvencionalne (a, b) in spremenjene konvencionalne v avksetično porozno strukturo (c, d) [7]

bolj zapletena kot zgradba konvencionalne pene, kar pomembno vpliva na anizotropnost materiala.

Preobrazba osnovne celice strukture je bila dosežena s kombinacijo obremenjevanja (triaksialno stiskanje) in segrevanja do temperature mehčanja osnovnega materiala celične strukture. Analiziranih je bilo več različnih poliestrskih pen in vse so po preobrazbi imele negativne vrednosti Poissonovega razmerja (srednja vrednost $-0,7$). V tej raziskavi so bile analizirane tudi kovinske pene, katerih geometrija osnovne celice je bila spremenjena s plastično deformacijo v treh med seboj pravokotnih smereh.

Sintetično ustvarjene avksetične materiale lahko razdelimo v tri glavne skupine:

- strukture, podobne satovju (**slika 10a**),
- pene (**sliki 10b in 5**),
- polimerne strukture (spodnja leva struktura na **sliki 11c**).

6 SKLEP

V prispevku so obravnavani celični kovinski materiali, na kratko pa so predstavljene tudi posebnosti avksetičnih celičnih materialov. Pri tem lahko na osnovi pregleda sodobne literature ugotovimo naslednje:

- Temeljna prednost celičnih materialov je njihova majhna relativna gostota ob visoki togosti, ki jo dosežemo z načrtovano poroznostjo materiala.
- S sodobnimi postopki lahko izdelamo različne vrste kovinskih celičnih struktur, ki imajo raznovrstne kombinacije lastnosti.
- Celični kovinski materiali se vse bolj uporabljajo v sodobni industriji. Eno izmed najpomembnejših področij za prihodnjo uporabo celičnih materialov je avtomobilska industrija, kjer se z uporabo celičnih materialov poveča sposobnost mehanske absorpcije energije z njihovo deformacijo, kar je ključnega pomena z vidika varnosti vozila.
- Najpogosteje so celični materiali uporabljeni za zapolnitev votlih avtomobilskih delov z namenom, da povečamo togost šasije vozila.
- Avksetični celični materiali z negativnim Poissonovim razmerjem so sorazmerno slabo raziskani, zaradi česar še niso širše praktično uporabni, kljub številnim potencialnim možnostim.

7 Literatura

- [1] J. Banhart, *Progress in Materials Science*, 46 (2001) 6, 559–632
- [2] A. Evans, J. Hutchinson, M. Ashby, *Progress in Materials Science*, 43 (1998) 3, 171–221
- [3] L. Gibson, M. Ashby, *Cellular solids: structure and properties – 2nd edition*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- [4] M. Vesenjsek, Računalniško modeliranje celičnih struktur pod vplivom udarnih obremenitev, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2006
- [5] M. Mir, M. Najabat Ali, J. Sami, U. Ansari, Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures., *National University of Sciences and Technology (NUST), School of Mechanical and Manufacturing Engineering (SMME)*, Islamabad, 2014
- [6] K. Sieradzki, D. J. Green, L. J. Gibson, Mechanical properties of porous and cellular materials, *Materials Research Society*, Boston, 1991
- [7] R. S. Lakes, *Science*, 235 (1987) 4792, 1038–1040
- [8] A. Yeganeh-Haeri, D. J. Weidner, J. B. Parise, *Science*, 257 (1992) 5070, 650–652
- [9] W. Voigt, *Lehrbuch der Kristallphysik (mit Ausschluss der Kristalloptik)*, B. G. Teubner Leipzig, 1928
- [10] C. Lees, J. F. Vincent, J. E. Hillerton, *Biomed. Mater. Eng.*, 1 (1991) 1, 19–23
- [11] D. Papadopoulos, I. Konstantinidis, N. Papanastasiou, S. Skolianos, H. Lefakis, D. Tsipas, *Materials Letters*, 58 (2004) 21, 2574–2578
- [12] H. Fusheng, W. Jianning, C. Hefa, G. Junchang, *Journal of Materials Processing Technology*, 138 (2003) 1–3, 505–507
- [13] V. Shapovalov, *MRS Bulletin*, 19 (1994) 4, 24–29
- [14] M. F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. Wadley, *Metal foams: A design guide*, Elsevier Science, Burlington, 2000
- [15] Metal foam info, www.metalfoam.net, zadnjič dostopano 4. 4. 2015
- [16] T.-C. Lim, *Auxetic materials and structures*. Springer, 2015
- [17] M. Borovinšek, Računalniško modeliranje celičnih materialov neurejene strukture, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2009
- [18] Evans, K. E.; Alderson, A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking! *Adv. Mater.*, 12 (2000), 617–628
- [19] Lakes, R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235 (1987), 1038–1040
- [20] Evans, K. E.; Nkansah, M. A.; Hutchinson, I. J.; Rogers, S. C. Molecular network design. *Nature*, 353 (1991), 124
- [21] Yang, W.; Li, Z. M.; Shi, W.; Xie, B. H.; Yang, M. B. Review on auxetic materials. *J. Mater. Sci.*, 39 (2004), 3269–3279
- [22] Critchley, R.; Corni, I.; Wharton, J. A.; Walsh, F. C.; Wood, R. J. K.; Stokes, K. R. A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams. *Phys. Status Solidi B*, 250 (2013), 1963–1982
- [23] Shen, J.; Zhou, S.; Huang, X.; Xie, Y.M. Simple cubic three-dimensional auxetic metamaterials. *Phys. Status Solidi B*, 251 (2014), 1515–1522
- [24] Bertoldi, K.; Reis, P. M.; Willshaw, S.; Mullin, T. Negative Poisson's ratio behaviour induced by an elastic instability. *Adv. Mater.*, 22 (2010), 361–366
- [25] Mancusi, G.; Feo, L. A refined finite element formulation for the microstructure-dependent analysis of two-dimensional (2D) lattice materials. *Materials*, 6 (2013), 1–17
- [26] Vesenjsek M; Ren Z., *Metallic porous materials*, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2015