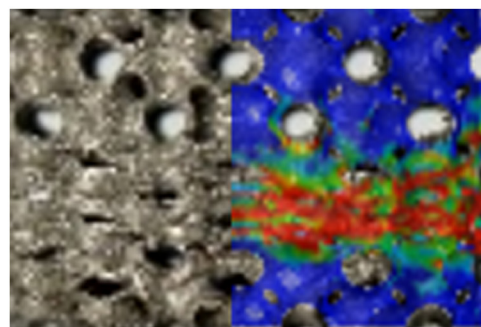
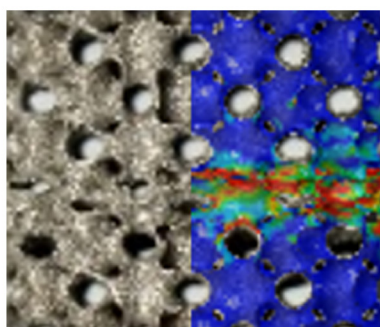
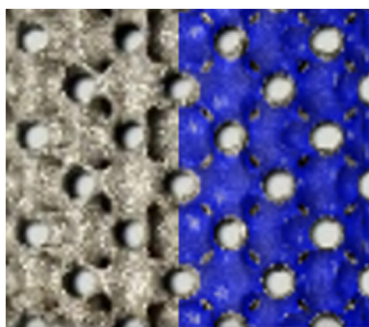




Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

GEOMETRIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CELIČNIH METAMATERIALOV



Nejc NOVAK
Branko NEČEMER



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Geometrijske in mehanske lastnosti celičnih metamaterialov

Avtorja
Nejc Novak
Branko Nečemer

Maj 2025

Naslov <i>Title</i>	Geometrijske in mehanske lastnosti celičnih metamaterialov <i>Geometrical and Mechanical Properties of Cellular Metamaterials</i>
Avtorja <i>Authors</i>	Nejc Novak (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Branko Nečemer (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
Recenzija <i>Review</i>	Srečko Glodež (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Lovre Krstulović-Opara (Univerza v Splitu, Fakulteta za elektrotehniko, strojništvo in ladjedelništvo)
Lektoriranje <i>Language editing</i>	Amidas d.o.o.
Tehnični urednik <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
Oblikovanje ovitka <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
Grtafika na ovitku <i>Cover graphics</i>	Poligon trikotnikov, avtor: zoryart, pixabay.com, 2021
Grafične priloge <i>Graphic material</i>	Vsi viri so lastni, če ni navedeno drugače. Novak, Nečemer (avtorja), 2025

Založnik <i>Published by</i>	Univerza v Mariboru Univerzitetna založba Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija https://press.um.si , zalozba@um.si
Izdajatelj <i>Issued by</i>	Univerza v Mariboru Fakulteta za strojništvo Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija https://www.fs.um.si , fs@um.si
Izdaja <i>Edition</i>	Prva izdaja
Vrsta publikacije <i>Publication type</i>	E-knjiga
Izdano <i>Published at</i>	Maribor, Slovenija, maj 2025
Dostopno na <i>Available at</i>	https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/970



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba
/ University of Maribor, University Press

Besedilo / Text © Novak, Nečemer (avtorja), 2025

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercialNoDerivs 4.0 International License.*

Uporabnikom je dovoljeno reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

CIP – Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

539.2:620.1 (0.034.2)

NOVAK, Nejc, 1991-, strojnik

Geometrijske in mehanske lastnosti celičnih metamaterialov [Elektronski vir] / avtorja Nejc Novak, Branko Nečemer. – 1. izd. – E-publikacija. – Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2025

Način dostopa (URL): <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/970>

ISBN 978-961-286-990-8 (Pdf)

doi: 10.18690/um.fs.4.2025

COBISS.SI-ID 235618819

ISBN 978-961-286-990-8 (pdf)

DOI <https://doi.org/10.18690/um.fs.4.2025>

Cena Brezplačni izvod

Odgovorna oseba založnika Prof. dr. Zdravko Kačič
For publisher rektor Univerze v Mariboru

Citiranje Novak, N., Nečemer, B. (2025). *Geometrijske in mehanske lastnosti celičnih*
Attribution metamaterialov. Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba. doi:
10.18690/um.fs.3.2025

Kazalo

1	Uvod.....	1
2	Uvod v celične metamateriale.....	3
2.1	Razdelitev celičnih metamaterialov.....	5
2.2	Mehanske lastnosti celičnih metamaterialov.....	7
3	Avksetične celične strukture.....	9
3.1	Avksetična satovja.....	13
3.1.1	Vbočene strukture.....	13
3.1.2	Strukture rotirajočih enot.....	13
3.1.3	Modeli manjkajočih medceličnih povezav.....	13
3.1.4	Kiralne strukture.....	14
3.2	Spremenjene konvencionalne pene.....	14
3.3	Mikroporozne avksetične strukture.....	15
3.4	Kompozitne avksetične strukture.....	15
3.5	Druge geometrije avksetičnih struktur.....	17
4	Celične strukture TPMS.....	19
4.1	Definicija minimalnih površin.....	20
4.2	Generiranje celičnih struktur TPMS.....	22
5	Proizvodni procesi.....	25
5.1	Avksetične strukture.....	27
5.2	Strukture TPMS.....	29
6	Geometrijska karakterizacija.....	31
6.1	Določitev geometrije.....	31
6.1.1	Avksetične strukture iz obrnjenih tetrapodov.....	31
6.1.2	Kiralne avksetične strukture.....	32
6.1.3	Strukture TPMS.....	34
6.2	Določitev natančnosti in kakovost izdelave preizkušancev.....	34
6.2.1	Vpliv izdelovalne tehnologije na mehanske lastnosti 2D-struktur.....	35
6.2.2	Vpliv izdelovalne tehnologije na mehanske lastnosti 3D-struktur.....	37
7	Eksperimentalna mehanska karakterizacija.....	41
7.1	Teoretične osnove.....	41
7.1.1	Teoretična izhodišča monotonega mehanskega testiranja celičnih metamaterialov.....	41
7.1.2	Teoretična izhodišča dimenzioniranja na življenjsko dobo.....	42
7.2	Monotono obremenjevanje.....	45
7.2.1	Kvazistatično obremenjevanje celičnih metamaterialov.....	46
7.2.1.1	Avksetične strukture iz obrnjenih tetrapodov.....	46
7.2.1.2	Kiralne avksetične strukture.....	49
7.2.1.3	Strukture TPMS.....	51
7.2.2	Obremenjevanje pri višjih hitrostih.....	52
7.3	Ciklično dinamično obremenjevanje.....	56
7.4	Primerjava različnih geometrij.....	61

8	Računalniške simulacije	63
8.1	Računalniške simulacije monotonega obremenjevanja.....	63
8.2	Računalniški modeli napovedovanja življenjske dobe	66
9	Uporaba celičnih metamaterialov	71
10	Zaključek	77
	Literatura.....	79

1 Uvod

Učbenik *Geometrijske in mehanske lastnosti celičnih metamaterialov* obravnava kompleksno in hitro razvijajoče se področje celičnih metamaterialov, ki združujejo inovativne geometrijske zasnove in edinstvene mehanske lastnosti. Struktura učbenika je razdeljena na deset poglavij, ki sistematično vodijo bralca od osnovnih konceptov do naprednih raziskav, proizvodnih metod in praktične uporabe. Prvo poglavje služi kot uvod, s čimer bralec pridobi širši vpogled v vsebino tega učbenika in pomen teh materialov za sodobno znanost in industrijo.

Drugo poglavje se osredotoča na osnove celičnih metamaterialov. Najprej so na splošno opisani celični materiali, ki se pojavljajo v različnih oblikah in aplikacijah, kar vključuje tudi tradicionalne penaste materiale, predvsem trenutno v inženirski praksi široko uporabljene aluminijaste pene.

Nato sledita poglavji, usmerjeni na moderne celične metamateriale, ki imajo določene specifične lastnosti in veljajo za ene najboljših kandidatov za bodoče inženirske aplikacije, zato je tudi fokus tega učbenika predvsem na določevanju geometrijskih in mehanskih lastnosti teh metamaterialov. To so avksetične celične strukture, ki so zaradi negativnega Poissonovega razmerja sposobne širjenja v prečni smeri pri nateznih obremenitvah, in TPMS (ang. *Triply Periodical Minimal Surface*) celične strukture, ki se uporabljajo zaradi svojih izjemnih mehanskih in geometrijskih lastnosti, kot so nizka gostota, velika trdnost in prilagodljivost. Poseben poudarek je na razumevanju njihove edinstvene strukture in funkcionalnosti.

Peto poglavje podrobno obravnava proizvodne procese teh materialov. Na začetku so predstavljene tradicionalne proizvodne metode, kot so Alporas in Foaminal, ki omogočajo izdelavo klasičnih penastih materialov, predvsem aluminijastih pen. Opisani so tudi naprednejši postopki, vključno z usmerjenim

strjevanjem in litjem z izstavljenim jedrom. Osrednji del tega poglavja je namenjen dodajalni tehnologiji, ki je danes ključna za izdelavo sodobnih metamaterialov (avksetične in TPMS-strukture). Ta tehnologija omogoča natančno in prilagodljivo izdelavo kompleksnih geometrijskih oblik, ki jih tradicionalne metode težko dosežejo.

Šesto poglavje, posvečeno geometrijski karakterizaciji, podaja raznolikost geometrijskih konfiguracij avksetičnih in TPMS-struktur. Opisani so načini za analizo in vrednotenje teh geometrij ter vplivi različnih proizvodnih tehnologij na natančnost in kakovost izdelave 2D- in 3D-struktur. Poglavje se osredotoča tudi na pomembnost nadzora geometrije, saj ta neposredno vpliva na mehanske in funkcionalne lastnosti metamaterialov.

V sedmem poglavju, ki obravnava mehansko karakterizacijo, so najprej predstavljena teoretična izhodišča za testiranje mehanskih lastnosti celičnih metamaterialov. Sledi poglobljen pregled rezultatov eksperimentalnih raziskav, ki vključujejo različne obremenitvene scenarije. Monotone obremenitve so proučevane pri kvazistatičnih in dinamičnih hitrostih, kar omogoča oceno odpornosti materialov na nenadne in trajne obremenitve. Ciklično dinamično obremenjevanje pa vključuje analizo utrujanja materiala in določanje njegove življenjske dobe. Poudarjene so ključne razlike med avksetičnimi in TPMS-strukturami ter vpliv posameznih proizvodnih tehnologij na njihove lastnosti. To poglavje je še posebej koristno za inženirje in raziskovalce, ki želijo razumeti, kako prilagoditi lastnosti materialov specifičnim zahtevam. Poleg eksperimentalnih rezultatov so v poglavju osem predstavljeni tudi računalniški modeli, ki temeljijo na Metodi Končnih Elementov (MKE) in omogočajo simulacije mehanskega obnašanja omenjenih metamaterialov.

Deveto poglavje navaja smernice za uporabo celičnih metamaterialov v različnih realnih aplikacijah. Predstavljeni so primeri iz prakse, kjer se ti materiali uporabljajo zaradi svoje edinstvene kombinacije nizke gostote, visoke trdnosti, prilagodljivosti in sposobnosti absorbiranja energije. Uporaba sega od medicinskih implantatov in zaščitne opreme do letalske in avtomobilske industrije ter gradbeništva.

V zadnjem, desetem poglavju so nato podani določeni zaključki, povzetek ugotovitev in sklepi. Poglavje

poudarja tudi prihodnje trende in možnosti razvoja na tem področju.

Učbenik tako ponuja celovit vpogled v področje celičnih metamaterialov, predvsem avksetičnih in TPMS-celičnih struktur, in je nepogrešljiv vir za raziskovalce, inženirje ter vse, ki se zanimajo za napredne metamateriale in njihove potenciale v sodobni industriji.

2 Uvod v celične metamateriale

Razvoj modernih tehnologij na vseh področjih inženirstva v zadnjem času zahteva, da v mnogih aplikacijah (npr. udarna, balistična, toplotna, zvočna zaščita) ne zadošča le določitev osnovnega materiala in njegove zunanje oblike, ampak je pogosto pomembna tudi njegova notranja geometrija oziroma topološka umestitev v končni izdelek ali konstrukcijo. Na tem področju so bili najprej proučevani naravni materiali, kot so les, kosti, čebelji panji, ki so prilagojeni določenim vrstam obremenitev, vremenskim vplivom ipd. Z napredkom tehnologij izdelave pa so bili v zadnjih desetletjih razviti tudi mnogi metamateriali, ki jih lahko v splošnem razdelimo v dve večji skupini: na strukturne in funkcionalne metamateriale. Razvoj strukturnih metamaterialov je osredotočen predvsem na izboljšanje mehanskih in fizikalnih lastnosti, pogosto z namenom zmanjšanja mase. Razvoj funkcionalnih metamaterialov pa je usmerjen na oblikovanje materialov, katerih odziv na obremenitve je posebej načrtovan. Metamateriali imajo pogosto posebne lastnosti, ki jih običajno ne najdemo v naravi, npr. (pol)prevodni polimeri, materiali, sposobni zamenjave predznaka elektromagnetnega polja, materiali z negativnim temperaturnim/vlažnostnim koeficientom in materiali z negativnim Poissonovim razmerjem. Velika večina teh metamaterialov je po svoji zasnovi celičnih oziroma poroznih, kar je spodbudilo zanimanje mnogih raziskovalcev za razvoj in uporabo teh materialov. Pionirja in avtorja številnih znanstvenih člankov in knjig na tem področju sta Gibson in Ashby [1], ki sta postavila tudi prve temelje analitičnih izračunov geometrijskih in mehanskih lastnosti celičnih struktur oziroma metamaterialov.

Na področju raziskovanja in proizvodnje celičnih metamaterialov se je v zadnjih desetletjih oblikovalo več skupin raziskovalcev in raziskovalnih inštitutov, ki proučujejo celične materiale različnih vrst na različnih področjih in z različnimi metodami. V tem obdobju je

bilo razvitih tudi precej novih celičnih struktur, izdelanih iz različnih vrst osnovnih materialov in z različnimi proizvodnimi postopki [2]. Nekateri celični metamateriali so bili že uvedeni v vsakdanjo uporabo, večina pa jih je še vedno v fazi razvoja in raziskav. Celični metamateriali so večnamenski materiali, saj združujejo edinstvene mehanske in toplotne lastnosti: visoko togost pri nizki masi, visoko sposobnost prenosa toplote glede na volumen in sposobnost absorpcije velikih količin deformacijske energije zaradi deformacije. Največji oviri pri razširitvi uporabe celičnih metamaterialov so predvsem visoki stroški proizvodnje in specifično področje namembnosti izdelanih celičnih struktur [2].

V zadnjih letih se je povečala uporaba dodajalnih tehnologij v vseh vejah inženirstva: hitra izdelava prototipov, strojnih delov, medicinskih implantatov in tudi celičnih materialov [3]. V primeru zahtevnejših oblik izdelave celičnih materialov se te tehnologije kažejo kot zelo obetavne in zato je tudi večina v nadaljevanju predstavljenih modernih celičnih metamaterialov izdelana s temi tehnologijami. Dodajalne tehnologije omogočajo izdelavo poljubne oblike celične strukture, ki je lahko predhodno razvita s pomočjo topološke optimizacije računalniškega modela. To omogoča namensko prilagoditev strukture načinu obremenitve in s tem izboljšan odziv strukture na predvideno obremenitev, tudi na osnovi gradirane poroznosti.

Celične strukture (imenovane tudi metamateriali) predstavljajo povezano omrežje medceličnih povezav v obliki palic ali plošč, ki tvorijo robove oziroma ploskve posameznih celic. Celični metamateriali so razmeroma nova vrsta materialov, ki imajo korenine v zgodnjih razmišljanjih o strukturiranih materialih s posebnimi lastnostmi. Čeprav se je koncept pojavil šele v 19. stoletju, so se predhodne ideje pojavljale že v antiki, ko

so znanstveniki, kot je Arhimed, proučevali strukture penastih materialov. Pozneje so srednjeveški umetniki, kot je Al-Kindi, raziskovali simetrične vzorce za ustvarjanje optičnih iluzij, Leonardo da Vinci pa je v renesansi proučeval lahkotnost in trdnost naravnih struktur, kot so kosti.

Temelje za razumevanje strukture celičnih metamaterialov je postavil Augustin-Louis Cauchy v 19. stoletju s teorijo elastičnosti, ki je omogočila modeliranje lastnosti strukturiranih materialov. Auguste Bravais je opisal 14 Bravaisovih mrež, ki predstavljajo različne razporeditve točk v prostoru, Lord Kelvin pa je predstavil koncept metamaterialov, ki je spodbudil raziskave materialov z nenavadnimi lastnostmi.

napredne inženirske simulacije in eksperimentiranje na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, ki je prikazan na sliki 2.1. S slike je lepo razviden prehod iz zelo primitivnih osnovnih celic, prek neurejenih v večini aluminijastih pen, do urejenih in skrbno načrtovanih struktur, izdelanih z dodajalnimi tehnologijami.

Nekaj izmed celičnih metamaterialov, podrobneje obravnavanih v tem učbeniku, je prikazanih na slikah 2.2 in 2.3, kjer je razvidno, da so glede na različne geometrije celičnih metamaterialov lahko uporabljeni različni proizvodni procesi in osnovni materiali. Na sliki 2.2 lahko opazimo nekaj struktur, izdelanih iz silikona in plastike s pomočjo dodajalnih tehnologij ali brizganja



Slika 2.1: Razvoj raziskav na področju celičnih metamaterialov na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru

20. stoletje je prineslo razvoj radarja, ki je spodbudil raziskave metamaterialov za nadzor elektromagnetnih valov. Računalniške simulacije so omogočile natančnejše proučevanje lastnosti, nove tehnike izdelave pa so omogočile izdelavo materialov z različnimi strukturami.

21. stoletje je po zaslugi tehnološkega napredka proizvodnih tehnologij prineslo eksponentno rast raziskav. Celični metamateriali so se začeli uporabljati v praktičnih aplikacijah, raziskave pa še vedno potekajo z namenom preoblikovanja različnih industrijskih panog. Pomembni znanstveniki in inženirji na tem področju so bili Augustin-Louis Cauchy, Auguste Bravais, Lord Kelvin, John Pendry in David Smith.

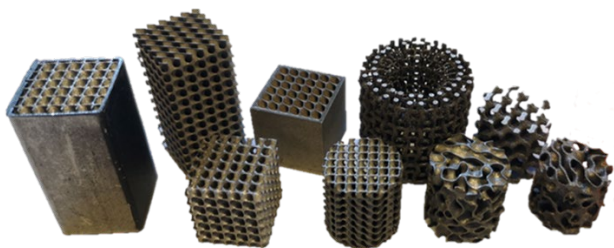
Trend raziskav na področju celičnih metamaterialov v zadnjih 20 letih lahko nazorno prikažemo tudi na podlagi razvoja raziskav v okviru Laboratorija za

v kalup. Dve strukturi sta izdelani iz kovine z metodo litja z iztaljenim jedrom in dodajalnimi tehnologijami (več o tem v poglavju 5).



Slika 2.2: Moderni celični metamateriali, izdelani z različnimi proizvodnimi procesi [4].

Večina v tem delu obravnavanih modernih metamaterialov pa je izdelana s pomočjo dodajalnih tehnologij iz kovin, tako da so ti metamateriali posebej prikazani na sliki 2.3, kjer lahko opazimo, da lahko s pomočjo dodajalnih tehnologij izdelamo izjemno zapletene geometrijske oblike.

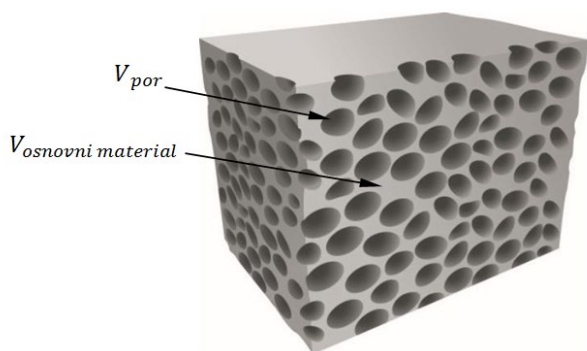


Slika 2.3: Moderni celični metamateriali, izdelani z dodajalnimi tehnologijami iz kovine

Glavna parametra, ki definirata lastnost celičnega metamateriala, sta relativna gostota (poroznost) in osnovni material, ki je lahko kovinski ali nekovinski. Poroznost celične strukture (p) je določena na osnovi relativne gostote celičnega metamateriala (ρ_r), ki je definirana kot razmerje med gostoto celičnega materiala (ρ^*) in gostoto osnovnega materiala (ρ_0) oziroma kot razmerje med volumnom por (V_{por}) in volumnom materiala ($V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}$) (enačba 2.1 in slika 2.4).

$$\rho_r = \rho^* / \rho_0 = \frac{V_{\text{osnovni material}}}{V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}}, \quad (2.1)$$

$$p = 1 - \rho_r = \frac{V_{\text{por}}}{V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}}.$$



Slika 2.4: Celični porozni material

Drugi pomembni parametri celičnih materialov, ki opredeljujejo njihove lastnosti, so morfologija (oblika in velikost por, odprta ali zaprta celična struktura), topologija (urejena ali neurejena porazdelitev por) ter

morebitna prisotnost polnila [1-3]. Za doseganje ustreznih mehanskih (trdnost, togost) in termičnih lastnosti (toplotna prevodnost) celičnega materiala je treba skrbno izbrati omenjene parametre in postopek izdelave [1-5].

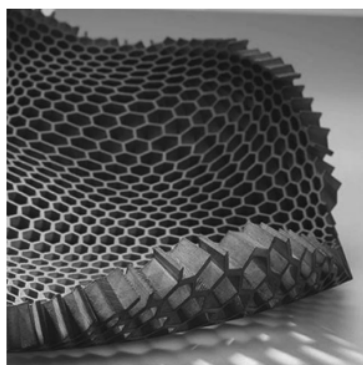
2.1 Razdelitev celičnih metamaterialov

V splošnem celične metamateriale delimo na satovja ter odprto- in zaprtocelične metamateriale (slika 2.5), ki pa jih potem nadalje razvrstimo še na podlagi topologije – urejenosti porazdelitev por. To ključno vpliva na mehanske lastnosti celičnih metamaterialov, ki jih prilagodimo posamezni nameravani uporabi metamateriala.

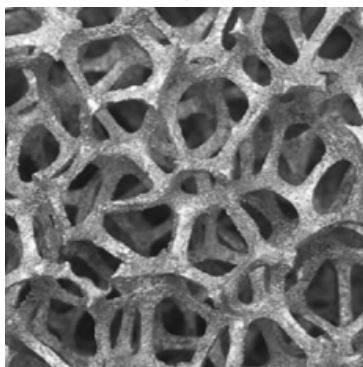
Satovje je naravna ali umetna struktura, sestavljena iz povezanih celic v obliki šestkotnikov ali drugih dvodimenzionalnih geometrijskih oblik, ki se pogosto uporabljajo zaradi svoje učinkovitosti in trdnosti. Naravni primer satovja je čebelje satje, ki ga čebele gradijo za shranjevanje medu in vzrejo zaroda. Šestkotna oblika omogoča optimalno uporabo prostora in materiala, saj z najmanjšo količino materiala doseže največjo trdnost. V tehnologiji in inženirstvu so satovja ključna pri oblikovanju lahkih in trdnih materialov, na primer v letalski industriji in gradbeništvu. Njihova zmožnost prenosa obremenitev in odpornost na deformacije sta razlog, da jih pogosto uporabljamo pri izdelavi kompozitnih materialov in nosilnih konstrukcij. Treba pa je tudi upoštevati, da so njihove mehanske lastnosti izrazito ortotropne, kar pomeni, da se mehanske lastnosti v osnovni ravnini razlikujejo od mehanskih lastnosti v normalni smeri na to ravnino.

Odprtocelične metamateriale lahko opišemo kot revolucionarno podvrsto celičnih metamaterialov, ki navdušujejo s svojo lahkotnostjo, trdnostjo in edinstvenimi lastnostmi. Predstavljajo jih ponavljajoče se enote iz votlih kovinskih cevi, palic ali vozlišč, ki skupaj ustvarijo trden, a zračni okvir z izjemno nizko relativno gostoto, ki znaša od 0,1 do 0,3 [5]. Ta struktura jim omogoča doseganje izjemnega razmerja med trdnostjo in težo, kar presega zmogljivosti tradicionalnih materialov [6]. Posledično so odprtocelični metamateriali idealni za lahke konstrukcije v avtomobilski, letalski in vesoljski industriji, saj pripomorejo k zmanjšanju teže vozil in

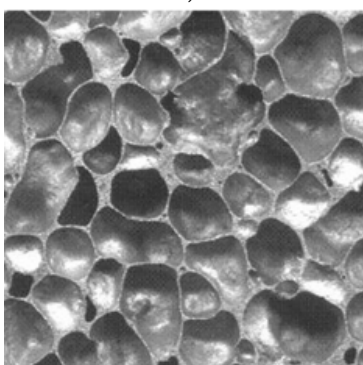
plovil ter posledično k povečanju energetske učinkovitosti in dosega.



a)



b)



c)

Slika 2.5: Osnovna delitev celičnih materialov
a) satovje, b) odprtocelična struktura in c) zaprtocelična struktura [7]

Poleg lahkotnosti in trdnosti odprtocelični metamateriali ponujajo še vrsto drugih izjemnih lastnosti. Njihova odprta struktura omogoča učinkovito absorpcijo energije udarca, kar jih naredi nepogrešljive pri izdelavi zaščitne opreme in komponent, odpornih na trke, v avtomobilski industriji in športu. Enako pomembna je prepustnost odprtoceličnih metamaterialov za zrak in tekočine, ki omogoča njihovo uporabo v filtrirnih sistemih, toplotnih izmenjevalnikih in drugih aplikacijah, kjer je ključen nadzor nad

pretokom tekočin. Znanstveniki in inženirji po vsem svetu aktivno raziskujejo nove možnosti uporabe odprtoceličnih metamaterialov, saj njihov potencial za preoblikovanje različnih industrij presega že znane aplikacije. Obetajo se revolucionarne novosti v lahki gradnji, zaščitni opremi, medicinski tehniki in celo na področju vesoljskih raziskav.

Zaprtocelični metamateriali so še ena podvrsta celičnih metamaterialov, ki se odlikujejo po svojih izjemnih lastnostih zaradi zaprte narave celic. Namesto votlih cevi ali palic, kot pri odprtoceličnih metamaterialih, imajo zaprtocelični metamateriali zaprte celice, ki so lahko izdelane iz kovine, keramike, polimerov ali njihovih kombinacij. Ta edinstvena struktura omogoča doseganje nekaterih ključnih lastnosti, ki jih odprtocelične izvedbe ne morejo ponuditi. Ena glavnih značilnosti zaprtoceličnih metamaterialov je njihova izjemna trdnost in togost, katerih relativna gostota znaša od 0,001 do 0,13, ob tem pa jih zaradi narave celic večina tudi plava, saj tekočina med potapljanjem ne prodre v celice [5]. Zaprta oblika celic ustvarja trden okvir, ki lahko prenese velike sile brez deformacij. To jih naredi primerne za aplikacije, kjer je potrebna visoka odpornost na mehanske obremenitve, kot so konstrukcijski elementi v gradbeništvu, zaščitna oprema z visoko balistično zaščito ali ohišja za občutljivo opremo. Poleg trdnosti se zaprtocelični metamateriali ponašajo tudi z izjemno izolacijo. Zaprte celice učinkovito preprečujejo pretok toplote in zvoka, kar jih naredi idealne za toplotno in akustično izolacijo. To je uporabno v gradbeništvu za zmanjšanje toplotnih izgub in hrupa, v letalski in vesoljski industriji za zaščito pred ekstremnimi temperaturami, ter v medicini za izdelavo izolacijskih materialov za občutljive naprave. Druga zanimiva lastnost zaprtoceličnih metamaterialov je njihova sposobnost za nadzor elektromagnetnih valov. Z natančnim oblikovanjem in razporeditvijo zaprtih celic lahko inženirji ustvarijo metamateriale, ki usmerjajo, odbijajo ali absorbirajo elektromagnetne valove določenih frekvenc. To ima potencialne aplikacije v antenskih sistemih, zaščiti pred elektromagnetnim sevanjem, oblikovanju mikrovalovnih naprav in razvoju metamaterialov z negativnim lomnim količnikom. Raziskave na področju zaprtoceličnih metamaterialov so še v zgodnji fazi, vendar je njihov potencial za raznolike panoge izjemen. Z nadaljnjim razvojem in

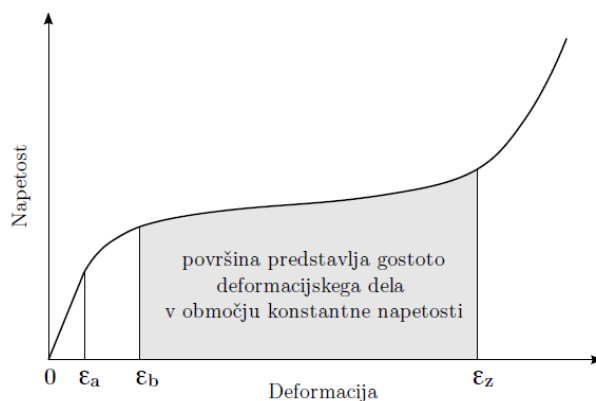
optimizacijo njihovih lastnosti lahko pričakujemo revolucionarne novosti v gradbeništvu, zaščitni opremi, vesoljski tehnologiji, medicini in na številnih drugih področjih.

Kot je razvidno iz zgornjega opisa, obstaja veliko vrst celičnih metamaterialov, ki pa imajo določene skupne lastnosti predvsem pri mehanskih lastnostih, kar bo opisano v naslednjem poglavju. V nadaljevanju tega učbenika bo pozornost posvečena predvsem avksetičnim in TPMS-celičnim metamaterialom, ki veljajo za ene najbolj obetavnih za prihodnje inženirske aplikacije.

2.2 Mehanske lastnosti celičnih metamaterialov

Celični metamateriali imajo pri tlačnih obremenitvah značilno obliko odvisnosti napetosti od deformacije (slika 2.6). Po začetnem kvazilinearno elastičnem odzivu (območje $0-\epsilon_a$), ki je povezan z elastično deformacijo celičnih sten, se osnovni material celične strukture deformira elastično in se v primeru razbremenitve vrne v začetno nedeformirano obliko. S povečevanjem obremenitve preidemo v prehodno območje ($\epsilon_a-\epsilon_b$), kjer se material celične strukture v določenih točkah plastično deformira, kar privede do lokalnih uklonov in porušitev medceličnih sten. Pri nadaljnjem obremenjevanju (območje $\epsilon_b-\epsilon_z$) postanejo še bolj izraziti ukloni medceličnih povezav in porušitve sten, kar se kaže v velikih deformacijah pri skoraj konstantni napetosti (napetostni plato), dokler se celice popolnoma ne sesedejo (zgoščevanje, ki je posledica kontaktov med celicami in njihovim nalaganjem). Na tej točki se togost celičnega metamateriala izrazito poveča

in posledično konvergira k togosti osnovnega materiala (območje $\epsilon_z<$).



Slika 2.6: Slika tipičnega tlačnega odziva [7]

S tovrstnim mehanskim obnašanjem metamateriali absorbirajo veliko količino mehanske energije, kar predstavlja enega izmed najbolj pomembnih potencialov celičnih metamaterialov. Hiter prehod uporabe celičnih materialov v industrijo preprečuje pomanjkanje ustreznih materialnih lastnosti, praktičnih izkušenj in nezaupanje v uporabo novih materialov. Novi materiali se običajno v industriji začnejo uporabljati šele po 15 letih od začetka njihovega razvoja, če izkažejo visoko potencialno uporabnost [3]. Mehanske lastnosti nekaterih najpogostejših komercialnih celičnih materialov so navedene preglednici 2.1. 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.

Preglednica 2.1: Mehanske lastnosti nekaterih kovinskih celičnih materialov [6], [8]

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

3 Avksetične celične strukture

Naše vsakodnevne izkušnje nam govorijo, da se ob nateznem obremenjevanju materiala v eni smeri prerez prečno na to smer zmanjša, obratno pa velja za deformacije ob tlačni obremenitvi. Iz tega razloga nam je praktično nepoznano avksetično obnašanje materialov, ker teh materialov v makromerilu v naravi praktično ni. Vendar pa obstajajo številni materiali, ki se obnašajo avksetično na molekularni ravni. Prvi dokaz o negativnem Poissonovem razmerju v materialu je podal Li [9] na podlagi testiranja monokristalnega kadmija, kjer so pri obremenitvah v določenih smereh vrednosti Poissonovega razmerja dosegle vrednosti $-0,4$.

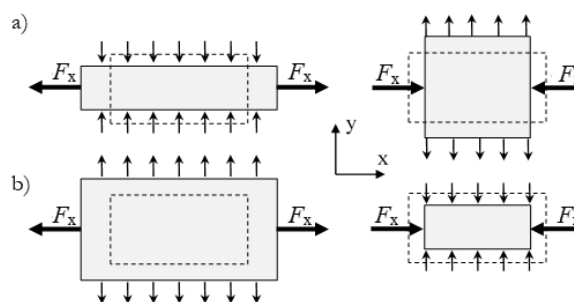
Poissonovo razmerje ν je v splošnem za ravninski primer (slika 3.1) definirano na osnovi enačbe (3.1):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3.1)$$

kjer sta ε_y in ε_x specifični deformaciji v smereh, označenih na sliki 3.1. Negativni predznak v enačbi (3.1) je namenjen temu, da je pri večini naravnih materialov vrednost Poissonovega razmerja pozitivna (tj. zmanjšanje površine prečnega prereza ob natezni obremenitvi). Pri natezni obremenitvi je ε_x pozitiven in ε_y negativen, pri tlačni obremenitvi pa je ravno obratno, kar v obeh primerih rezultira v pozitivnem Poissonovem razmerju. V primeru avksetičnih materialov pa ima Poissonovo razmerje negativen predznak, saj sta deformaciji v smeri obremenitve in prečno na to smer enakega predznaka. Med elastično deformacijo avksetični materiali ne ohranjajo volumna: pri natezni obremenitvi se med deformacijo volumen poveča, obratno pa velja pri tlačni deformaciji. Med deformacijo se zaradi te namenske geometrije materialov pojavijo različne oblike gibanja celične

strukture, kar na makroskopski ravni privede do negativne vrednosti Poissonovega razmerja.

Za opis linearnega mehanskega obnašanja izotropnega materiala pri elastičnih obremenitvah sta potrebna dva parametra: modul elastičnosti E in Poissonovo razmerje ν . Oba materialna parametra je treba pridobiti z eksperimentalnim testiranjem, vendar se zelo pogosto zgodi, da se Poissonovemu razmerju ne posveti veliko pozornosti in se njegova vrednost za večino kovinskih gradiv predpostavi na vrednosti blizu $1/3$, veliko več naporov pa je vloženi v določitev in analizo modula elastičnosti.



Slika 3.1: Shematični potek deformacije neavksetičnih (a) in avksetičnih materialov (b) pri natezni in tlačni obremenitvi [10]

Avksetične strukture so strukture (materiali) z negativnim Poissonovim razmerjem, to pomeni, da pod obremenitvijo znatno spremenijo svoj volumen, kar je prikazano na sliki 3.1 – pri natezni obremenitvi se v eni smeri podaljšajo, prečno na to smer pa razširijo. Takšno obnašanje je posledica načina deformacije avksetičnega celičnega materiala, pri katerem se medcelične povezave deformirajo v želeno obliko. Zaradi potrebne poroznosti za takšno deformacijo lahko te materiale poimenujemo tudi avksetične celične strukture. Z uporabo materialov, ki imajo negativno Poissonovo razmerje, lahko izboljšamo naslednje materialne lastnosti: povečanje strižne togosti, sposobnost absorpcije zvočnih in

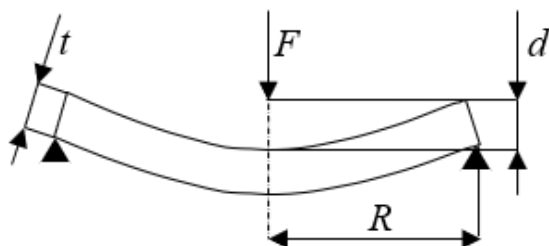
mehanskih udarov, zvišanje vrednosti potrebne energije za prebitje materiala, edinstveno obnašanje pri upogibni obremenitvi ipd. [10].

Za lažje razumevanje vpliva spremembe Poissonovega razmerja na mehanske lastnosti izotropnega materiala je treba uvesti dve novi izpeljani materialni lastnosti, in sicer strižni modul G (odpor proti spremembi oblike pri strižni obremenitvi) in modul stisljivosti K (odpor snovi proti enakomernemu vsestranskemu stiskanju) [11]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (3.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (3.3)$$

Ob predpostavki konstantne vrednosti elastičnega modula v zgornjih enačbah je razvidno, da je pri vrednosti Poissonovega razmerja 0,5 modul stisljivosti neskončno velik, v primeru Poissonovega razmerja blizu -1 pa je vrednost strižnega modula neskončna. Vrednosti Poissonovega razmerja, ki jih ima večina naravnih materialov ($\sim 1/3$), so torej kompromis med odpornostjo proti spremembi oblike in prostornine. Treba je poudariti, da je večina sodobnih izdelkov narejena iz plošč, lupin in nosilcev, za katere pa je izjemno pomembno, da imajo čim višji strižni modul, pa čeprav tega dosežemo na račun zmanjšanja modula stisljivosti [12]. Ob izboljšanju odpornosti proti strižnim obremenitvam sprememba Poissonovega razmerja vpliva tudi na druge mehanske lastnosti posameznih konstrukcijskih delov, kar lahko na primer pokažemo tako, da z uporabo materiala z negativnim Poissonovim razmerjem dosežemo zmanjšanje pomika okrogle plošče ob upogibni obremenitvi (slika 3.2) [11].



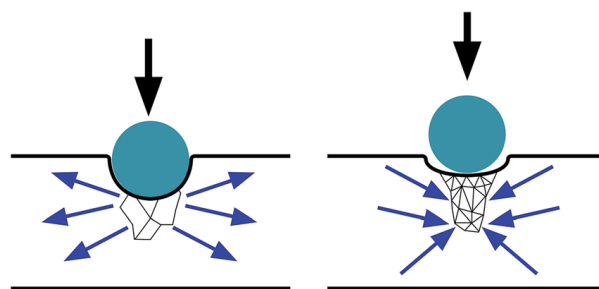
Slika 3.2: Upogib okrogle plošče [11]

Pomik središča okrogle plošče lahko izračunamo z naslednjo enačbo [11]:

$$d = \frac{3FR^2(1 - \nu^2)}{16Et^3}, \quad (3.4)$$

kjer je d vrednost pomika, F velikost točkovne sile, R polmer plošče, ν Poissonovo razmerje, E modul elastičnosti materiala plošče in t debelina plošče. Kot je razvidno iz enačbe (3.4), je pomik središča plošče neposredno odvisen od Poissonovega razmerja, in če se vrednost tega približuje -1 , se vrednost pomika približuje 0.

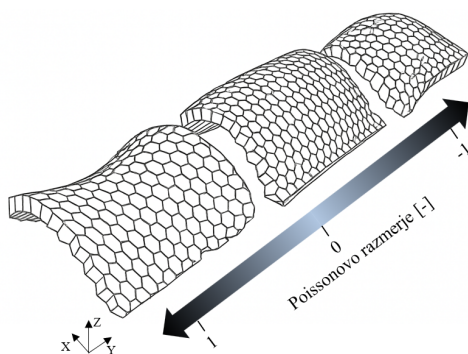
Zraven predstavljenih primerov teoretično izboljšanih mehanskih lastnosti s spremembo vrednosti Poissonovega razmerja je mogoče z uporabo materialov, ki imajo negativno Poissonovo razmerje, izboljšati tudi sposobnost absorpcije zvočnih in mehanskih udarov ter zvišanje vrednosti energije, potrebne za prebitje materiala [10]. Zadnja omenjena lastnost je prikazana na sliki 3.3, kjer je razvidno, da pri avksetičnem materialu material teče v smeri udarca in se tam zgosti, kar je ravno nasprotno, kot se dogaja pri konvencionalnih oziroma neavksetičnih materialih [13]. Zvišanje odpornosti za prebitje materiala je sorazmerno z izrazom $(1 - \nu^2)$, kar je bilo potrjeno tudi z eksperimenti na polimernih [14], kovinskih [15] penah in mikroporoznih polimerih [16].



Slika 3.3: Odziv neavksetičnega (a) in avksetičnega (b) materiala na udarec krogle [17]

Avksetični materiali lahko po podatkih različnih raziskav izboljšajo obnašanje pri strigu (zvišanje strižnega modula) [18], dušenju [19] – tudi z nadzorom območij prepovedanih frekvenc, ki ne prepuščajo valovanja (ang. *band gaps*) [20]), absorpcijo energije [14], [21], zaradi česar so še posebej primerni za raznovrstno uporabo. V primeru avksetičnega

jedra v sendvič strukturah se izkaže dodatna prednost avksetičnega materiala pri upogibni obremenitvi. Materiali s pozitivnim Poissonovim razmerjem se na upogib okrog osi y deformirajo v sedlasto (antiklastično) obliko, kot je prikazano na sliki 3.4, kar je lahko težava pri oblikovanju ukrivljenih sendvič struktur. V tem primeru je zelo priporočljivo uporabiti avksetični material, ki se deformira v sinklastično obliko. Tako se izognemo veliki deformaciji jedra že pred vgradnjo. Ob tem pa so v primeru uporabe sendvič struktur medcelične povezave vedno usmerjene pravokotno na površino, kar izboljša mehanske lastnosti.



Slika 3.4: Sinklastični (negativno Poissonovo razmerje) in antisinklastični (pozitivno Poissonovo razmerje) odziv na upogibno obremenitev

Kot je razvidno iz uvodne predstavitve področja, lahko z avksetičnimi materiali dosežemo negativno Poissonovo razmerje. Razvoj in osnovne celice avksetičnih celičnih struktur, ki omogočajo takšno obnašanje, so predstavljene v naslednjih podpoglavjih. V nadaljevanju so predstavljeni tudi izdelovalni procesi in rezultati eksperimentalnih testiranj ter računalniških simulacij, na koncu pa je podana še uporaba teh materialov.

Že leta 1848 je Saint-Venant ugotovil, da bi lahko anizotropni materiali imeli Poissonova razmerja, manjša od 0. V primeru elastičnih obremenitev izotropnih materialov pa je lahko območje vrednosti Poissonovega števila analitično določeno na osnovi naslednje enačbe, ki je izpeljana na osnovi enačb (3.2) in (3.3):

$$G = K \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}, \quad (3.5)$$

kjer je G strižni modul in K modul stisljivosti. Iz enačbe (3.5) sledi, da če se hočemo izogniti veliki deformaciji materiala pri majhnih obremenitvah in zadostiti zakonom termodinamike, lahko Poissonovo razmerje v primeru izotropnih materialov zaseda vrednosti od -1 do $0,5$ [23]. Vrednosti Poissonovega razmerja za izotropne materiale lahko razdelimo v pet različnih skupin (preglednica 3.1), ki imajo med deformacijo različne fizikalne značilnosti, njihove definicije pa so se razvijale skozi zgodovino.

Preglednica 3.1: Skupine Poissonovih razmerij za izotropne materiale

Vrednost Poissonovega razmerja	Fizikalna značilnost
$\nu = 1$ (2D primer)	ohranitev površine
$\nu = 0,5$	ohranitev volumna
$\nu = 0$	ohranitev prereza
$\nu = -0,5$	ohranitev elastičnega in strižnega modula $E = G$
$\nu = -1$	ohranitev oblike

Najbolj znana fizikalna značilnost nestisljivega izotropnega materiala je, da se volumen med obremenjevanjem ohranja pri $\nu = 0,5$ (primer takšnega materiala je guma). Če ima material $\nu = 0$, se temu materialu med obremenjevanjem ne spremeni širina prereza, ki je pravokoten na smer obremenjevanja (npr. pluta). V primeru $\nu = -0,5$ sta modul elastičnosti in strižni modul enaka (izhaja iz enačbe $\nu = \frac{E}{2G} - 1$), v primeru $\nu = -1$ pa deformacija v eni smeri povzroči enako deformacijo tudi v prečni smeri, tako da se oblika materiala ohrani. V primeru 2D-obremenjevanja je možna tudi vrednost Poissonovega razmerja 1, kar pomeni, da se ob deformaciji v smeri obremenjevanja pojavi enako velika (nasprotna) deformacija v smeri prečno na obremenitev. Na tem mestu je treba poudariti, da je vrednost Poissonovega razmerja anizotropnih materialov lahko v širšem območju, nekateri avtorji navajajo celo območje od $-\infty$ do $+\infty$ [24].

Ob raziskavah Lija [9] na področju testiranja monokristalnega kadmija je bilo eksperimentalno testiranje izvedeno tudi za enokristalni železov pirit FeS_2 [11], kjer so raziskovalci prvi odkrili negativno Poissonovo razmerje v realnih materialih. Za vzrok takega obnašanja materiala so predvideli združene

kristale in določili vrednost Poissonovega razmerja za ta material ($\sim -0,7$). V nadaljevanju je bila trditev glede združenih kristalov ovržena na podlagi zelo obsežnega eksperimentalnega testiranja [25]. Za tem so bili testirani še arzen, antimon in bizmut, ki so v monokristalni obliki vsi zelo anizotropni, kar je dejansko vzrok za pojave negativnega Poissonovega razmerja [26].

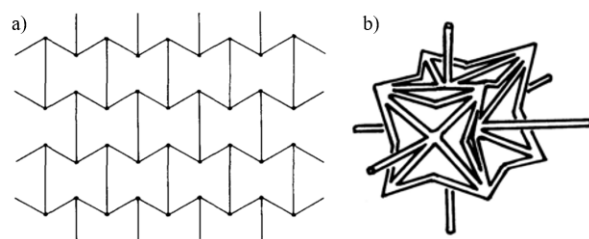
Izraz avksetični material je leta 1991 predlagal Evans [27]. S tem izrazom je poimenoval materiale z negativnim Poissonovim razmerjem. Izraz izvira iz grške besede auxetikos, ki ima v prevodu pomen teži k povečevanju. Avksetični materiali so bili proučevani že prej, vendar so bile komaj leta 1982 vpeljene analitične formule za izračun njihovih lastnosti [1].

Enega izmed največjih primerkov avksetičnih struktur lahko najdemo v nekaterih jedrskih reaktorjih na Japonskem, v katere so nameščali grafitne obroče okrog jedra reaktorja, ki pa niso bili namensko razviti za avksetično obnašanje. Te strukture so bile razvite z namenom prenesti vodoravne strižne obremenitve, ki nastanejo ob potresu, ob tem pa morajo dovoliti deformiranje zaradi termalnega raztezanja dveh različnih materialov (ogljikova sredica in jeklena konstrukcija). Torej z drugimi besedami, ta material mora imeti visoko strižno togost in nizko odpornost proti spremembam volumna [28]. Razvoj, ki je pripeljal do prve izdelane strukture z avksetičnim obnašanjem, je bil namenjen praktičnemu cilju in ne namenskem razvoju materiala z negativnim Poissonovim razmerjem.

Prva obsežna raziskava na področju naravnih avksetičnih materialov je bila izvedena na primeru α -kristobalita (SiO_2), pri čemer so odkrili, da ima analizirani material za razliko od drugih silikatov negativno Poissonovo razmerje (v odvisnosti od smeri obremenjevanja so vrednosti od +0,08 do -0,5) [29]. Negativno Poissonovo razmerje imajo tudi nekateri zeoliti in že v letu 1928 analizirani pirolitski grafit [30]. Vsi ti testi so bili do zdaj izvedeni na molekularni ravni, saj do zdaj še ni bilo mogoče izdelati materialov iz teh avksetičnih molekul in to obnašanje prenesti na makroskopsko raven.

Nekatere raziskave [31] so sicer pokazale, da se lahko ob določenih načinih deformacije tudi koža obnaša kot avksetični material, ob tem pa je treba poudariti, da je ob merjenju mehanskih lastnosti naravnih materialov zelo pomembno proučiti vpliv drugih dejavnikov na rezultate preizkusov, kot so na primer vlaga, temperatura in predvsem kemijske reakcije.

Namenski razvoj avksetičnih materialov se je začel šele tri desetletja pozneje, ko je Almgren [32] predstavil in tudi analitično opredelil eno izmed najpreprostejših vbočenih 2D-struktur, ki omogoča avksetično obnašanje. Leta 1987 so Lakes in sodelavci ustvarili prvi umetno narejeni porozni avksetični material, in sicer s preobrazbo osnovne celice konvencionalne odprtočelične pene, tako da so bile stene celic upognjene navznoter, kar je prikazano na sliki 3.5b [33].



Slika 3.5: Idealizirana osnovna zgradba vbočene dvodimenzionalne (a) in tridimenzionalne (b) avksetične celične strukture [33]

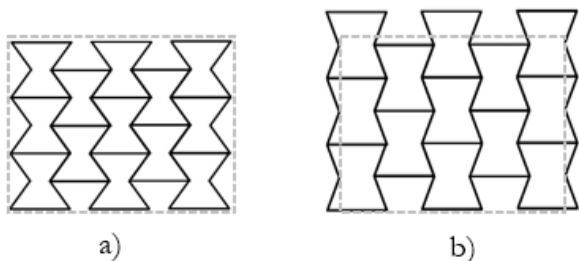
Avtorja v [34], [35] sta prva predstavila analizo ekspaniranega polimera (PTFE), katerega vrednosti Poissonovega razmerja so krepko manjše od teoretično določene meje za izotropne materiale (dosegajo vrednosti do -12). Vzrok tega je predvsem v veliki anizotropnosti materiala. Za doseganje negativnega Poissonovega razmerja, ki je posledica kinematičnega gibanja materiala in potrebe po anizotropnosti, so vsi ti materiali porozni, kar pa je v primerjavi z mehanskimi lastnostmi osnovnega materiala, iz katerega je struktura zgrajena, oslabitev. Za praktično uporabo pa je pomembna izotropnost materiala, zato so različni avtorji nadaljevali delo v iskanju avksetičnih materialov s Poissonovim razmerjem čim bližje -1. Naslednji korak v tem razvoju so bile kompozitne laminatne strukture, ki omogočajo doseganje Poissonovega razmerja zelo blizu -1 [36].

Geometrije osnovnih celic avksetičnih celičnih struktur so v nadaljevanju razdeljene na več različnih skupin, ki ustrezajo njihovem proizvodnemu procesu, geometriji ali načinu deformacije.

3.1 Avksetična satovja

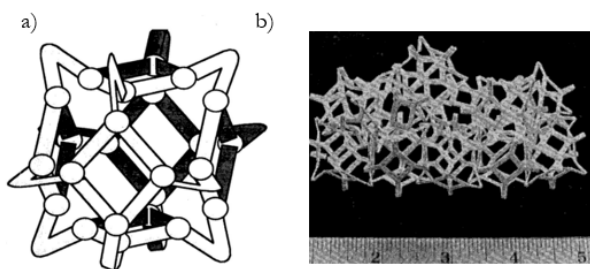
3.1.1 Vbočene strukture

Razvoj različnih geometrij osnovnih celic avksetičnih celičnih struktur se je začel z Almgrenovimi raziskavami [32]. Almgren je na podlagi analize upogibnih deformacij medceličnih povezav analitično določeval lastnosti šestkotne vbočene strukture, prikazane na sliki 3.6. Pri tem je tudi ugotovil, da je za doseganje Poissonovega razmerja -1 in posledično izotropne strukture v strukturo treba dodati še opornike in mednje na navpičnih rebrih namestiti vzmeti [32]. Takšna geometrija ob deformaciji v ravnini povzroči, da se strižne komponente napetosti prenesejo v te vzmeti in tako je dosežen popolnoma izotropen odziv materiala tudi pri vrednosti $\nu = -1$, kar na osnovi enačbe (3.5) rezultira v neskončno velikem strižnem modulu G .



Slika 3.6: Nedeformirana (a) in deformirana (b) geometrija vbočene šestkotne avksetične celične strukture [10]

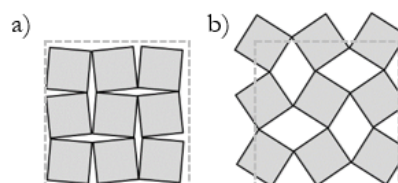
Razvoj se je nadaljeval na področju tridimenzionalnih vbočenih struktur, ki so prikazane na sliki 3.7.



Slika 3.7: Idealizirana osnovna celica vbočene avksetične celične strukture (a) in realna struktura (b) z vbočenimi stranicami [37]

3.1.2 Strukture rotirajočih enot

Modeli struktur rotirajočih enot so bili prvič predstavljeni in analitično analizirani v delu Grime in sodelavcev [38] ter nato razširjeni na več različnih geometrij v [39]. V bistvu izhajajo iz modelov, predstavljenih v [40], kar je razvidno tudi iz primerjave slik 3.8 in 3.14, kjer je prikazana deformacija togih kvadratov, povezanih v vozliščih ali z vlakni. Razen kvadratov je možno za rotirajoče enote uporabiti tudi mnoge druge dvodimenzionalne oblike, kot so: trikotnik, pravokotnik, paralelogram, deltoid [41].

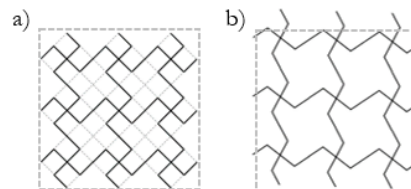


Slika 3.8: Nedeformirana (a) in deformirana (b) geometrija avksetične celične strukture rotirajočih enot [10]

Realno strukturo, ki ima podoben način deformacije, je razvil Taylor s sodelavci in je predstavljena v [42].

3.1.3 Modeli manjkajočih medceličnih povezav

Modeli manjkajočih medceličnih povezav in njihovo poimenovanje so bili predstavljeni v delu Smitha in sodelavcev [43]. Osnova za nastanek te strukture je rešetkasta struktura, ki so ji odvzete nekatere medcelične povezave, kar je prikazano na sliki 3.9.



Slika 3.9: Nedeformirana (a) in deformirana (b) geometrija avksetične celične strukture z manjkajočimi medceličnimi povezavami [10]

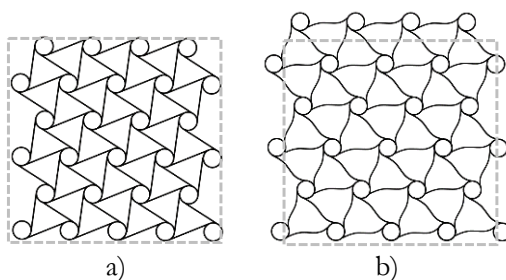
Nekatere naprednejše oblike struktur, osnovanih na teh strukturah, so predstavljene in analizirane na osnovi vrednosti lastnih frekvenc v [44]. V tem delu so na osnovi lastnih oblik osnovnih celic že znanih

struktur razvili nove strukture, ki dosegajo negativno Poissonovo razmerje.

3.1.4 Kiralne strukture

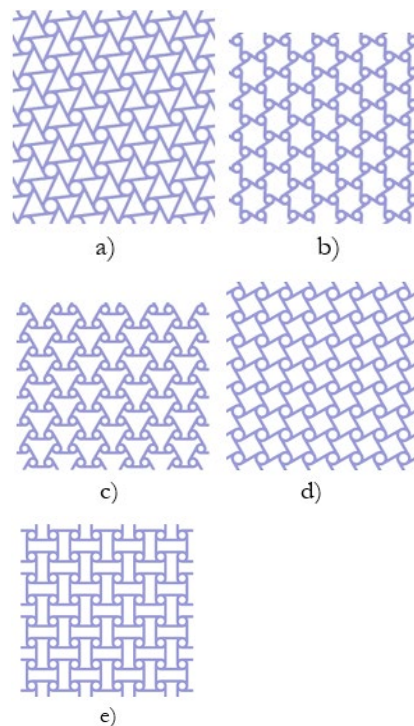
Kiralnost je pojav, ki se kaže v tem, da zrcalna slika predmeta ni enaka sliki predmeta. Nasprotje kiralnosti je akiralnost (nekiralnost). Rečemo tudi, da je predmet, ki se razlikuje od svoje zrcalne slike, kiralen. To pa velja le za nekaj v nadaljevanju proučevanih avksetičnih struktur, zato je v primeru avksetičnih materialov termin kiralnost uporabljen tudi za opis načina deformacije z vrtenjem medceličnih povezav okrog vozlišč [45].

Lakes [46], [47] je raziskoval druge možne konfiguracije geometrij, ki bi omogočale anizotropen odziv materiala in posledično avksetično obnašanje. Struktura na sliki 3.10 je sestavljena iz togih obročev, ki so med seboj povezani s šestimi tangentno pritrjenimi vezmi, in ima negativno Poissonovo razmerje, kar je lepo razvidno, če si vizualiziramo potek obremenjevanja takšne strukture. Geometrija, prikazana na sliki 3.10, ni enaka njeni zrcalni sliki, zato jo lahko imenujemo centralno nesimetrična struktura. V določenih smereh obremenjevanja so te strukture lahko izotropne, vendar so po svoji naravi anizotropne. Geometrije takšne vrste lahko imenujemo tudi hemitropne ali kiralne geometrije, ki sta jih predhodno obravnavala Evans in Caddock, vendar še niso bile poimenovane na ta način [34], [35], [46].



Slika 3.10: Nedeformirana (a) in deformirana (b) šestkotna centralno nesimetrična ali kiralna avksetična struktura [10]

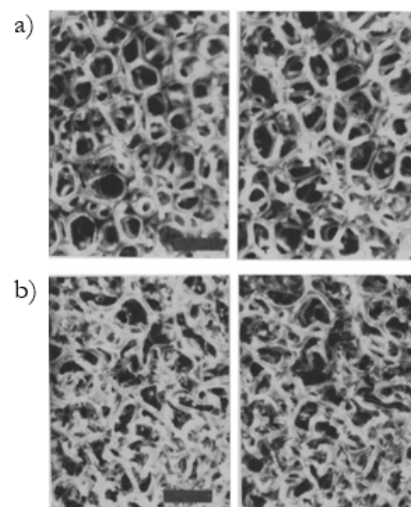
Ob kiralnih strukturah obstajajo tudi antikiralne, ki imajo drugačen sistem povezovanja togih obročev z vezmi, kar je razvidno s slike 3.11 [48], [49].



Slika 3.11: Različne oblike kiralnih avksetičnih struktur: a) heksakiralne, b) trikiralne, c) antitrikiralne, d) tetrakiralne, e) antitetakiralne

3.2 Spremenjene konvencionalne pene

Tudi ta skupina avksetičnih struktur, ki je bila proizvedena s pomočjo kombinacije toplotne obdelave in mehanske deformacije konvencionalne pene, temelji na osnovi modelov vbočenih struktur. Lakes in sodelavci [33] so proizvedli avksetično porozno strukturo, prikazano na sliki 3.12.



Slika 3.12: Primerjava strukture konvencionalne poliuretanske pene (a) in v avksetično celično strukturo spremenjene konvencionalne poliuretanske pene (b) [33]

Na mikroskopskih posnetkih te strukture (slika 3.12) je razvidno, da je zgradba avksetične strukture veliko bolj zapletena kot zgradba konvencionalne pene, kar vpliva na anizotropnost materiala. Preobrazba osnovne celice celične strukture je bila dosežena na osnovi kombinacije obremenjevanja (triaksialno stiskanje) in segrevanja do temperature mehčanja osnovnega materiala celične strukture. Analiziranih je bilo več različnih poliestrskih pen. Vse so imele po preobrazbi negativne vrednosti Poissonovega razmerja (srednja vrednost $-0,7$). V tej raziskavi so bile analizirane tudi kovinske pene, katerih geometrija osnovne celice je bila spremenjena na osnovi plastične deformacije v treh med seboj pravokotnih smereh. S testiranjem lastnosti te spremenjene konvencionalne pene je bilo ugotovljeno, da je s spremembo geometrije osnovne celice nova vrednost Poissonovega razmerja enaka $-0,7$. Rebra osnovne celice so se v tem primeru deformirala in usmerila v notranjost strukture (slika 3.5b), kar omogoča dodatno strižno trdnost med obremenjevanjem, za kar je Almgren v svojo strukturo moral vgraditi dodatne elemente [36].

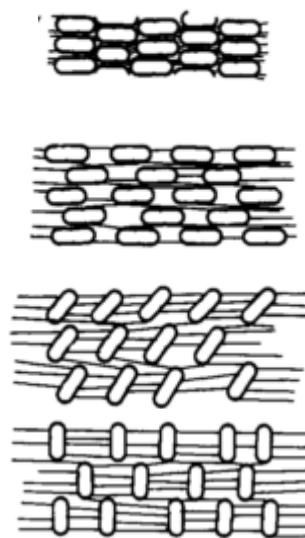
3.3 Mikroporozne avksetične strukture

Evans in Caddock sta proizvedla porozno strukturo z avksetičnim obnašanjem na podlagi mikroporoznega ekspandiranega polimera (ang. *PolyTetraFluoroEthylene* – PTFE), ki ima povsem drugačno strukturo kot konvencionalne pene. Ob eksperimentalnem testiranju so bile izmerjene vrednosti Poissonovega razmerja tudi do -12 (takšne vrednosti so mogoče le, če je material zelo anizotropen) [35]. Shematični prikaz obnašanja tega materiala med natezno obremenitvijo je prikazan na sliki 3.13 in je zelo podoben teoretično predstavljenemu načinu deformacije na sliki 3.14.

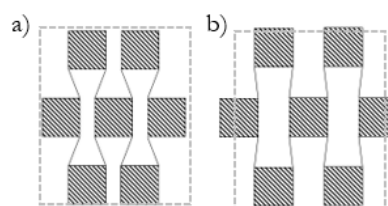
Strukturo si je najlažje predstavljati v idealizirani obliki na sliki 3.14, kjer so razvidni pravokotni vozli oziroma matica, povezani z neraztegljivimi palicami (vlakni) [40].

Mikroporozni avksetični polimeri izkazujejo negativno Poissonovo razmerje, ker je njihova zgradba dovolj porozna, da dovoljuje deformacijo vozlov in vlaken v predvideno obliko. Vendar ta

poroznost vodi do manjše gostote in trdnosti, tako da ti materiali v mnogih primerih niso uporabni za nosilne elemente. Pristop, s katerim bi se bilo mogoče izogniti težavi s poroznostjo, je razvoj molekularnih avksetičnih materialov, kjer je molekularna zgradba razvita z namenom, da povzroči avksetično obnašanje [50], [51]. Zaenkrat se še pojavljajo velike težave pri sintezi teh materialov [27], vendar so lahko v prihodnosti, ob primernem razvoju tehnik sintetiziranja, ti materiali med najbolj primernimi avksetičnimi materiali za uporabo v modernih strukturah tudi kot nosilni elementi.



Slika 3.13: Odziv materiala od natezni obremenitvi v vodoravni smeri [35]

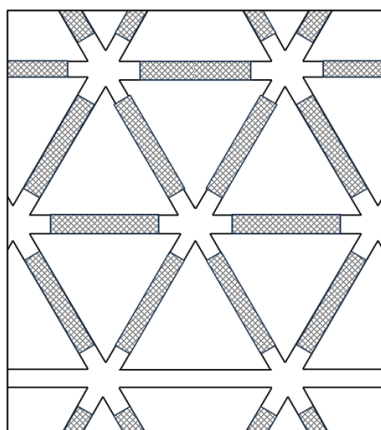


Slika 3.14: Nedeformirana (a) in deformirana (b) idealizirana struktura vozlov in vlaken [10]

3.4 Kompozitne avksetične strukture

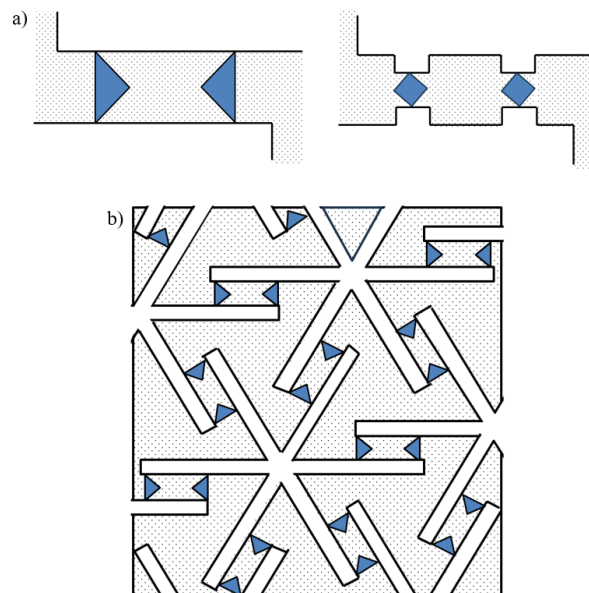
Pri uporabi modernih kompozitnih struktur se srečujemo z dvema ali več različnimi materiali, povezanimi z različnimi metodami v en material, pri čemer poskušamo z analitičnimi metodami določiti najboljše razmerje med deleži posameznih materialov, vseeno pa še obstaja fizikalna ovira, saj je elastični modul enoznačno odvisen od togosti

kemijskih vezi med atomi izhodiščnega materiala. To lahko prikažemo na primeru kompozitne strukture iz ogljikovih vlaken iz smole, pri kateri smo pri ogljikovih vlaknih omejeni z modulom elastičnosti vlaken, vendar pa lahko mehanske lastnosti izboljšamo s spremembo vrednosti Poissonovega razmerja. To je privedlo do razvoja kompozitnih avksetičnih struktur, v katerega se je usmeril Milton [36]. Osnovna ideja je prikazana na sliki 3.15, na kateri je predstavljena struktura iz nosilcev, ki se lahko deformirajo natežno ali tlačno (teleskopski spoj v šrafiranih območjih na sliki 3.15), ne pa tudi upogibno. Nosilci so toga povezani v vozliščih pod kotom 60° . Ker takšna struktura zaradi pogojev vpetja v vozliščih ne more spremeniti oblike ob strižni obremenitvi, se lahko ob normalni deformaciji (tlak ali nateg) le razširi ali skrči, kar makroskopsko povzroči neskončno velik strižni modul in Poissonovo razmerje enako -1 .

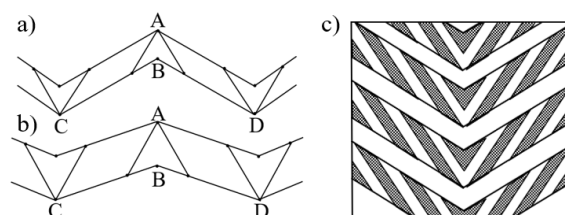


Slika 3.15: Osnovna ideja o mehanizmu delovanja kompozitnih avksetičnih struktur

Ker so drseči spoji v praksi lahko težavni, se je razvoj nadaljeval v smeri zamenjave teleskopskega nosilca z dvema vzporednima togima nosilcema, povezanimima z elastičnim materialom (različni vmesni členi so prikazani na slikah 3.16a–b) na togi trikotni povezavi, ki vzdržuje vzporednost med nosilcema. Takšen način povezave dopušča samo en način deformacije, kajti štiri kontaktne točke med vmesnim členom in nosilcema tvorijo paralelogram. Kompozitna struktura, izdelana na opisan način, je predstavljena na sliki 3.16b in ima negativno Poissonovo razmerje, če so nosilci in povezava dovolj toga.



Slika 3.16: Primeri povezav dveh nosilcev z elastičnimi vmesnimi členi (a–b kompozitna struktura, osnovana na povezavah med togimi palicami s slike 3.16b (območja, označena s prekinjeno črto, prikazujejo ponavljajoče se celice)



Slika 3.17: Laminatna kompozitna struktura: a) neobremenjeno stanje osnovne celice, b) obremenjeno stanje osnovne celice, c) kompozitna struktura

V nadaljevanju je Milton [36] razvil koncept laminatne kompozitne strukture, ki ima negativno Poissonovo razmerje. Shematični prikaz odziva te strukture na natežno obremenitev (povečamo razdaljo med točkama A in B) je prikazan na slikah 3.17a in 3.17b, kjer je razvidno, da se v obremenjenem stanju na sliki 3.17b pojavi avksetični učinek, saj se struktura razširi v smeri prečno na smer obremenitve. Ta analogija je uporabljena tudi v laminatni kompozitni strukturi, kjer je mehkejšo jedro obdano s togo ojačitvijo (vsaj 25-krat močnejša), ki ima enako geometrijo kot na sliki 3.17a. Na sliki 3.17c je ojačitev prikazana s šrafiranim vzorcem. Ta dodatna ojačitev vpliva na nosilnost pri strižnih silah. Ob vključitvi večjega števila teh laminatnih pasov v kompozit nastane struktura z

negativnim Poissonovim razmerjem, ki je prikazana na sliki 3.17c.

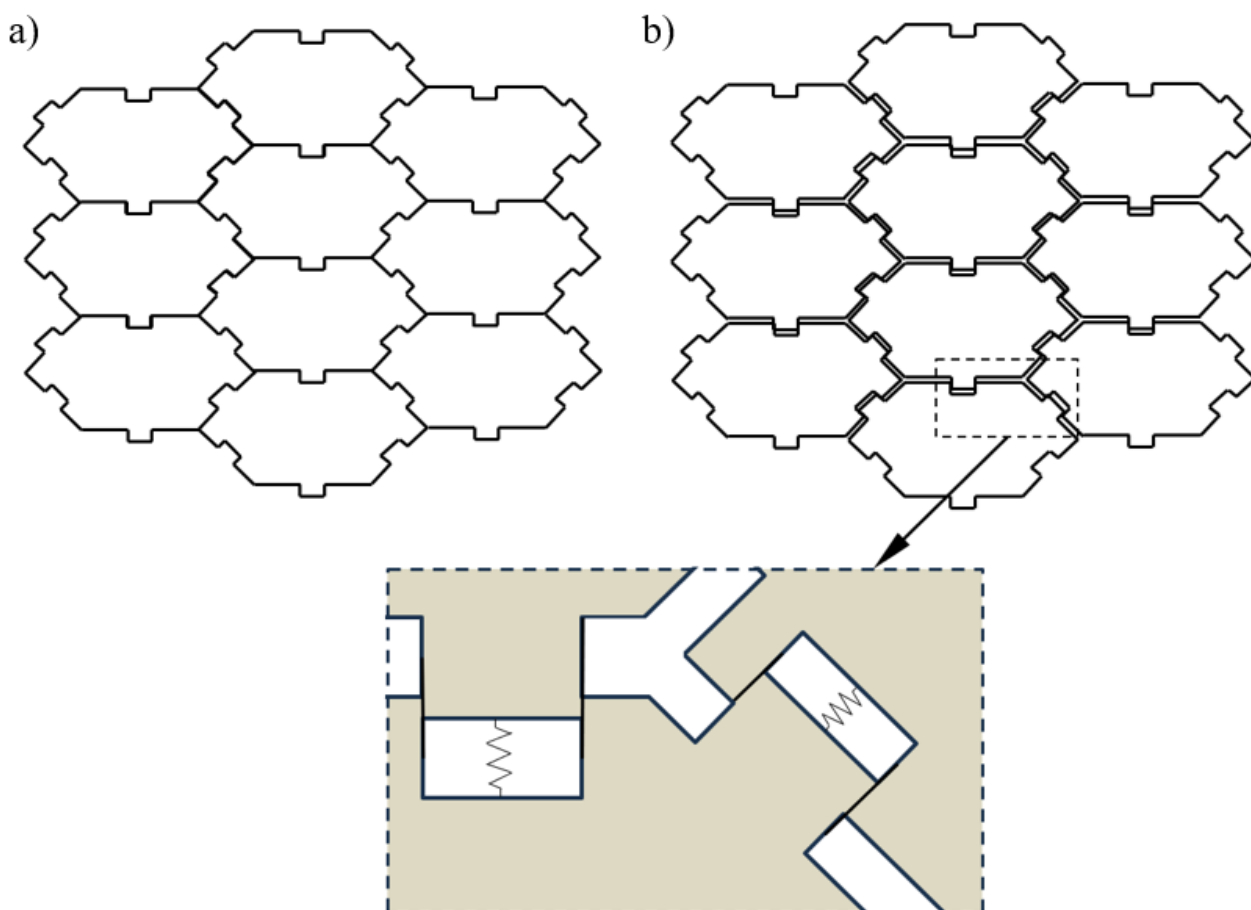
3.5 Druge geometrije avksetičnih struktur

Z uporabo zapornih šestkotnih struktur je Ravirala s sodelavci [52] razvil novo vrsto avksetičnih struktur, prikazano na sliki 3.18. Zaporne šestkotne strukture so zelo podobne strukturam, ki so bile predhodno razvite za namene jedrske industrije [28].

Kot je razvidno iz predhodno podanega pregleda, je bilo v preteklosti analiziranih veliko dvodimenzionalnih in le nekaj tridimenzionalnih

geometrij. Nekatere izmed bolj zanimivih tridimenzionalnih struktur so: strukture z rotirajočimi enotami [53], strukture vozlov in vlaken [54] ter druge geometrije, ki jih je omogočil razvoj dodajalnih tehnologij [55], [56]. Druge tridimenzionalne geometrije so na primer avksetične strukture iz obrnjenih tetrapodov [55], kiralne avksetične strukture [44] in vbočene strukture [57].

Odkrivanje novih avksetičnih geometrij temelji predvsem na področju optimizacije geometrije [58] in analize lastnih frekvenc določenih (neavksetičnih) struktur [44] ter tudi na področju raziskovanja antičnih vzorcev [59].



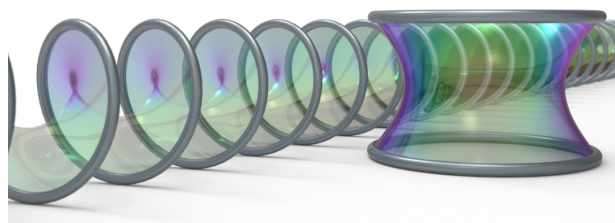
Slika 3.18: Potek deformacije zaporne šestkotne strukture: a) neobremenjeno stanje, b) obremenjeno stanje [52]

4 Celične strukture TPMS

Kot je razvidno iz predhodnega poglavja, so vse avksetične strukture definirane kot mehanizmi, katerih deformacija omogoča avksetično obnašanje. Kljub prednostim zaradi edinstvenega deformacijskega obnašanja pa imajo avksetične strukture tudi določene pomanjkljivosti, saj v stikih medceličnih povezav med deformacijo pride do velikih koncentracij napetosti, kar lahko posledično povzroči hitro porušitev in omejeno območje avksetičnega učinka. To je možno izboljšati s pomočjo struktur, ki temeljijo na površinah in ne na krhkih medceličnih povezavah, kot je to pri večini avksetičnih struktur. TPMS so matematično definirane površine, ki lokalno minimizirajo površinsko območje za dano mejo, tako da je srednja ukrivljenost pri vsaki točki na površini enaka nič ali konstantna [9]. Teorija minimalnih površin v trirazsežnem Evklidovem prostoru izvira s področja infinitezimalnega računa, ki sta ga razvila Euler in Lagrange v 18. stoletju. Pozneje so raziskovali še Enneper, Scherk, Schwarz, Riemann in Weierstrass v 19. stoletju [60]. Ime minimalne površine se uporablja za površine, ki imajo ničelno srednjo ukrivljenost. Če je vektorsko polje srednje ukrivljenosti enako nič, se pojavi minimalna podmnogoterost (ang. *minimal submanifold*). Minimalne podmnogoterosti so karakterizirane kot površine, ki v okolici poljubne točke minimizirajo površino glede na lokalne robove. Torej se minimizira ločna dolžina. Karakterizacije se dokazuje s pomočjo prve in druge variacije površine. Za neparametrične površine je to implicitno dokazal Lagrange leta 1760. Leta 1776 je Meusnier s pomočjo analitičnega izraza za srednjo ukrivljenost določil dve minimalni površini – katenoid in helikoid. Te dve minimalni površini spadata med najbolj znane primere minimalnih površin. Na sliki 4.1 sta prikazani obe obliki, kjer je na levi strani helikoid, na desni pa katenoid. Takšne oblike so lahko narejene s pomočjo milnice. Zaradi površinske napetosti se izoblikuje tanek film milnice, ki ima ničelno srednjo ukrivljenost [61]. Za ničelno ukrivljenost mora biti zadoščena enačba 4.1. V

tej enačbi H predstavlja ukrivljenost, k_1 in k_2 pa glavni ukrivljenosti površine. Zmnožek teh dveh glavnih ukrivljenosti pa predstavlja Gaussovo ukrivljenost [62].

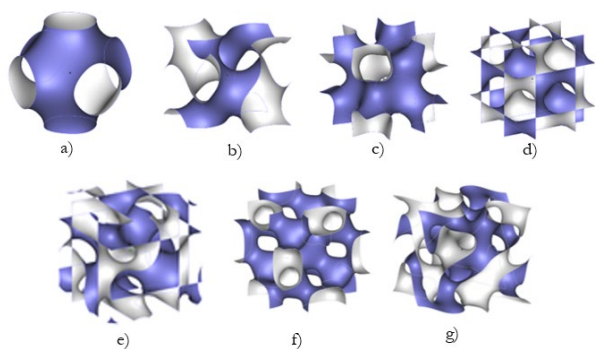
$$H(p) = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \quad (4.1)$$



Slika 4.1: Helikoid in katenoid

Površina je enkratno, dvojno ali trojno periodična, če je invariantna (ostane nespremenjena) glede na translacije rešetke. Dvojno periodične minimalne površine so torej v ravnini. Prvi omembi TPMS je leta 1865 naredil nemški matematik Schwarz, kjer je predstavil diamantno površino [9]. Dejansko je ta minimalna površina, tako kot mnoge druge, edinstvena po svoji kubični simetriji. V nadaljevanju sta nove primere odkrila Schwarz leta 1890 in njegov študent Neovius leta 1883. S pomočjo Weierstrassove formule sta določila pet trojno periodičnih minimalnih površin. Skoraj stoletje pozneje pa je Alan H. Schoen leta 1970 predstavil dvanajst novih površin, med njimi je bila Gyroid [9]. To fascinantno topologijo so opazili na krilih več vrst metuljev [94, 95], v zadnjih dveh desetletjih pa je bila predmet intenzivnih raziskav zaradi svojih izjemnih topoloških lastnosti v različnih disciplinah [96]. Od osemdesetih let preteklega stoletja je bilo odkritih veliko površin. Od leta 1988 sta Fischer in Koch predlagala veliko primerov, dobljenih s pomočjo klasifikacije sistema linij znotraj minimalnih površin. Možni zapleti pri periodičnih minimalnih površinah se lahko pojavijo zaradi deformacijskih težav [62].

TPMS imajo značilne geometrijske lastnosti, na primer minimalna površina je naravno gladka, nima ostrih robov ali kotov ter razdeljuje prostor na dva ali več nepresekajočih se, prepletajočih se in neskončnih domen, ki se lahko periodično ponavljajo v treh pravokotnih smereh. Primeri struktur TPMS so prikazani na sliki 4.2 [10]. V naravi se topologije TPMS običajno pojavljajo kot vmesniki, ki ločujejo dva podvoluma, kot je mogoče opaziti pri milnih mehurčkih [9] in Fermijevih površinah [89]. Prav tako se geometrije, podobne minimalnim površinam, lahko najdejo pri bločnih kopolimerih [90] in krilih metuljev [91]. TPMS se lahko matematično reproducirajo s približnimi enačbami nivoja sklopa [92] ali s programsko opremo za oblikovanje površin [93]. TPMS lahko obravnavamo tudi kot gradbene elemente za katerokoli želeno geometrijo, pri čemer ohranjajo periodičnost.



Slika 4.2: Primeri TPMS-topologij: a) Schwarz-Primitive, b) Schoen-Gyroid, c) Schoen-IWP, d) Schwarz-Diamond, e) Fischer-Koch-CY f) Schoen-FRD, g) Fischer Koch S

Zaradi njihovih topoloških lastnosti so TPMS pritegnile pozornost v več znanstvenih in inženirskih disciplinah. Na primer, naravno gladka narava topologij, podobnih TPMS, zagotavlja ugodno okolje za obnavljanje poškodovanih celic tkiva [97]. Prav tako prepletajoča narava volumnov, ločenih z minimalnimi površinami, naredi takšne topologije idealne za prostorsko ojačitev kokontinualnih kompozitov [73, 85, 86]. Po drugi strani so se strukture TPMS izkazale za optimizirano prepustnost za tekočine [98]. Zato ker imajo strukture TPMS dobro razmerje površine proti volumnu, so bile uporabljene za ustvarjanje naprednih toplotnih

izmenjevalnikov [99], inovativnih podpornih distančnikov za povečanje pretoka v procesih reverzne osmoze in ultrafiltracije [100] ter medijev za premične biofilmske reaktorje za čiščenje odpadnih voda [101]. Topologije TPMS prav tako ponujajo priložnosti za prilagajanje in preklapljanje akustičnih lastnosti s pomočjo deformacije [102]. Iz prejšnjih primerov je mogoče sklepati, da povezava geometrijskih lastnosti TPMS z mehanskimi, toplotnimi, električnimi, akustičnimi in fotoničnimi lastnostmi obeta veliko v večfunkcionalnem oblikovanju mikroarhitekturnih metamaterialov in strukturnih sistemov.

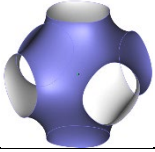
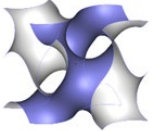
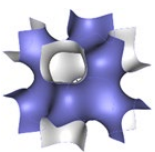
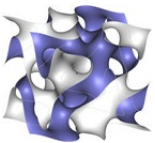
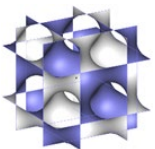
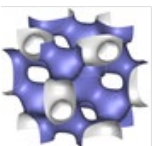
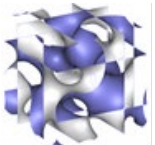
4.1 Definicija minimalnih površin

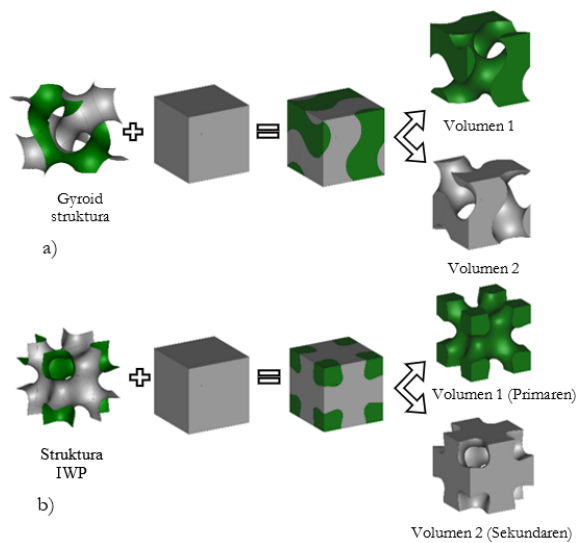
Minimalno površino lahko opišemo z implicitnimi površinami, ki jih določa funkcija, ki zadovoljuje enakost $f(x, y, z) = c$. Pri TPMS je funkcija kombinacija trigonometričnih funkcij. Na primer, najpreprostejša struktura TPMS s kubično simetrijo je površina strukture Primitive, ki jo lahko opišemo s funkcijo $\cos x + \cos y + \cos z = 0$. Preglednica 4.1 prikazuje različne topologije TPMS in ustrezne približne geometrijske enačbe.

Ko je konstanta enačbe približne ravni sklopa enaka nič (glej primere v preglednici 4.1), generirana površina razdeli prostor na dve domeni enakega volumna, tako da je vsaka domena 50 % celotnega volumna. Ti dve domeni sta lahko identični ali se razlikujeta po obliki. Slika 4.3 prikazuje, kako se prostor, razdeljen z minimalno površino Gyroid, deli na dve zamenljivi domeni enakega volumna, medtem ko površina Schoen-IWP ustvari dve različni domeni.

Sprememba konstante v enačbah približne ravni sklopa privede do spremembe topologije površine. Ta sprememba topologije površine vpliva tudi na spremembo topologije domen, ki jih razdeli minimalna površina. Preglednica 4.2 vsebuje primere spremembe topologije na površini Gyroid in ustrezne domene kot posledico spreminjanja konstante c .

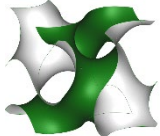
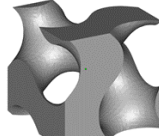
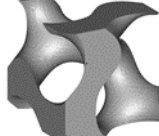
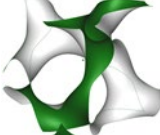
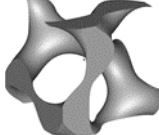
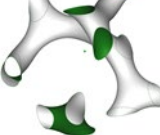
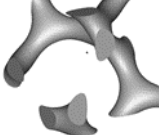
Preglednica 4.1: Približne geometrijske enačbe za različne strukture TPMS

Tip strukture	Geometrijske enačbe $f(x, y, z) = c$	Grafični prikaz
Schwarz Primitive	$\cos x + \cos y + \cos z = 0$	
Schoen-Gyroid	$\sin x * \cos y + \sin y * \cos z + \sin z * \cos x = 0$	
Schoen-IWP	$2 * (\cos x * \cos y + \cos y * \cos z + \cos z * \cos x) - (\cos 2x + \cos 2y + \cos 2z) = 0$	
Fischer Koch S	$\cos 2x * \sin y * \cos z + \cos x * \cos 2y * \sin z + \sin x * \cos y * \cos 2z = 0$	
Schwarz-Diamond	$\cos x * \cos y * \cos z - \sin x * \sin y * \sin z = 0$	
Schoen-FRD	$4 * \cos x * \cos y * \cos z - (\cos 2x * \cos 2y + \cos 2y * \cos 2z + \cos 2z * \cos 2x) = 0$	
Fischer-Koch-CY	$\sin x * \sin y * \sin z - \sin 2x * \sin y - \sin 2y * \sin z - \sin 2z * \sin x + \cos x * \cos y * \cos \sin 2x * \cos z - \cos x * \sin 2y - \cos y * \sin 2z = 0$	



Slika 4.3: TPMS delijo prostor na dve ali več domen, ki so lahko identične ali neidentične. a) Površina Gyroid razdeli prostor na dva enaka volumna, b) površina IWP pa razdeli prostor na dva različna volumna.

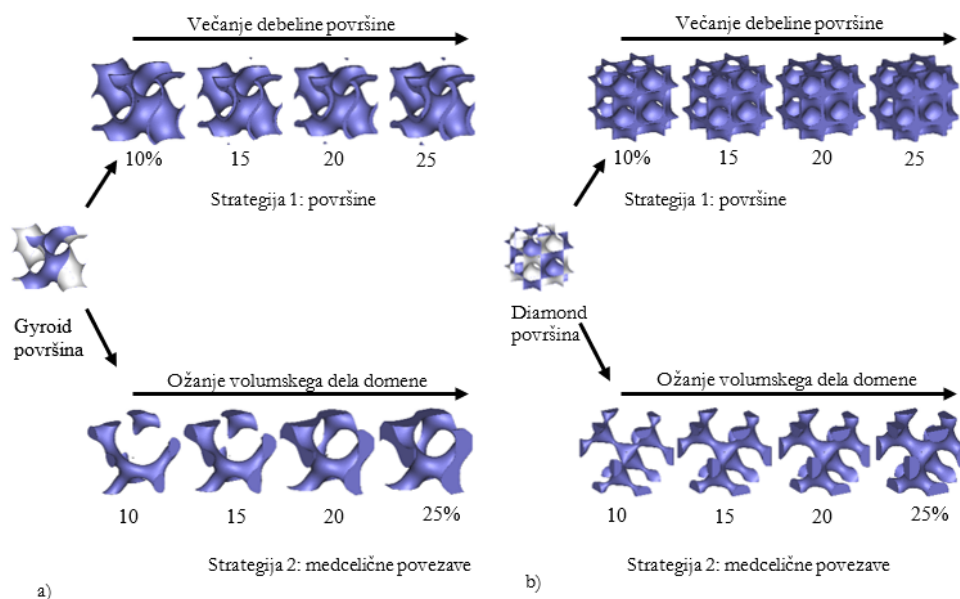
Preglednica 4.2: Primeri spreminjanja topologije minimalne ploskve Gyroid z manipulacijo konstante c

Vrednost c konstante	Površina Gyroid	Domena 1	Domena 2
0			
0.3			
0.6			
0.9			
1.2			

4.2 Generiranje celičnih struktur TPMS

Da bi uporabili minimalne površine za ustvarjanje celičnih struktur, lahko sledimo dvema glavnima strategijama. Prva strategija (površinske strukture TPMS) ustvari arhitekturo, podobno lupini, z določeno debelino, ki je enakomerno razporejena in fiksna po celotni površini (slika 4.4). Pri tej strategiji je relativna

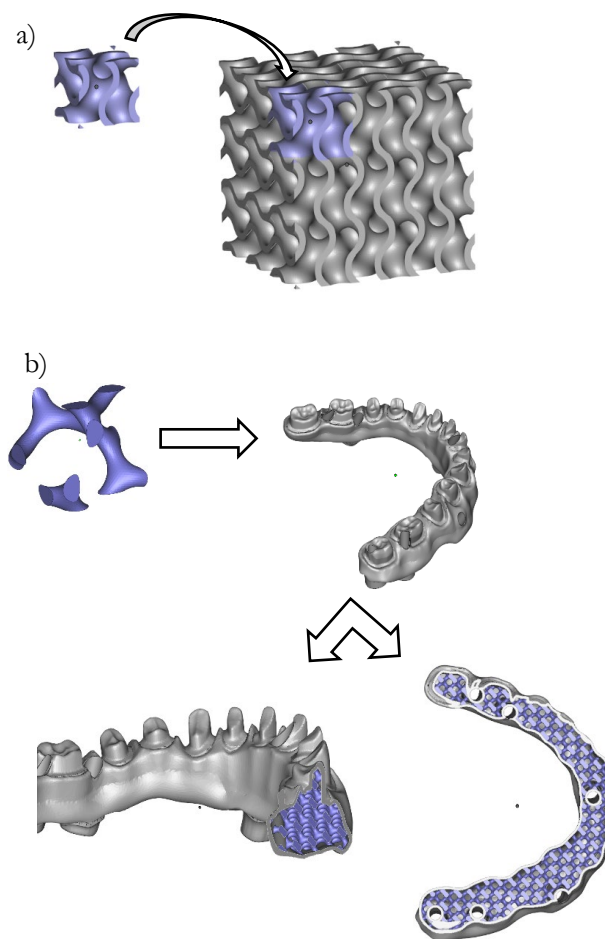
gostota celične strukture nadzorovana s predpisano debelino. Druga strategija (strukture TPMS z medceličnimi povezavami) ustvari strukturo, ki temelji na skeletu z gladkim prehodom med medceličnimi povezavami, s tem ko večja eno od dveh domen, ki ju določa topologija TPMS, in relativno gostoto nadzoruje



Slika 4.4: Različne strategije kreiranja Gyroid (a) in Diamond (b) TPMS struktur

konstanta enačbe približne ravni sklopa, kar je lepo razvidno iz preglednice 4.2 [5].

Ko je enota celice celične strukture, ki temelji na TPMS, ustvarjena, jo lahko teseliramo v tridimenzionalnem prostoru, da ustvarimo zahtevano strukturo. Na primer, TPMS-bazirana celična struktura se lahko teselira, da ustvari kubično obliko, kot je prikazano na sliki 4.5a, ali pa se lahko uporabi za zapolnitev volumna že določene strukture, kot je prikazano na sliki 4.5b, kjer je oblikovana človeška dlesen za minimiziranje skupne mase, tako da je generirana notranja rešetkasta struktura na osnovi strukture Gyroid [5].



Slika 4.5: Osnovna celica je lahko teselirana, da ustvari kubično strukturo (a) ali pa strukturo, ki je prilagojena obliki človeške dlesni (b).

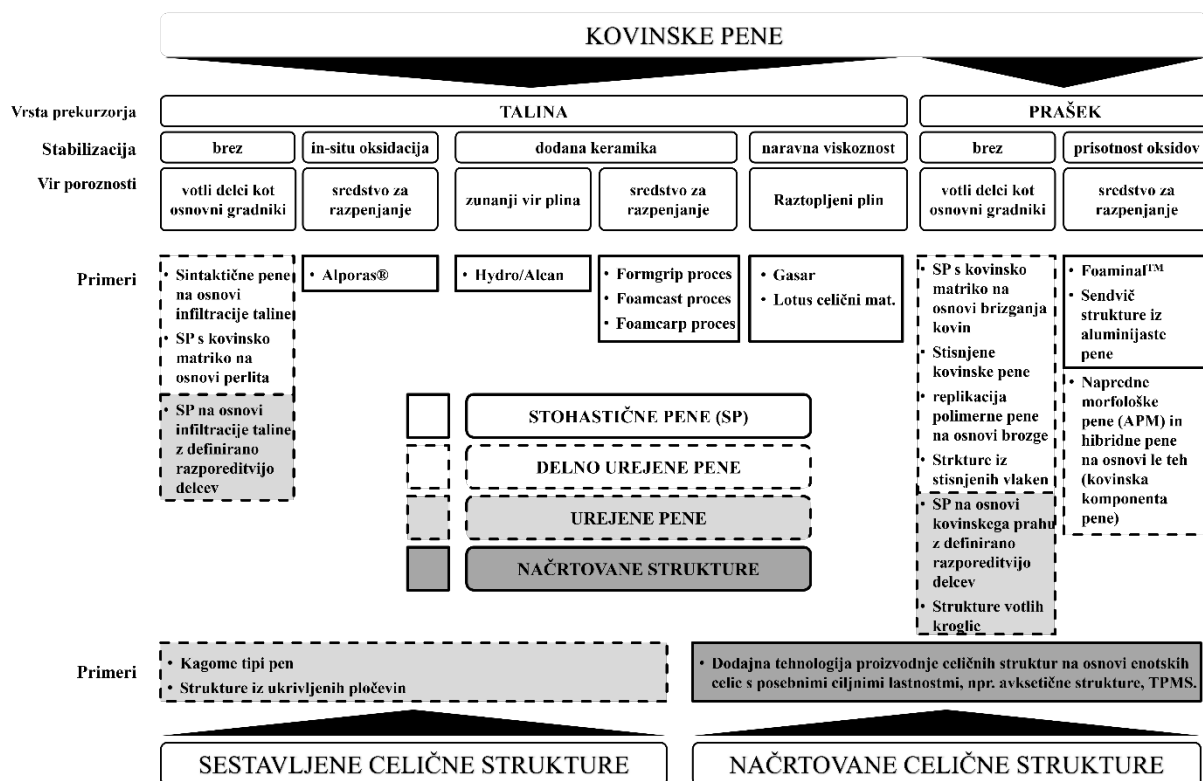
5 Proizvodni procesi

Kombinacija proizvodnih procesov in proizvodnih parametrov je ključnega pomena pri načrtovanju optimalnih mehanskih lastnosti celičnih materialov. V zadnjih nekaj desetletjih je bilo za izdelavo kovinskih celičnih materialov razvitih več različnih proizvodnih tehnologij z namenom zmanjšanja proizvodnih stroškov in povečanja učinkovitosti proizvodnje le-teh. V ta namen so bile opravljene obsežne raziskave glede optimalnih proizvodnih metod, ki jih lahko razdelimo glede na stanje osnovnega materiala [6]. V splošnem lahko opredelimo več skupin proizvodnih metod, ki so povzete na sliki 5.1.

S slike 5.1 je razvidno, da obstaja več načinov izdelave celičnih materialov, ki so posebej zasnovani z izkoriščanjem značilnih lastnosti osnovnega materiala [6]. Stohastične pene izhajajo iz procesov, ki po naravi

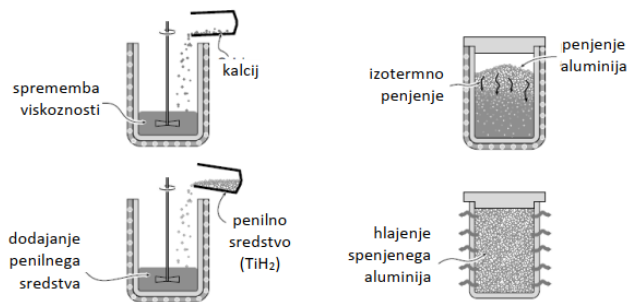
ponujajo malo ali nič neposrednih možnosti nadzora posameznih velikosti por ali prostorske razporeditve por. Tipični primeri so tehnike, ki uporabljajo sredstva za razpenjanje, da povzročijo nukleacijo in rast por. Od teh obstajajo različice, ki temeljijo na vpihavanju sredstev v staljeno matriko (Alporas celični material) ali pa temeljijo na prašno metalurško proizvodnjo predhodnega materiala, ki vsebuje sredstvo za razpenjanje, ki ekspandira z delnim ali popolnim taljenjem (Foaminal celični material).

Alporas celični material se proizvaja s serijskim postopkom litja (slika 5.2). Za izdelavo aluminijevih pen iz staljenega aluminija je treba stabilizirati mehurčke v staljenem aluminiju. Najbolj pomemben dejavnik za stabilizacijo mehurčkov v staljenem aluminiju je povečanje njegove viskoznosti in preprečitev, da bi



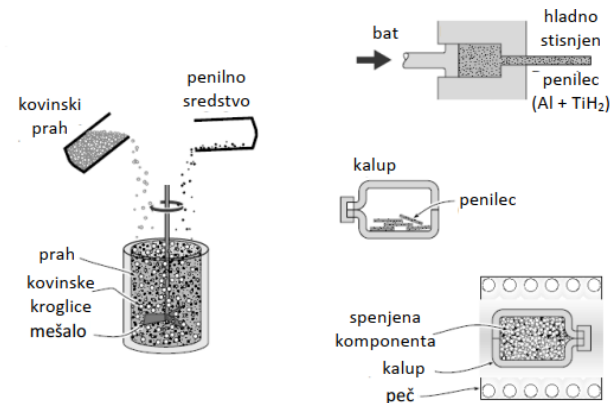
Slika 5.1: Pregled proizvodnih procesov in celičnih kovin [2]

mehurčki plavali. Kot zgoščevalno sredstvo se uporablja kalcij (Ca), ki se ga pri temperaturi 680 °C pomeša s staljenim aluminijem. Zgoščeno aluminijevo zlitino se nato vlije v kalup za litje, v katero se pri temperaturi 680 °C vmeša penilno sredstvo TiH_2 . Po mešanju se staljeni material razširi in strdi. Ko se kalup ohladi, se lahko blok Alporas® iz aluminijeve pene iz kalupa odstrani in razreže na ravne plošče različnih debelin glede na namen.



Slika 5.2: Grafični prikaz Alporas® proizvodnega postopka [63]

V nasprotju z Alporas postopek Foaminal zahteva prisotnost osnovnega materiala v obliki prahu (slika 5.3). Zlitine je mogoče oblikovati z uporabo predhodno legiranih praškov ali mešanic osnovnih kovinskih praškov ali kombinacijo obeh. V vsakem primeru je treba prahu dodati sredstvo za razpenjanje zmesi, ki se nato stisne, da se ustvari penljivi predhodni material (penilec). Najpogostejše penilno sredstvo je TiH_2 . V skladu z zahtevami postopka so sredstva za vpihanje običajno termično obdelana pred procesom mešanja z matričnimi praški. Sama konsolidacija mora biti izvedena na način, ki zagotavlja dobro spajanje delcev. To se običajno doseže s postopkom vročega iztiskanja, ki ustvarja visoke strižne obremenitve v materialu in tako prepreči površinske oksidne plasti delcev ter ustvarjanje novih površin in razpršitev oksidov. Zaradi tega vmesnega koraka je metoda označena tudi kot postopek kompaktnega taljenja prahu. Dejanski korak penjenja je izveden v zaprtem kalupu pri temperaturah vsaj nad temperaturo solidus, pogostejše nad temperaturo likvidus osnovnega materiala ali zlitine. Posebna varianta postopka vključuje tako imenovano aluminijevo peno, ki je v notranjosti napolnjena z mehurčki, na zunanji strani pa jo obdaja plast osnovnega materiala.



Slika 5.3: Grafični prikaz Foaminal proizvodnega postopka [63]

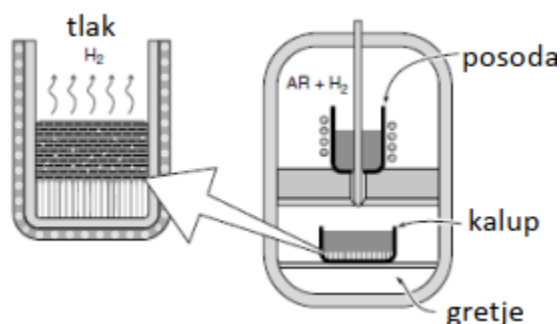
Sinteza delno urejenih pen omogoča določen nadzor nad vidiki, kot so oblika por, velikosti por in njihova prostorska porazdelitev. Če je na voljo popoln nadzor nad vsemi vidiki, govorimo o delno urejenih penah. Tipični primeri delno urejenih pen so torej materiali, ki omogočajo definirane strukturne elemente, kot so porozne ali votle kroglice, ki so v matriki vsaj delno stohastične. Med tovrstne materiale spadajo tudi tako imenovane pene APM (slika 5.4). Te so strukturno podobne sintaktičnim penam, ki vključujejo sferične delce, velike nekaj mm. Proizvodni postopek pene APM se povezuje s postopkom Foaminal, saj gre pravzaprav za to vrsto materiala, iz katerega so izdelane značilne kroglice. Oblika kroglic nastane, ko penilec potuje skozi peč po traku, pri čemer se kroglice oblikujejo samostojno.



Slika 5.4: Pena APM [64]

Proizvodni postopek usmerjenega strjevanja (slika 5.5) je prav tako eden izmed proizvodnih postopkov zaprtoceličnih kovinskih materialov z mikroporoznostjo. Postopek temelji na nasičenju taline z vodikom v tlačni komori, kar predstavlja specializiran postopek v metalurgiji, namenjen izdelavi materialov z nadzorovano mikrostrukturo in izboljšanimi lastnostmi. Pri tem gre za kompleksno tehniko, ki združuje več fizikalnih procesov, vključno s toplotno

obdelavo, difuzijo, faznimi preobrazbami in mehanskim delovanjem. Postopek se začne z vnosom kovinske zlitine v tlačno komoro, kjer je izpostavljena visokemu tlaku vodika. Pod vplivom tlaka in temperature se vodik raztopi v talini, pri čemer spremeni njene termodinamične lastnosti. Ko se talina počasi ohlaja in strjuje, se vodik izloča iz raztopine in tvori majhne mehurčke. Temperaturni gradient in hitrost hlajenja povzročita, da se ti mehurčki poravnajo v določeno smer, kar vodi do usmerjenega strjevanja in nastanka porozne strukture z željenimi lastnostmi.

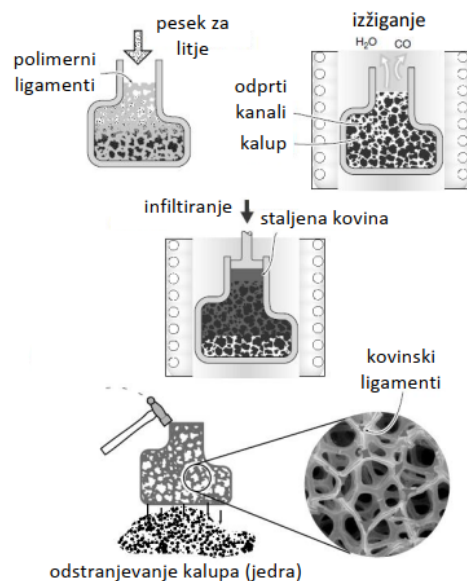


Slika 5.5: Grafični prikaz proizvodnega postopka usmerjenega strjevanja [63]

Izdelava odprtoceličnih materialov temelji na metodi repliciranja strukture osnovne polimerne pene, katere struktura služi kot negativ končne oblike kovinske celične strukture. Postopek repliciranja lahko vključuje prekrivanje osnove s kovinsko paro, prekrivanje osnove s pomočjo galvanotehnike (tehnika nanašanja kovinskih prevlek z elektrolizo) ali s pomočjo litja z iztaljenim jedrom (slika 5.6). Pri tej metodi se polimerna odprtocelična pena zasuje s peskom za litje. Polimer se nato izžge, zaradi česar ostanejo v pesku, ki služi kot kalup, odprti kanali. V kalup se nato vlije staljena kovina. Ko se kovina strdi, se odstrani pesek in ostane odprtocelična pena s kovinskimi ligamenti. Končni proizvod je celična kovina, katere struktura je enaka negativni strukturi polimerne pene. Oblika celične kovine ni odvisna od fizike penjenja kovinske osnove.

Trenutni načini izdelave, predvsem tehnologije aditivne izdelave, omogočajo ustvarjanje različnih urejenih celičnih struktur, bodisi odprtoceličnih ali zaprtoceličnih pen, z različno pravilnostjo, izotropnostjo in gostoto. Cenovno ugodne metode za izdelavo 3D-celičnih struktur so sintranje prahu, penjenje in ulivanje. Najpogostejša tehnologija izdelave 2D-celičnih struktur je tehnologija laserskega ali

vodnega reza, ki bo predstavljena tudi v nadaljevanju za izdelavo obravnavanih celičnih struktur.



Slika 5.6: Grafični prikaz proizvodnega postopka litja z iztaljenim jedrom in proizvedena struktura [63]

5.1 Avksetične strukture

V začetni fazi izdelave avksetičnih celičnih struktur so raziskovalci uporabljali predvsem načine za spremembo geometrije konvencionalnih celičnih struktur [33], na katerih so dokazali obstoj negativnega Poissonovega razmerja. Razvoj se je tako v devetdesetih letih prejšnjega stoletja nadaljeval predvsem na področju polimernih celičnih struktur. Izdelovalni proces avksetičnih celičnih struktur iz polietilena sta prva predstavila Alderson in Evans [65], ki sta nato podala še natančno analizo vpliva parametrov na izdelovalni postopek [66]. Izdelovalni postopek, katerega rezultat je prikazan na sliki 3.12, je sestavljen iz naslednjih faz:

- stiskanje poliuretanske pene v posodi z jeklenim potisnim batom,

- surovec je nato prenesen v predel posode, ki je ogret na 110 °C,
- po ogrevanju (10 min) je bil surovec tlačno obremenjen za 20 min in nato počasi ohlajen,
- postopek je bil nato še enkrat ponovljen pri višji temperaturi (160 °C), le da je bil premer preizkušanca med iztiskanjem zmanjšan za polovico na osnovi spremenjene odprtine za iztiskanje.

Za potrebe izdelave večjih preizkušancev je bilo treba razviti nov izdelovalni postopek, saj s predhodno razvitim postopkom ni bilo mogoče zagotoviti tako velike sile za enkratno deformacijo večjega preizkušanca [67]. Novejši postopek je pravzaprav razširjena različica prejšnjega, le da se v tem primeru postopek segrevanja in deformiranja bloka konvencionalne pene ponovi večkrat in tako ni treba zagotavljati tako velike sile za enkratno deformacijo bloka pene, ob tem pa se izognemo tudi gubanju površine.

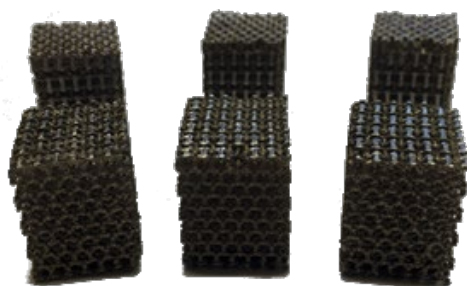
V nadaljevanju je bil razvit podoben proizvodni postopek, pri katerem se uporabljajo topila namesto toplotne obdelave. To pomeni, da se pena omoči s primernim topilom, nato pa se deformira za približno 30 %. Postopek transformacije je natančneje opisan v [68], kjer je podana tudi tehnika vrnitve avksetične strukture v konvencionalno strukturo.

Na podlagi razloga, da mora biti material za doseganje avksetičnega obnašanja v splošnem porozen, je Evans predlagal [27], da je lahko bolj tog avksetični material izdelan na molekularni ravni. Tako sta v nadaljevanju Alderson in Evans [65] proizvedla mikroporozni polietilenski (ang. *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* – UHMWPE) material z negativnim Poissonovim razmerjem. Proizvodni postopek je bil sestavljen iz naslednjih faz: stiskanje polimernega praška, sintranje in iztiskanje. Rezultat tega proizvodnega postopka je bil anizotropen material, katerega Poissonovo razmerje je doseglo vrednosti do $-1,24$ (odvisno od velikosti deformacije) pri tlačni obremenitvi v radialni smeri in vrednost 0 v aksialni smeri preizkušanca, ki je imel obliko valja. V nadaljevanju je to področje raziskoval še Grima s sodelavci, ki je predvidel, da avksetično obnašanje ni odvisno od merila – torej lahko avksetični material oblikujemo na mikroskopski ravni, pa bo tudi

makroskopski material imel značilnosti avksetičnega materiala [69].

V zadnjih letih so se razvile napredne metode dodajalnih tehnologij, ki so omogočile relativno cenovno dostopno in hitro izdelavo zahtevnih oblik izdelkov iz umetnih mas in kovin (npr. titan, baker, aluminij, nerjavno jeklo). Najpogostejši dodajni tehniki, ki se uporabljata za izdelavo geometrijsko načrtovanih celičnih struktur, sta metodi selektivnega laserskega taljenja (ang. *Selective Laser Melting* – SLM) in taljenja z elektronskim žarkom (ang. *Electron Beam Melting* – EBM), ki se med seboj razlikujeta v temperaturnem energijskem viru. Te metode so pogosto uporabljene tehnike združevanja praška (ang. *Powder Bed Fusion* – PBF) pri proizvodnji z dodajalnimi tehnologijami (ang. *Additive Manufacturing* – AM), pri katerih se kovinski ali polimerni prah selektivno tali ali sintra z uporabo vira energije, kot je laser ali elektronski snop, za oblikovanje 3D-strukture. Postopek PBF običajno začne z enakomerno porazdelitvijo plasti praška na delovno mizo. Laser se nato uporabi za selektivno taljenje plasti prahu glede na prečne profile objekta, pri čemer se meje plasti določijo s sledmi laserskega oboda, notranjost pa s sledmi utripajoče plasti. Ta postopek se plast za plastjo ponavlja, dokler ni oblikovan celoten 3D-objekt.

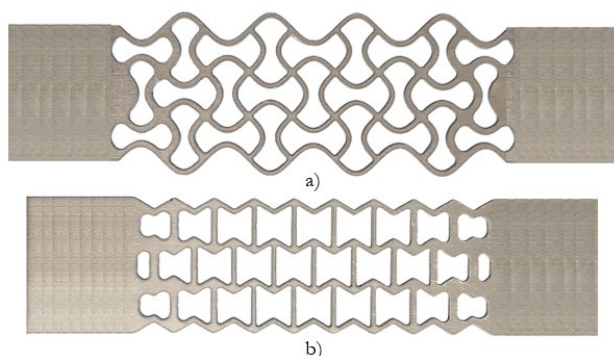
Z uporabo omenjenih tehnik izdelujemo tudi avksetične celične strukture, kar je prikazano na sliki 5.7.



Slika 5.7: Avksetične celične strukture, izdelane na osnovi laserskega taljenja

Ob sodobnih dodajalnih tehnologijah, ki še potrebujejo svoj čas za razvoj in uveljavitev v vsakdanjem življenju, so bili razviti tudi drugi, cenejši načini, ki omogočajo hitrejšo izdelavo večjih avksetičnih satovij iz pločevin, kevlarjevih ali podobnih vlaken. To je mogoče s tehniko Kirigami, predstavljeno v [71], ki pa je v večini primerov

omejena na dvodimenzionalne strukture, raztegnjene v normalni smeri prereza. Za izdelavo tankih 2D-celičnih struktur se vse pogostejše uporablja tehnologija laserskega razreza in razreza z vodnim curkom. Oba tehnološka postopka sta že kar dobro uveljavljena in z nekonvencionalnim principom odnašanja materiala uspešno nadomeščata klasične postopke odrezovanja. Čeprav sta si postopka po svoje dokaj podobna, pa imata povsem različen mehanizem odnašanja. Rezanje z laserjem je termični postopek obdelave, kjer s fokusiranim žarkom dosežemo tolikšno gostoto energije, da se material segreje, stali in upari. Rezanje z abrazivnim vodnim curkom pa spada k mehanskim postopkom obdelave, kjer curek z dodatki abraziva z veliko hitrostjo zapušča šobo in ob dotiku z obdelovancem erodira oziroma odnaša material brez kakršnihkoli toplotnih vplivov. Pri izbiri med laserskim razrezom in razrezom z vodnim curkom je treba upoštevati materiale, debelino, natančnost rezanja in druge specifične zahteve aplikacije. Primer izdelanih 2D-avksetičnih celičnih struktur z uporabo tehnologije vodnega razreza je prikazan na sliki 5.8.



Slika 5.8: Prikaz izdelanih geometrij [72]
a) kiralna struktura, b) vbočena šestkotna struktura

5.2 Strukture TPMS

Kovinske PBF AM tehnike so v literaturi pogosto uporabljene za proizvodnjo struktur, ki temeljijo na trojno periodičnih minimalnih površinah (TPMS). Uporabljeni so bili različni materiali, vključno z martenzitnim jeklom, nerjavnim jeklom 316L, zlitino titana (Ti6Al4V), komercialno čistim titanom (CP-Ti) in zlitino aluminija (AlSi10Mg). Poleg tega so tudi termoplastični polimerni praški iz najlona služili za cenejšo izdelavo metamaterialov, ki temeljijo na TPMS. Proizvodni parametri za izdelavo struktur PBF so ključni za določanje mehanskih in fizičnih lastnosti.

Parametri, kot so moč laserja, debelina plasti, strategija utripanja in hitrost skeniranja, morajo biti optimizirani za ustrezno geometrijo strukture. Na primer, prilagajanje kota sledi utripanja pomaga zagotoviti pravilno taljenje in zmanjša anizotropijo. Spreminjanje debeline plasti brez optimizacije drugih parametrov lahko privede do težav, kot so mikroodprtine in votline, kar vpliva na mikrostrukturo in mehanske lastnosti strukture.

V študijah, ki so uporabljale tehnike PBF AM za izdelavo struktur, ki temeljijo na TPMS, so opazili pogoste procesno povezane topološke značilnosti. Proizvodnost in optimizacija teh značilnosti imata ključno vlogo pri doseganju želenih mehanskih lastnosti in strukturne celovitosti končnih struktur:

- **Učinek stopničenja:** Čeprav so strukture TPMS opisane z gladko zakrivljeno topologijo, SEM-slike z AM izdelanih struktur razkrivajo profil, podoben stopničkam. Opazovanje je tesno povezano z gradnjo plast za plastjo. Ko se pripravi CAD-datoteka za izdelavo, se razreže v dvodimenzionalne plasti, ki se gradijo ena na drugo, da tvorijo 3D-komponente. Za vsako ukrivljeno površino se učinek rezanja opazi kot profil, podoben stopnički. V splošnem je debelina plasti odvisna od velikosti delcev in porazdelitve osnovnega prahu, običajne vrednosti so med 30 in 100 μm pri kovinskih prahovih. Uporaba majhne debeline plasti zmanjša učinek stopničenja, vendar poveča čas izdelave.
- **Odstopanje med načrtovano in dejansko relativno gostoto:** Po AM-izdelavi TPMS-struktur običajno tehtanje kaže na odstopanje izdelane relativne gostote. V nekaterih primerih izdelani vzorci kažejo višje relativne gostote, medtem ko v drugih primerih kažejo nižje relativne gostote v primerjavi z načrtovano relativno gostoto. Odstopanje od CAD-modela je pripisano več dejavnikom:
 - Prevelik ali premajhen premer medceličnih povezav ali površin pri TPMS-strukturah, kar je povezano z velikostjo talilnega bazena, velikostjo delcev prahu in količino napak v 3D-natisnjeni strukturi. Velikost talilnega bazena oboda lahko presega

velikost laserskega žarka, kar povzroči povečanje v sintranem delu. Čeprav so vektorji skeniranja oboda običajno pomaknjeni navznoter, da se kompenzira ta možna odstopanja, to še vedno ni dovolj za doseg zahtevane natančnosti. Po drugi strani pa energija, ki jo dovaja laser, ni dovolj za ustvarjanje potrebne fuzije med delci prahu, kar vodi v prenizko velikost premera medcelične povezave ali debeline površine. Zato je zelo pomembno optimizirati parametre tiskanja, da dosežemo najboljše reprezentacijo želene komponente.

- Notranje napake pri izdelavi: proces strjevanja, povezan z laserskim AM-tiskanjem, včasih povzroči prisotnost notranjih votlin ali razpok. Takšne notranje napake je mogoče opisati s pomočjo računalniške tomografije (CT).
- Lepljenje prahu na delih sintetiziranega dela lahko poveča njegovo težo. Delno taljenje in s tem aglomeracija in prileganje prahu stenam sintetiziranih komponent so posledica temperaturnega gradienta, ki se razvije med prahom in sintetiziranim delom, kjer je termična prevodnost večja v sintetiziranem delu kot v ohlapnem prahu. Prav tako je globina talilnega bazena nekoliko večja od debeline plasti, da se oblikujejo prekrivanja med zaporednimi plastmi, vendar imajo ukrivljeni deli plasti, ki deloma ležijo na ohlapnem prahu, kar vodi v taljenje več prahu.

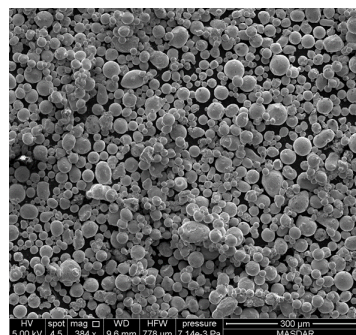
V sklopu raziskovalnega dela so bile kovinske TPMS-strukture izdelane z laserskim sistemom EOSINT M280 podjetja EOS GmbH iz Münchna, Nemčija. Ta sistem je na voljo na New York University Abu Dhabi (NYUAD) in se uporablja v okviru sodelovanja z NYUAD. Sistem se uporablja za proizvodnjo prototipov in končnih izdelkov.

Za izdelavo struktur TPMS s 3D-tiskanjem smo uporabili martenzito jeklo S316L, pridobljeno z atomskim razprševanjem plina. Ta vrsta jekla je izjemno trd, a še vedno duktilen material, ki se pogosto uporablja za številne orodjarske aplikacije, kot so orodja za brizganje plastike, tlačno litje lahkih kovinskih zlitin ter za visoko zmogljive industrijske in inženirske dele. Kemična sestava prahu uporabljenega jekla je prikazana v preglednici 5.1.

Preglednica 5.1: Kemijska zgradba uporabljenega jekla

element	wt%
Fe	ostalo
Ni	17 - 19
Co	8,5-9,5
Mo	4,5-5,2
Ti	0,6-0,8
Al	0,05-0,15
Cr	≤ 0,5
C	≤ 0,03
Mn, Si	≤ 0,1
P, S	≤ 0,01

Slika 5.10 prikazuje SEM-posnetke prahu martenzitega jekla. Uporabljeni prah ima skoraj popolnoma sferično obliko z gladko površino. Velikost delcev prahu je v območju od 5 do 50 μm . Modul elastičnosti, meja tečenja in natezna trdnost sintranega prahu so $180 \text{ GPa} \pm 20 \text{ GPa}$, $1000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ in $1100 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, kot je navedeno v podatkovnih listih dobavitelja prahu. Pri tehnologiji SLS se vsak nov sloj najprej skenira s konturnim laserskim snopom, nato pa s šrafiranim laserskim snopom. Uporabljena je bila strategija izmeničnega vzorca šrafitiranja, tako da se je smer šrafitiranja med zaporednimi plastmi nenehno spreminjala.



Slika 5.9: SEM-slika prahu martenzitega jekla

6 Geometrijska karakterizacija

Mehanske lastnosti celičnih metamaterialov so tesno povezane z lastnostmi osnovnega materiala in morfologijo celic, kar skupaj določa njihovo obnašanje pod različnimi obremenitvami. Osnovni material celične strukture pomembno vpliva na nosilnost, togost in odpornost proti udarcem. Mehanske lastnosti osnovnega materiala so v splošnem natančno definirane ali pa jih je mogoče na preprost način določiti, na primer z nateznim testom. Poleg osnovnega materiala igra pomembno vlogo tudi morfologija celic, ki vključuje velikost, obliko, porazdelitev in medsebojno povezanost celic. Na primer, pravilna geometrija celic lahko poveča absorpcijo energije, zmanjša gostoto gradiva in optimizira trdnost na enoto mase. Razumevanje teh dveh ključnih dejavnikov omogoča inženirjem prilagajanje lastnosti celičnih metamaterialov za specifične aplikacije.

6.1 Določitev geometrije

Vsi metamateriali so načrtovani matematično ali v računalniških programih, kjer jih natančno definiramo kot CAD-model. Zaradi napak in omejitev pri proizvodnih postopkih pa se izdelane geometrije metamaterialov v veliki večini razlikujejo od CAD-modelov. Iz tega razloga je zelo pomembno, da natančno analiziramo dimenzije in natančnost izdelave celičnih metamaterialov.

Določevanje geometrije celičnih metamaterialov se običajno izvaja z optičnim pregledom, fotografitanjem ali optično mikroskopijo. Optična mikroskopija je posebej učinkovita za določanje geometrijskih lastnosti, kot so debelina sten med celicami, premer celic in dolžina njihovih robov. Kljub temu ročno merjenje lastnosti metamaterialov zaradi njihove kompleksne tridimenzionalne strukture pogosto zahteva veliko časa in v večini primerov vključuje uničenje vzorca. Poleg tega je določitev nekaterih ključnih lastnosti, kot je prostornina celic, z uporabo teh tehnik izredno zahtevna. Zaradi teh omejitev je eksperimentalnih

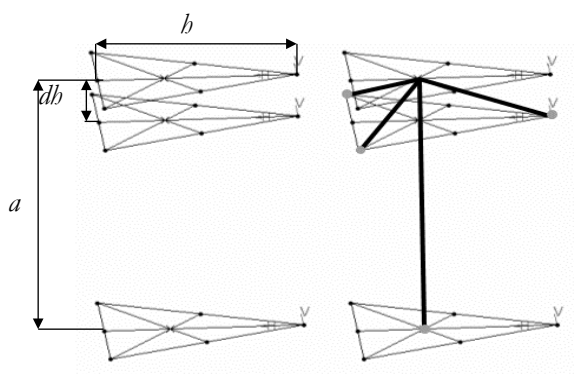
raziskav, ki povezujejo morfološke značilnosti pen z njihovimi makroskopskimi fizikalnimi lastnostmi, zelo malo, kar otežuje celovito razumevanje teh gradiv.

Popolna karakterizacija geometrijskih značilnosti celičnega metamateriala je mogoča z uporabo natančnega 3D-računalniškega modela geometrije. Tak model omogoča izvedbo številnih meritev, kot so dolžine robov celic, število robov celic in premer celic, brez neposrednega vpliva na realni vzorec. Meritve na računalniškem modelu so smiselne le, če je vzorec dovolj velik, da zajema reprezentativen nabor geometrijskih značilnosti, ter če je struktura zanesljivo in natančno izdelana. Takšne modele je mogoče ustvariti s tridimenzionalnimi tehnikami zajemanja slike, kot je magnetna resonanca ali rentgenska računalniška tomografija (CT), ki omogočata pridobitev podrobnih 3D-slik strukture pene [7]. Naknadna analiza teh slik zagotavlja podatke, potrebne za statistično analizo in izdelavo računalniškega modela, ki natančno odraža realno geometrijo pene.

V nadaljevanju tega poglavja je predstavljena geometrijska karakterizacija različnih celičnih metamaterialov, katerih izdelovalni postopki so bili predstavljeni v poglavju 5. Glede na izdelovalni postopek in geometrijo posameznega metamateriala je prilagojena tudi metoda geometrijske karakterizacije.

6.1.1 Avksetične strukture iz obrnjenih tetrapodov

Osnovni gradnik avksetične celične strukture iz obrnjenih tetrapodov je obrnjen tetrapod (slika 6.1). Obrnjeni tetrapodi so nato povezani v večje strukture (slika 6.2). Geometrija je sestavljena iz paličnih elementov, definirana pa je na osnovi treh geometrijskih parametrov, ki so predstavljeni na sliki 6.1.



Slika 6.1: Geometrija obrnjenega tetrapoda

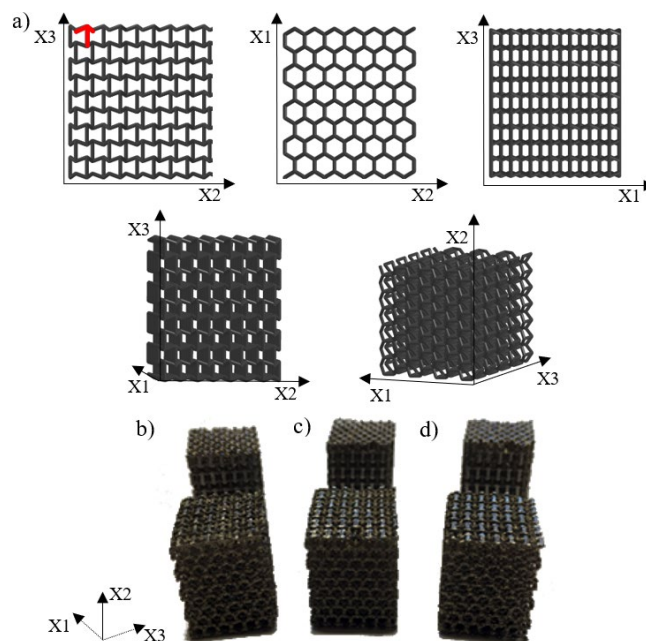
Geometrijski parametri, ki določajo avksetično strukturo iz obrnjenih tetrapodov, so naslednji:

- višina tetrapoda a ,
- višina osnovnega trikotnika b ,
- razlika v višini db ,
- debelina medcelične povezave d .

Gradniki, predstavljeni na sliki 6.1, so nato povezani z drugimi v končnih ogliščih. Vsaka plast gradnikov je glede na sosednji plasti zamaknjena za kot 60° , kar je razvidno s slike 6.2, kjer je prikazana geometrija avksetične celične strukture iz obrnjenih tetrapodov in z rdečo prikazan posamezen obrnjen tetrapod. Izdelani so bili preizkušanci z različnimi poroznostmi, kar je bilo doseženo s spreminjanjem debeline medceličnih povezav, druge dimenzije pa so ostale enake ($a = 2,5$

mm, $b = 3,0$ mm, $db = 0,5$ mm). Dimenzije in druge osnovne fizikalne lastnosti preizkušancev so prikazane v preglednici 6.1.

Dolgi preizkušanci avksetičnih struktur iz obrnjenih tetrapodov so bili izdelani tudi z gradirano poroznostjo (slika 6.10).



Slika 6.2: Geometrija avksetičnih struktur iz obrnjenih tetrapodov, prikazana v različnih pogledih, ter (a) izdelani preizkušanci z nizko (b), srednjo (c) in visoko (d) poroznostjo.

Preglednica 6.1: Lastnosti preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov iz titanove zlitine Ti6Al4V

Kratki preizkušanci					
	Dimenzije [mm]	Masa (std. dev.) [g]	Gostota [g/cm³]	Poroznost [-]	Število preizk.
Visoka poroznost	X1 × X2 × X3 15,6 × 19,2 × 18,7	2,38 (0,020)	0,43	0,90	17
Srednja poroznost		3,45 (0,023)	0,62	0,86	17
Nizka poroznost		4,33 (0,069)	0,77	0,83	13
Dolgi preizkušanci					
	Dimenzije [mm]	Masa (std. dev.) [g]	Gostota [g/cm³]	Poroznost <i>p</i> [-]	Število preizk.
Visoka poroznost	X1 × X2 × X3 15,6 × 40,5 × 18,7	4,67 (0,138)	0,40	0,91	8
Srednja poroznost		7,24 (0,051)	0,61	0,86	8
Nizka poroznost		9,04 (0,075)	0,76	0,83	4

6.1.2 Kiralne avksetične strukture

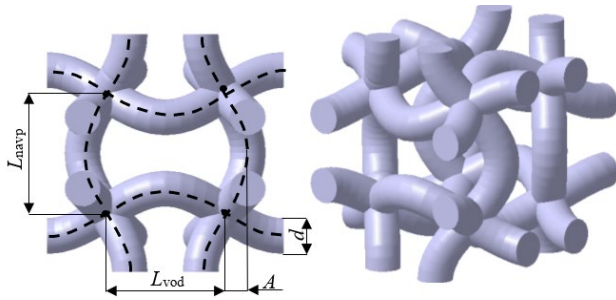
Kiralne avksetične strukture, obravnavane v tem delu, so bile razvite na podlagi analize lastnih frekvenc rešetkaste strukture [44]. Poenostavljeno lahko te strukture definiramo s položajem vozlišč, v katerih se

stikajo krivulje, ki so opisane s pomočjo sinusne funkcije v dveh smereh koordinatnega sistema, kar je prikazano na sliki 6.3.

Geometrijski parametri, ki določajo kiralno avksetično strukturo (slika 6.3), so naslednji:

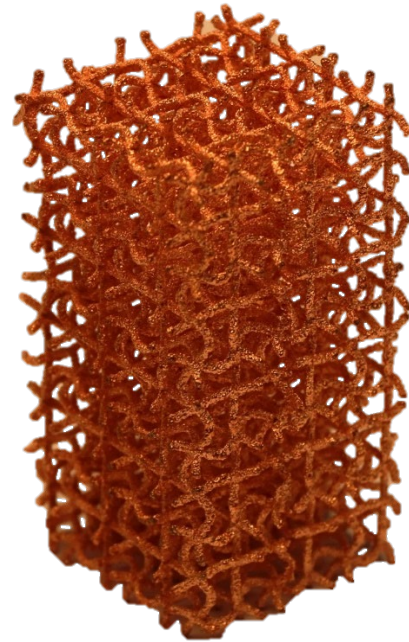
- medvozliščna razdalja (dolžina celice) v navpični in vodoravni smeri $L_{navp/vod}$,
- amplituda A ,
- debelina medcelične povezave d .

strukture iz bakra $5 \times 5 \times 10$ osnovnih celic, v primeru kiralnih struktur iz titana (slika 7.10) pa je število celic $4 \times 4 \times 10$.



Slika 6.3: Osnovni gradnik kiralne avksetične celične strukture

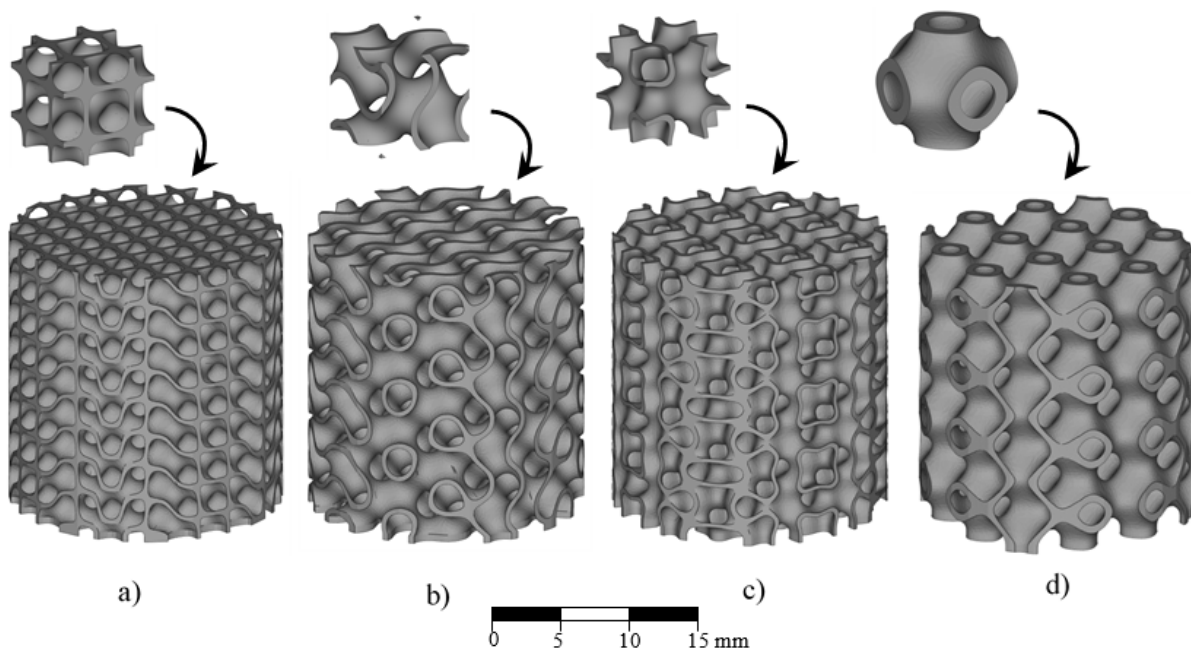
Iz bakra izdelana kiralna avksetična celična struktura je prikazana na sliki 6.4. Ob strukturah iz bakra so bile izdelane tudi kiralne avksetične strukture iz titanove zlitine Ti6Al4V, kjer so bili uporabljeni enaki geometrijski parametri, kar je podano v preglednici 6.2. Kot je razvidno s slike 6.4, imajo kiralne avksetične



Slika 6.4: Kiralna avksetična celična struktura iz bakra

Preglednica 6.2: Lastnosti kiralnih avksetičnih celičnih struktur

Osnovni material struktur	Geometrijski parametri [mm]			Masa [g]	Gostota [g/cm ³]	Poroznost [–]	Število preizk.
	A	$L_{navp/vod}$	d				
baker	1	5	0,84	30,92	0,63	0,93	16
titan	1	5	0,57	5,51	0,16	0,96	6



Slika 6.5: CAD-modeli analiziranih struktur TPMS: a) Schwarz Diamond, b) Schoen Gyroid, c) Schoen IWP in d) Schwarz Primitive

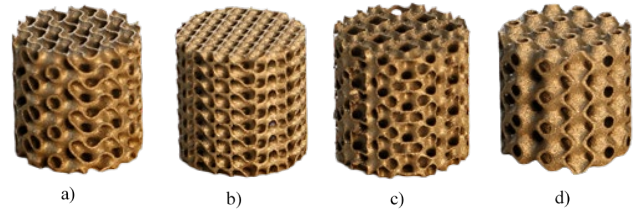
6.1.3 Strukture TPMS

Minimalno površino lahko opišemo z implicitnimi površinami, ki jih določa funkcija, ki zadovoljuje enakost $f(x, y, z) = c$ in so podane v preglednici 4.1. Strukture, uporabljene v tem delu, so bile kreirane v programu MSLattice [73]. Kreirane so bile štiri različne strukture s po štirimi različnimi relativnimi gostotami (13 %, 16 %, 19 %, 21 %), slika 6.5.

Izdelane strukture so bile očiščene s peskanjem, da se odstrani preostali prah iz površin. Končni vzorci za testiranje z dimenzijami $\square 20 \times 20$ mm so bili izrezani iz delovne mize z uporabo električne žične erozije. Primeri končnih vzorcev za testiranje so prikazani na sliki 6.6. Vzorci so bili stehtani in izračunane so bile

dejanske relativne gostote, ki so navedene v preglednici 6.3.

Izdelani vzorci kažejo majhna odstopanja od zasnove, kar je posledica kombinacije gostote napak in oprijema prahu na površinah. To je bilo predhodno opisano v poglavju 5.2.



Slika 6.6: Izdelani vzorci
a) Schwarz Diamond, b) Schoen Gyroid, c) Schoen IWP in d) Schwarz Primitive

Preglednica 6.3: Lastnosti izdelanih vzorcev

Geometrija	Dimenzije [mm]	Masa (st. dev.) [g]	Relativna gostota [%]	Oznaka
Diamond	Ø20×20	5,72 (0,04)	11,4	Diamond RD 11,4 %
		7,57 (0,04)	15,0	Diamond RD 15,0 %
		9,39 (0,04)	18,5	Diamond RD 18,5 %
		10,99 (0,06)	21,8	Diamond RD 21,8 %
Gyroid		6,19 (0,07)	12,4	Gyroid RD 12,4 %
		8,00 (0,07)	15,5	Gyroid RD 15,5 %
		9,59 (0,08)	19,0	Gyroid RD 19,0 %
		11,02 (0,07)	21,9	Gyroid RD 21,9 %
IWP		6,71 (0,07)	12,2	IWP RD 12,2 %
		8,84 (0,09)	17,6	IWP RD 17,6 %
		10,50 (0,09)	20,8	IWP RD 20,8 %
		11,54 (0,04)	22,9	IWP RD 22,9 %
Primitive		7,19 (0,04)	14,2	Primitive RD 14,2 %
		8,68 (0,04)	17,2	Primitive RD 17,2 %
		10,14 (0,06)	20,2	Primitive RD 20,2 %
		11,09 (0,09)	22,1	Primitive RD 22,1 %

Dimenzije, teža in relativna gostota vseh analiziranih skupin vzorcev so podane v tabeli 6.3. Za vsako skupino je bilo izdelanih pet vzorcev, kar skupaj znaša 80 izdelanih vzorcev. Iz standardnega odklona teže je razvidno, da je izdelava vzorcev z enako geometrijo ponovljiva.

6.2 Določitev natančnosti in kakovost izdelave preizkušancev

Določitev natančnosti in kakovosti izdelave preizkušancev je ključnega pomena pri mehanski karakterizaciji omenjenih metamaterialov. Pri določitvi

natančnosti najpogosteje uporabljamo makroskopske in mikroskopske metode, metode odkrivanja napak in statističnih pristopov ovrednotenja napak. V primeru makroskopskih metod najpogosteje uporabljajo naprave, kot so optični profilometri, mikrometri in koordinatni merilni stroji, ki nam omogočajo natančno merjenje zunanjih dimenzij celičnih struktur. V primeru kompleksnih 3D-celičnih struktur pogosto uporabljamo meritve teže celičnih preizkušancev. Za analizo površin pri visokih povečavah uporabljamo elektronske mikroskope, ki nam omogočajo vpogled struktur na mikroraven, ter ocenitev površinske hrapavosti, ravnosti in drugih parametrov površine. Za

odkrivanje morebitnih napak, kot so razpoke, nehomogenosti materiala ali druge pomanjkljivosti v celičnih strukturah, se najpogosteje uporablja rentgenska spektroskopija ali tomografija.

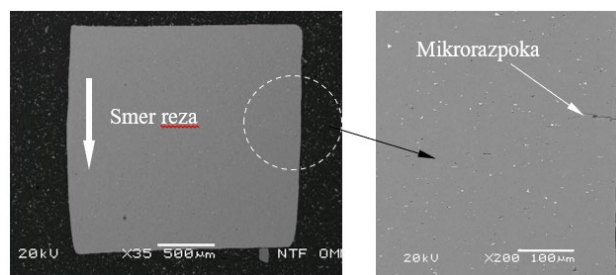
Natančnost in kakovost izdelave preizkušancev sta odvisni od več dejavnikov, vključno z izbrano tehnologijo izdelave, uporabljenimi materiali, geometrijske oblike in ustreznostjo proizvodnega procesa. V nadaljevanju so predstavljeni izsledki raziskav dimenzijske karakterizacije celičnih metamaterialov.

6.2.1 Vpliv izdelovalne tehnologije na mehanske lastnosti 2D-struktur

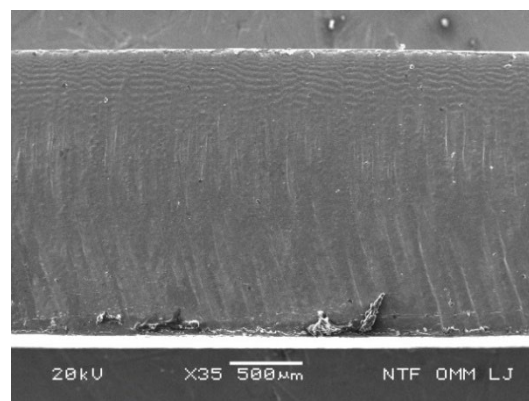
Laserski razrez in razrez z abrazivnim vodnim curkom sta dve ključni metodi za izdelavo 2D-celičnih struktur, ki se pogosto uporabljata zaradi svoje natančnosti in učinkovitosti. Mehanske lastnosti teh struktur so močno odvisne od proizvodnih parametrov, ki se uporabljajo med procesom izdelave. Laserski razrez uporablja visokoenergijski laserski žarek za rezanje materialov, pri čemer so ključni parametri moč laserja, hitrost rezanja, frekvenca pulzov, osredotočenost žarka in vrsta zaščitnega plina. Moč laserja in hitrost rezanja neposredno vplivata na kakovost reza; višja moč in počasnejša hitrost rezanja omogočata natančnejše reze, vendar lahko povzročita tudi večje toplotne poškodbe materiala. Te poškodbe lahko oslabijo mehanske lastnosti 2D-celičnih struktur zaradi nastanka mikrorazpok in zaostalih napetosti (slika 6.7). Frekvenca pulzov vpliva na gladkost robov, pri čemer višja frekvenca lahko povzroči akumulacijo toplote, kar negativno vpliva na strukturno celovitost materiala. Osredotočenost laserskega žarka je ključna za doseganje čistega reza brez pretiranega taljenja robov, kar ohranja mehanske lastnosti materiala, medtem ko vrsta in tlak zaščitnega plina vplivata na kakovost reza in oksidacijo robov, kar lahko dodatno vpliva na mehanske lastnosti.

Z inženirskega pogleda je najpomembnejša kakovost rezalnega robu. Ocenimo jo vizualno ali pa izmerimo hrapavost površine, kar je bolj objektivno merilo. Podobno kot pri rezanju z vodnim curkom je površina v zgornjem delu reza gladka in se proti dnu slabša, po navadi vsebuje tudi brazde. Nastanek brazd lahko zmanjšamo s sprotnim spreminjanjem toka plina in

pulziranjem z višjimi frekvencami. Če tanjše obdelovance režemo s konstantno lasersko močjo, dosežemo bolj gladko površino. Večja moč rezanja omogoča boljšo hrapavost površine v spodnjem delu reza. Hrapavost površine je odvisna predvsem od kemične sestave materiala, njegovih lastnosti in debeline ter parametrov procesa rezanja. Na hrapavost površine vpliva tudi intenzivnost odstranjevanja staljenega materiala iz območja rezanja. Z optimizacijo rezalnih parametrov se približamo relativno gladki površini brez ostankov srha staljenega materiala. Problem kakovosti površine je tudi srh, ki nastane zaradi nabiranja strjene taline na dnu reza (slika 6.8). Pogosto se pojavi predvsem pri rezanju s kisikom in je zelo krhek, ker je prekrit z raznimi oksidi. Z uporabo inertnih plinov se ta pojav precej zmanjša, kar prepreči tudi oksidacijo. Ker je pri debelejših obdelovancih srh težje preprečiti, moramo paziti na gostoto moči reza na dnu rezane površine. Srh je odvisen tudi od samega materiala, ki ga režemo. Pri konstrukcijskih jeklih na primer ni opaziti znatnega srha, pri nerjavnem jeklu in aluminiju pa je ta pojav precej pogost.



Slika 6.7: Mikrorazpoka posledica oksidacije

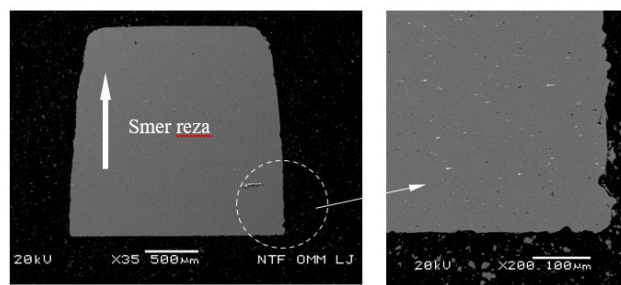


Slika 6.8: Srh staljenega materiala na dnu površine reza

Problem laserskega rezanja je tudi toplotno vplivno področje, ki ga sestavlja pretaljen in ponovno strjen material. Nekaj staljenega materiala ostane na rezani

površini, ker ga rezalni plin ne odstrani popolnoma (govorimo o debelini le nekaj μm). Zaradi hitrega ohlajanja je lahko ta plast materiala tudi do dvakrat bolj trda od osnovnega materiala. Pri rezanju s kisikom imamo globlje toplotno vplivno cono, saj površina materiala gori in ustvarja še dodatno toploto.

Razrez z vodnim curkom, ki uporablja visokotlačni curek vode, pogosto pomešan z abrazivnimi delci, ima prav tako pomembne proizvodne parametre, kot so tlak vode, hitrost rezanja, koncentracija abrazivnih delcev in vrsta abraziva. Višji tlak vode omogoča hitrejšo in natančnejše rezanje, vendar lahko povzroči večje zaostale napetosti v materialu, kar vpliva na mehanske lastnosti. Počasnejša hitrost rezanja lahko zagotovi boljšo natančnost, vendar lahko poveča odnašanje materiala in tvorbo neenakomernih robov. Višja koncentracija abrazivnih delcev povečuje učinkovitost rezanja, vendar lahko povzroči večjo površinsko hrapavost, kar lahko negativno vpliva na mehanske lastnosti 2D-celičnih struktur. Izbira vrste abraziva, na primer granata ali aluminijevega oksida, prav tako vpliva na končno površino in mehanske lastnosti reza. Glavni vpliv na natančnost stroja je predvsem geometrijska oblika reza. Njegovo obliko opišemo z brazdavostjo površine in koničnostjo reza, ki je definirana ali z naklonom rezane površine ali pa z razmerjem zgornje in spodnje širine reza. Za boljšo natančnost je treba čim bolj zmanjšati ti dve značilnosti reza. Rezalna fronta ima v dveh dimenzijah obliko krivulje, ki loči odvzet material od osnovnega, v tretji dimenziji pa obliko žleba. Na fronti je pogost pojav nastanek stopnice, ki se ciklično pomika navzdol po rezalni fronti. Cikel nastanka stopnice traja približno toliko, kolikor potrebuje curek za pot dolžine enega premera curka pri neki hitrosti. Površina obdelanega obdelovanca z vodnim curkom ima značilno brazdasto teksturo. Brazde so ukrivljene v smeri nasproti gibanju curka, ukrivljenost brazd pa je odvisna predvsem od jakosti curka in hitrosti rezanja določene debeline in vrste materiala. Pri določanju ukrivljenosti brazd je običajno najpomembnejši parameter horizontalna razdalja med zgornjim in spodnjim delom brazde. Globina brazd se povečuje z oddaljitvijo od zgornjega roba reza, kar pomeni večjo valovitost površine v spodnjem delu reza (slika 6.9). Brazde nastanejo predvsem kot posledica stopnic na rezalni fronti.



Slika 6.9: Oblika profila reza

Pri rezanju z vodnim curkom je koničnost neločljivo povezana z brazdavostjo na površini reza. Večja kot je brazdavost površine, večja bo tudi koničnost reza. Optimalno obliko reza za določeno debelino in vrsto materiala dosežemo, ko bosta zgornja in spodnja širina reza enaki. V praksi jo dosežemo z določitvijo optimalne hitrosti. Kot je že bilo omenjeno, je natančnost obdelave ena največjih slabosti rezanja z vodnim curkom. Manjši stroji dosegajo natančnost do $\pm 0,1$ mm, pri večjih strojih pa je natančnost slabša. Z uvedbo 5-osnih strojev in kompenzacijo reza je moč doseči natančnost do $\pm 0,02$ mm. Hrapavost površine, odrezane z vodnim curkom, je najslabša na spodnjem delu obdelovanca, zato se tam opravlja tudi meritev hrapavosti. Napaka vogala predstavlja odstopanja od imenske konture na zgornji in spodnji strani obdelovanca. Napake na konturi se pojavijo zaradi okroglosti vodnega curka, netočne dimenzije curka in zaostajanja rezalnega medija.

Obe metodi, laserski razrez in razrez z vodnim curkom, vplivata na mehanske lastnosti 2D-celičnih struktur. Laserski razrez ponuja visoko natančnost in hitrost, vendar lahko toplotni vplivi povzročijo termične poškodbe. Po drugi strani razrez z vodnim curkom zagotavlja hladno rezanje, ki zmanjšuje toplotne poškodbe, vendar lahko visok tlak in abrazivni delci povzročijo notranje napetosti in površinsko hrapavost. Razumevanje in optimizacija proizvodnih parametrov za obe metodi sta ključnega pomena za doseganje želenih mehanskih lastnosti 2D-celičnih struktur. Natančna nastavitev teh parametrov omogoča izdelavo materialov z optimalno trdnostjo, elastičnostjo in trajnostjo, kar je bistveno za njihovo uporabo v zahtevnih industrijskih in tehnoloških aplikacijah.

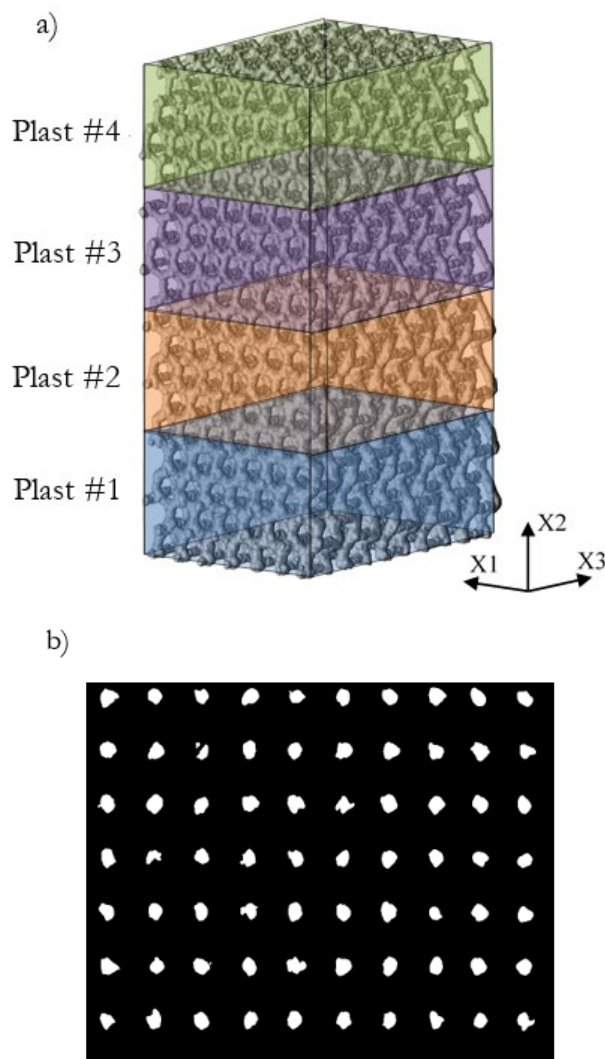
6.2.2 Vpliv izdelovalne tehnologije na mehanske lastnosti 3D-struktur

Dodajna tehnologija, kot revolucionarna metoda proizvodnje, odpira vrata številnim novim možnostim in izzivom. Eden izmed najpomembnejših izzivov je zagotovitev natančnosti in kakovosti izdelkov, ki so ustvarjeni s to tehnologijo. Ker se dodajna proizvodnja razlikuje od tradicionalnih metod, je treba razviti specifične metode za ocenjevanje geometrijskih odstopanj, površinske kakovosti in mehanskih lastnosti izdelkov. V ta namen se za vrednotenje natančnosti in kakovosti izdelave preizkušancev uporabljajo postopki, kot so μ CT-skeniranje, metalografija in optična mikroskopija.

– MicroCT-skeniranje

MicroCT (ang. *micro-computed tomography*) skeniranje je neporušna preizkusna metoda, ki omogoča pridobivanje podrobnih tridimenzionalnih (3D) slik notranje strukture materialov in objektov. Ta tehnologija, ki temelji na rentgenskih žarkih, se vse pogosteje uporablja na različnih področjih znanosti in industrije, saj omogoča natančno analizo materialov na mikroskopski ravni. Postopek microCT-skeniranja je podoben medicinskemu CT-skeniranju, vendar prilagojen za manjše vzorce in z višjo ločljivostjo. Vzorce se postavi v rotacijsko stopnico, ki se vrti okoli osi. Med rotacijo se skozi vzorec pošiljajo rentgenski žarki, ki se absorbirajo v različni meri, odvisno od gostote materiala. Detektor na nasprotni strani zbira informacije o oslabljenih žarkih, ki se nato obdelajo z računalniškimi algoritmi in pretvorijo v 3D-sliko. Na sliki 6.10 je prikazan microCT volumski model gradiranega kiralnega preizkušanca, izdelanega s postopkom SEBM. MicroCT-skeniranje je bilo izvedeno na Nacionalnem tehnološkem inštitutu, Okinava, Japonska, na napravi Toshiba MicroCT TOSCANER-30000 Series system. Pospeševalna napetost 70–80 kV in tok 55–60 μ A sta bila uporabljena za skeniranje gradirane avksetične celične strukture iz obrnjenih tetrapodov. Med skeniranjem vzorca je bilo posnetih 1697 dvodimenzionalnih prereзов v resoluciji 4–11 μ m/piksel. Tridimenzionalno procesiranje prereзов je bilo izvedeno v programu ImageJ (slika 6.10). Tridimenzionalni volumski model je bil pozneje razrezan v ravnini X1-X3 v vsaki plasti preizkušanca v

smeri X2. Na podlagi 1120 slik, ki so nastale z rezanjem volumskega modela (slika 6.10b), je bila ovrednotena površina prereзов medceličnih povezav. Povprečni premer medceličnih povezav posameznih plasti z različno poroznostjo je bil določen kot povprečje premerov medceličnih povezav v posameznem območju (preglednica 6.4).



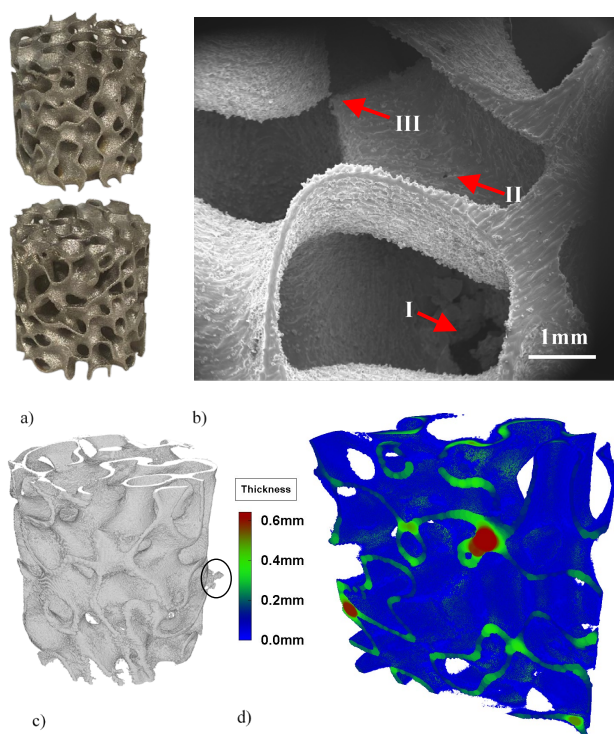
Slika 6.10: 3D-volumski model na osnovi microCT-skeniranja a) in prereз medceličnih povezav z ravnino X1-X3 (b)

Preglednica 6.5: Lastnosti gradiranih preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov po posameznih plasteh

	povprečen premer [mm]	poroznost [%]
Plast #1	0,54	83
Plast #2	0,48	86
Plast #3	0,42	88
Plast #4	0,38	90

Na sliki 6.11 a) je prikazan primer izdelanih struktur TPMS s selektivnim laserskim taljenjem. Čeprav so

predlagani celični materiali izpeljani iz implicitnih funkcij, ki opisujejo celične materiale, kateri pri izdelavi ne potrebujejo podpor, postopek načrtovanja vključuje lokalne rotacije celic in popačenje oblike, kar ima za posledico dele izdelanega vzorca s stenami, usmerjenimi vodoravno na smer gradnje, ki niso nujno samopodporne. Ti deli vzorca so bolj dovzetni za nastanek napak. Nekatere od teh napak so lahko izrazite velikosti in povzročijo strukturne slabosti in koncentracijo napetosti. Primeri takšnih pomembnih napak so prikazani s puščico (I) na sliki 6.11 b). Pri tiskanju lahko pride tudi do mikro praznin, ki nastanejo med taljenjem in strjevanjem prahu, kot je prikazano s puščico (II) na sliki 6.11 b). Pomembna pomanjkljivost TPMS-geometrij so prekinitev zveznosti na mejah med strukturami v različnih poddomenah. Primer takšne diskontinuitete je prikazan s puščico (III). Slika 6.11 c) prikazuje primer rekonstruiranih CT-slik. CT-rekonstrukcije so potrdile dejanske relativne gostote, navedene v preglednici 6.5, ter notranje in zunanje napake v obliki izkrivljenih površin, ki so nastale zaradi premikanja izravnalne letve za nanos na vrhu plasti in medsebojnega delovanja s strjeno plastjo.



Slika 6.11: a) 3D-natisnjeni vzorci, b) slika notranje strukture vzorca, c) 3D-model rekonstruirane geometrije in d) analiza debelin medceličnih ploskev znotraj struktur

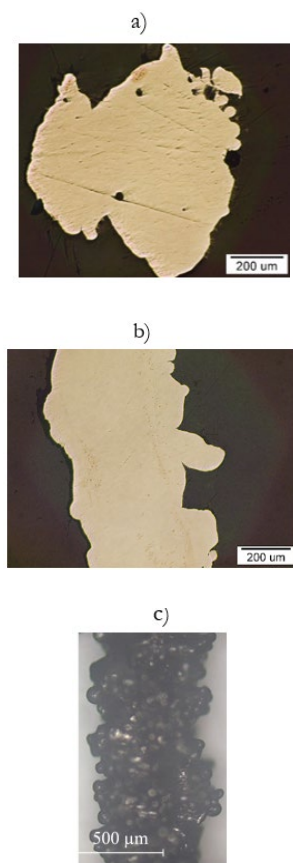
Primer takih napak je na sliki 6.11 c) označen s krogom. Odstopanje debelin medceličnih ploskev znotraj strukture je prikazano na sliki 6.11 d). S slike je razvidno, da se debeline znotraj strukture drastično spreminjajo na vmesnikih med različnimi poddomenami, zaradi česar se relativna gostota preizkušancev lokalno spreminja.

– Metalografija in optična mikroskopija

Metalografija omogoča hitrejšo in cenejšo analizo kakovosti izdelave kot CT-skeniranje, vendar je omejena le na določen prerez strukture. Rezultati metalografije so služili za dodatno preverjanje obstoja poroznih, neuspešno pretaljenih območij v prerezu medceličnih povezav pri avksetičnih strukturah. Pokazano je bilo, da obstajajo le zelo lokalna in omejena območja znotraj medceličnih povezav, ki niso uspešno pretaljena. Ob tem je bilo ob metalografski analizi opaženo, da prerez medceličnih povezav odstopa od imenskega, in to z znatno hrapavostjo in nagubanostjo zunanjih površin, kar je bilo še nadalje analizirano z optičnim mikroskopom. Spremembe iz želenega cilindričnega prereza v dejansko izdelane prereze, prikazane na sliki 6.12, so že obravnavane v več delih drugih raziskovalcev [74].

Kakovost izdelave preizkušancev z metodo SEBM je bila nadalje analizirana z optično mikroskopijo. Določena je bila geometrija medceličnih povezav, ovrednotene napake na površini in določen premer medceličnih povezav za vse poroznosti (slika 6.12c). Pri medceličnih povezavah, ki so bile usmerjene v smeri gradnje, je opaziti močno krogličenje (ang. *balling*), česar ni opaziti pri medceličnih povezavah, ki ležijo v ravnini pravokotno na smer gradnje, kjer so delci prahu bolje stopljeni in povezani med seboj. To težavo je možno zaobiti z uporabo ukrivljenih medceličnih povezav [75], kot na primer v primeru kiralnih struktur, kjer le nekaj medceličnih povezav leži v ravnini prečno na smer gradnje, vendar se tudi tam ni možno popolnoma izogniti vplivom krogličjenja. Pojav krogličjenja je zelo pomemben v primerih cikličnega obremenjevanja, saj se na območju krogličjenja pojavijo velike koncentracije napetosti, v primerih enkratnega obremenjevanja pa ta območja koncentracij napetosti ne bi smela imeti prevelikega vpliva na mehanske lastnosti medcelične povezave. Čeprav je vzdolžna oblika medceličnih povezav zelo različna, pa povprečni premer

medceličnih povezav med različnimi smermi ne odstopa za več kot 5 %. Iz tega razloga je bil v nadaljevanju tega dela uporabljen konstanten cilindričen prerez za opis medceličnih povezav v računalniških modelih.



Slika 6.12: Slike metalografske analize medceličnih povezav v avksetičnih celičnih strukturah v prečni smeri (a), vzdolžni smeri (b) in posnetek z optično mikroskopijo (c)

7 Eksperimentalna mehanska karakterizacija

Ko so celični metamateriali izpostavljeni makroskopskemu obremenjevanju, se struktura deformira s kombinacijo upogibanja, vzvojne deformacije ali raztezanja/tlačenja medceličnih povezav v avksetičnih in rešetkastih TPMS-strukturah ali plošč v površinskih TPMS-strukturah. Vsi ti principi deformiranja se odražajo tudi na mehanskih odzivih različnih celičnih metamaterialov, tako da jih je treba natančno določiti in razumeti njihov vpliv.

7.1 Teoretične osnove

7.1.1 Teoretična izhodišča monotonega mehanskega testiranja celičnih metamaterialov

V splošnem so mehanske lastnosti celičnih struktur odvisne od lastnosti osnovnega materiala, relativne gostote, topologije ter velikostnega razreda in so lahko v splošnem zapisane kot funkcija relativne gostote in skalirnega potenčnega zakona:

$$\theta_{cel} = C\theta_s\rho_r^n, \quad (7.1)$$

kjer so θ_{cel} lastnost celičnega materiala, θ_s lastnost osnovnega materiala, ρ_r relativna gostota, C parameter geometrije in n skalirni eksponent. Vrednosti teh parametrov so neposredno povezane z analizirano topologijo, kar pomeni, da vrednosti skalirnega eksponenta n niso univerzalne, temveč so odvisne od specifične topologije celične strukture. Različne topologije in načini deformacije bodo imeli različne vrednosti za n , kar vpliva na odnos med relativno gostoto in mehanskimi lastnostmi.

Voightova maksimalna teoretična meja za togost in trdnost celične strukture ustreza vrednostma faktorja in skalirnega eksponenta $C = n = 1$. Takšna kombinacija parametrov je zaželjena za maksimalno togost in

trdnost, vendar jo je v realnosti težko doseči. Zaradi geometrijskih faktorjev, kot so neporavnost medceličnih povezav ali površin glede na obremenitve, strukturne napake, upogibanje ali izbočenje elementov strukture in/ali eksperimentalno neporavnanje, pride do vrednosti $C < 1$. Eksponent n se lahko spreminja med 1 in 4. V splošnem, če togost celičnega materiala kaže kvadratno odvisnost od relativne gostote, tako da je eksponent n enak 2 (ali približno 1,5 za trdnost), bo material pokazal pretežno upogibni način deformacije. To opazimo pri odprto-celičnih stohastičnih penah, kjer je n približno 2. Vendar pa togost zaprto-celičnih pen in nekaterih periodičnih rešetk kaže eksponent n , ki se lahko spreminja med 1 in 2, odvisno od prispevka treh glavnih mehanizmov deformacije: upogibanja celičnih sten, raztezanja celičnih površin in upogibanja celičnih površin. Zato je Youngov modul mogoče opisati z Gibson-Ashbyjevim modelom kot:

$$E_{cel} = \beta'_1(1 - \varphi)\rho_r + \beta_1\varphi^2\rho_r^2 + \beta''_1(1 - \varphi)^3\rho_r^2, \quad (7.2)$$

kjer je E_{ce} elastični modul celične strukture, β_1, β'_1 in β''_1 konstante in φ brezdimenzijski parameter, ki opisuje razmerje med materialom na robovih celic strukture in materialom na robovih in površinah celic. Ta parameter je lahko opisan tudi kot $\varphi = \frac{t^2}{t^2 + bL}$, kjer je L dolžina osnovne celice, t debelina medcelične povezave in b debelina površine. V primeru površinskih struktur se enačba 7.2 poenostavi, ker $b \approx t$ in ker $L \gg b, L \gg t$, potem $\varphi \rightarrow 0$, v:

$$E_{ce} = \beta'_1\rho_r + \beta''_1(1 - \varphi)\rho_r^2. \quad (7.3)$$

V predhodno navedenih enačbah so podane le teoretične predpostavke za izračun elastičnih modulov, vendar je za določitev mehanskih lastnosti celičnih

metamaterialov treba izvesti vrsto eksperimentalnih testov pri različnih stopnjah in hitrostih deformacije, da dobimo natančen vpogled v njihovo mehansko in deformacijsko obnašanje. Najpogosteje uporabljeno in najpomembnejše testiranje celičnih metamaterialov je tlačno testiranje, kjer lahko določimo celoten mehanski odziv od linearne dela do zgoščevanja. Prve okvirne standarde testiranja in ovrednotenja mehanskih lastnosti in deformacijskega obnašanja so definirali Hipke in sodelavci v [76] ter jih nato zapisali kot standard ISO 13314 [77]. Določeni standardi in usmeritve, predvsem glede geometrij za testiranje, so podani tudi v pionirskih delih na področju celičnih struktur [63], [78]. V splošnem velja, da je treba za testiranje izbrati geometrijo, ki bo podala reprezentativen odziv, kar v večini v tem delu predstavljenih struktur pomeni, da imamo vsaj 3–5 osnovnih ponavljajočih se celic v vsaki smeri koordinatnega sistema.

Po obremenjevanju je treba eksperimentalne rezultate ovrednotiti, da so primerljivi z delom drugih znanstvenikov. Pri tem je dobro slediti naslednjim predlaganim načinom za izračun mehanskih veličin [76]:

- **Največja napetost** σ_{najv} je napetost, ki se pojavi pri prehodu iz elastičnega področja in ji predvsem pri prevladujočih si nateznih napetostnih stanjih v medceličnih povezavah (ang. *stretching dominated structures*) sledi opazen padec napetosti. Določitev je lahko različna pri različnih mehanskih odzivih, vendar je v splošnem to največja napetost do 20 % deformacije.
- **Napetostni plato** σ_{pl} (ang. *plateau stress*) je območje, kjer je mehanski odziv zaradi deformiranja (in porušitev) medceličnih povezav načeloma konstanten, definiran pa je kot povprečna napetost med 20 in 40 % deformacije.
- **Deformacija zgoščevanja** ε_d (ang. *densification strain*) je deformacija, pri kateri pride do vzpostavitve več kontaktov med porušenimi deli celične strukture, togost strukture pa se evidentno poveča. Ovrednotena je z deformacijo, kjer konstantna napetost $1,3 \times \sigma_{pl}$ seka mehanski odziv.
- **Specifična absorpcijska energija** SEA (ang. *Specific Energy Absorption*) predstavlja površino pod krivuljo mehanskega odziva, podeljeno z relativno

gostoto, in nam predstavlja, koliko energije je material sposoben absorbirati do deformacije zgostitve:

$$SEA = \frac{\int_0^{0,6} \sigma d\varepsilon}{\rho_{povp}}; \quad (7.4)$$

- **Specifična togost** SS (ang. *Specific Strength*) je merilo, kako dobro je izkoriščen material z namenom absorpcijske energije. Bližje je ta togost vrednosti 1, boljše lastnosti ima lahko absorber trkov, izdelan iz te strukture:

$$SS = \frac{\sigma_{najv}}{m}. \quad (7.5)$$

7.1.2 Teoretična izhodišča dimenzioniranja na življenjsko dobo

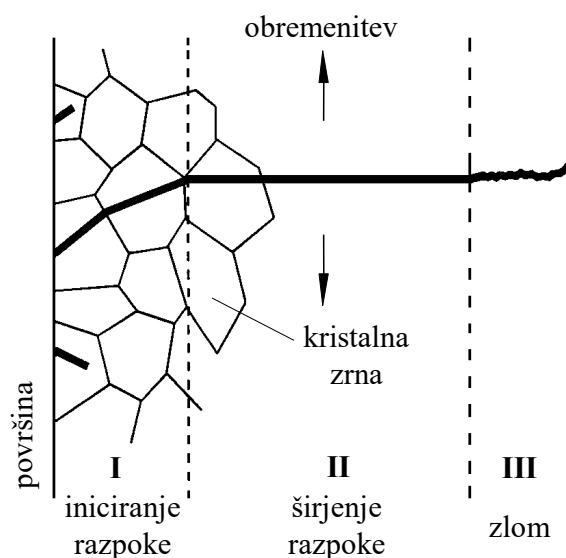
Dimenzioniranje na življenjsko dobo je eden izmed pristopov k dimenzioniranju strojnih delov in komponent, ki so obremenjeni s časovno spremenljivo dinamično obremenitvijo. Pri klasičnem pristopu k dimenzioniranju primerjamo dejansko napetost v obravnavanem prerezu strojnega dela z dopustno napetostjo (σ_{dop}), medtem ko v primeru dimenzioniranja na življenjsko dobo določamo število nihajev obremenitve N , ki jih bo strojni del vzdržal pri določeni napetosti σ . Klasični pristop dimenzioniranja na življenjsko dobo obravnavanega strojnega dela, ki je izpostavljen ciklični obremenitvi, temelji na uporabi napetostne metode (ang. *stress method*). Napetostna metoda je najstarejša in v tehniški praksi še vedno najpogosteje uporabljena metoda za dimenzioniranje dinamično obremenjenih strojnih delov [79]. Gre za konzervativno metodo, ki temelji na predpostavki, da so napetosti v elastičnem območju materiala. Če se v obravnavani komponenti zraven elastične deformacije pojavi še plastična deformacija, je treba za dimenzioniranje na življenjsko dobo uporabiti deformacijsko metodo (ang. *strain method*). Deformacijska metoda je novejša metoda dimenzioniranja dinamično obremenjenih strojnih delov, ki temelji na poznavanju cikličnih deformacij v kritičnih prerezih strojnih delov. Pri omenjeni metodi je postopek dimenzioniranja predvsem osredotočen na iniciacijo razpoke, ki je posledica utrujanja materiala.

Utrujanje materiala je akumulacijski proces poškodbe, ki se pojavi v strojnem delu, podvrženem ciklični

obremenitvi. V inženirski praksi je odpoved strojnega dela lahko posledica različnih dejavnikov, kot so izpostavljenost velikim obremenitvam, napake v materialu, lezenje materiala, okoliški dejavniki ali medsebojno delovanje več različnih dejavnikov, ki vplivajo na proces utrujanja. Celoten proces utrujanja materiala je sestavljen iz iniciacije in širjenja razpoke, medtem ko je celotna življenjska doba strojnega dela definirana z naslednjo enačbo:

$$N_t = N_i + N_p$$

V enačbi (7.6) predstavlja N_i število ciklov, potrebnih za iniciacijo razpoke, N_p pa število ciklov širjenja razpoke do nastanka končne odpovedi strojnega dela [79]. Iniciacija utrujenostne razpoke je ena od najpomembnejših faz v procesu utrujanja strojnih delov. V splošnem je povezana s premiki atomov na drsnih ravninah, za katere se domneva, da so glavna nukleacijska mesta za nastanek razpok v kovinah in zlitinah visoke čistosti. Med izmeničnim obremenjevanjem je plastična deformacija koncentrirana v drsnih ravninah, kjer po vsaki razbremenitvi elastični del deformacije izgine, medtem ko zdrs atomov ostane kot trajna deformacija. Zdrs atomov se vedno vrši v tistih ravninah, kjer leži največ atomov. Po določenem številu obremenitvenih ciklov v teh ravninah nastanejo mikrorazpoke. Mikrorazpoke v kovinah in zlitinah se vedno nagibajo k nastanku na prostih površinah, medtem ko se v visokotrdnostnih zlitinah vedno inicirajo v bližini velikih napak, bodisi por bodisi nekovinskih vključkov [80]. Shematski prikaz nastanka razpoke v kritičnem prerezu strojnega dela, ki ga razdelimo na tri faze, je prikazan na sliki 7.1. V fazi *I* se najprej mikrorazpoka širi v strižni ravnini, ki je usmerjena pod kotom 45° na os obremenitve. Širjenje mikrorazpoke običajno poteka skozi določeno število kristalnih zrn in traja vse do faze *II*, ko nastopi širjenje razpoke. V fazi *II* se nato razpoka širi vzdolž drsnih ravnin pravokotno na delujočo obremenitev vse do faze *III*, ko se razpoka širi zelo hitro vse do kritične dolžine razpoke, ko nastopi končna odpoved oziroma zlom. S slike 7.1 je, kot že omenjeno, razvidno, da po iniciaciji utrujenostne razpoke nastopi faza širjenja le-te. Za karakterizacijo širjenja utrujenostne razpoke je v začetku šestdesetih let Paris s sodelavci [81], [82] predstavil mehaniko loma kot uporabno orodje za analiziranje širjenja razpok.



Slika 7.1: Shematski prikaz nastanka utrujenostne poškodbe strojnega dela [79]

Ciklično dinamično eksperimentalno testiranje vključuje izpostavljanje materialov ali konstrukcij ponavljajočim ali spreminjajočim se obremenitvam skozi čas. Ta vrsta testiranja je ključna za razumevanje obnašanja materialov v dinamičnih pogojih, kot so tisti, ki se pojavljajo v strojih, konstrukcijah in transportnih sistemih. Pri dimenzioniranju na življenjsko dobo ciklično dinamično testiranje pomaga pri identifikaciji potencialnih načinov odpovedi, oceni vzdržljivosti materialov in optimizaciji konstrukcij za izboljšano zmogljivost in varnost. V ta namen glede na življenjsko dobo ločimo tri režime testiranja, in sicer: malociklično utrujanje (ang. *Low Cycle Fatigue* – LCF), visokociklično utrujanje (ang. *High Cycle Fatigue* – HCF) in vibracijsko utrujanje (ang. *Vibration Fatigue* – VF). Vsi trije testni režimi vključujejo vnaprej določene preizkusne pogoje, katerih rezultati se uporabljajo za razvoj modelov za napovedovanje življenjske dobe in ocene odpornosti materiala na dinamično ciklično obremenitev. Visokociklična utrujenost se pojavi, ko so materiali izpostavljeni obremenitvam, ki so veliko nižje od njihove meje tečenja, pri velikem številu ciklov. Napaka se običajno zgodi po milijonih ciklov zaradi mikroskopskih razpok, ki se skozi čas širijo. Poudarek pri HCF je na vzdržljivosti materialov pri razmeroma nizkih obremenitvah, vendar za zelo veliko število ciklov. Odpoved materiala je pogosto povezana z elastično deformacijo, kar pomeni, da material ni podvržen (znatni) trajni deformaciji pred porušitvijo. Malociklično utrujanje se zgodi, ko so materiali izpostavljeni večjim obremenitvam, ki običajno

presejajo mejo tečenja, pri manjšem številu ciklov. Za LCF je značilna znatna plastična deformacija, kjer je material podvržen trajnim spremembam oblike, preden se zlomi. Za proučevanje strojnih delov in konstrukcij dinamične obremenitve najpogosteje aproksimiramo s harmoničnimi dinamičnimi obremenitvami, pri čemer morebitna odstopanja upoštevamo z dodatnimi vplivnimi koeficienti. Pri harmoničnih dinamičnih obremenitvah se velikost obremenitve periodično spreminja med najmanjšo vrednostjo in največjo vrednostjo napetosti ali deformacije. Temu pravimo obremenitveno razmerje, ki je definirano s spodnjo enačbo.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (7.7)$$

Kot je razvidno iz enačbe (7.7), obremenitveno razmerje lahko določimo na več načinov, in sicer z razmerjem med minimalno in maksimalno napetostjo (σ_{min} in σ_{max}), z razmerjem med minimalno in maksimalno deformacijo (ε_{min} in ε_{max}) ali z razmerjem med minimalnim in maksimalnim faktorjem intenzivnosti napetosti (K_{min} in K_{max}). Več o vplivu obremenitvenega razmerja R na širjenje utrujenostne razpoke je predstavljeno v [79].

Eksperimentalno testiranje v LCF-režimu obsega izpostavljanje materialov ponavljajočim se obremenitvam, ki povzročajo znatne plastične deformacije. Ta vrsta testiranja je ključna za razumevanje obnašanja materialov v pogojih, kjer je število ciklov do loma relativno majhno ($N_f < 10^4$). Pri omenjenem režimu obremenjevanja preizkušanca ali komponente testiranja poteka v plastičnem področju pri relativno nizkih frekvencah obremenjevanja (od 0,1 do 10 Hz). S tem, ko je material izpostavljen ciklični obremenitvi, ki poteka v plastičnem področju materiala, lahko proučujemo mehanizme utrujanja poškodbe, kot sta nastanek in širjenje razpok, ter določanje odpornosti materiala proti lomu. Za celovito oceno obnašanja materiala pri dinamični obremenitvi je treba zasledovati razmere v diagramu $\sigma - \varepsilon$. Testi se običajno izvajajo na dinamičnih preizkusnih strojih, kjer so vzorci izpostavljeni cikličnim aksialnim obremenitvam. Čeprav so ti stroji na videz podobni strojem za statični natezni preizkus, morajo zagotoviti natančno kontrolirane obremenitve ter imeti ustrezne senzorje za

merjenje napetosti in deformacij v analiziranem prečnem prerezu vzorca. Pri tem lahko preizkuse izvajamo s:

- kontrolo napetosti, pri čemer pri konstantnem razponu napetosti D_s zasledujemo potek deformacije v diagramu $s - e$,
- kontrolo deformacije, pri čemer pri konstantnem razponu deformacije D_e zasledujemo potek napetosti v diagramu $s - e$. [79]

V praksi se za določitev materialnih parametrov v območju malocikličnega utrujanja pogosteje uporablja preizkus s kontrolo deformacije, kjer se za njeno merjenje uporablja ekstenziometer.

V HCF eksperimentalnem pristopu se testi izvajajo pri visokih frekvencah in pri nizkih amplitudnih obremenitvah. Ta vrsta testiranja se uporablja za določevanje trajne dinamične trdnosti preizkušnega materiala v območju od 10^4 do 10^7 obremenitvenih ciklov. Testi se običajno izvajajo na dinamičnih preizkusnih strojih, ki delujejo v območju visokih frekvenc do 285 Hz. Tovrstno eksperimentalno testiranje je ključnega pomena za razumevanje ciklično dinamičnega obnašanja materialov v elastičnem področju. Eksperimentalni testi se običajno izvajajo s konstantno ali spremenljivo amplitudno napetostjo ali deformacijo. Za celovito oceno obnašanja materiala v območju HCF je treba zasledovati razmere v diagramu $\sigma - N$. Rezultate preizkusov prikažemo z Wöhlerjevo krivuljo, kjer na ordinato nanašamo amplitudno napetost σ_a in na absciso število nihajev obremenitve N do zloma preizkušanca.

Eksperimentalno testiranje v VF območju vključuje izpostavljanje materialov ali komponent cikličnim dinamičnim obremenitvam, ki simulirajo vibracije v realnem svetu. Vibracijska utrujenost s spektralnimi metodami povezuje teorijo strukturne dinamike z visokociklično vibracijsko utrujenostjo. Idealna spektralna metoda mora delovati dobro in dosledno, ne glede na spekter odziva in material, ki ga analiziramo. To je ključno za razumevanje, kako se materiali obnašajo pod ponavljajočimi se obremenitvami, zlasti pri visokih frekvencah od 20 do 2000 Hz. Eksperimentalni testi se običajno izvajajo z nadzorom frekvence, amplitude in valovne oblike, ki ima sinusno

ali naključno obliko. Za celovito oceno obnašanja materiala v območju VF je treba zasledovati odzive v časovni domeni, kjer so za merjenje teh veličin obremenitev uporabljeni vibracijski stresalnik in sistemi za zajemanje podatkov. Eksperimentalni testi se običajno izvajajo v časovni domeni z naključno ali vnaprej določeno obremenitvijo.

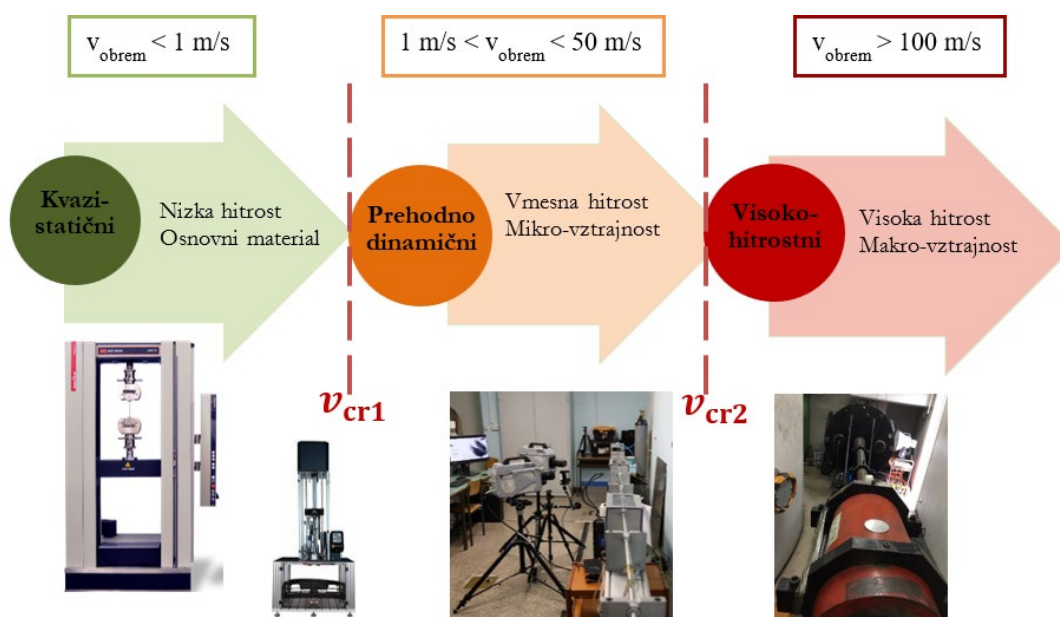
7.2 Monotono obremenjevanje

Za določitev mehanskih lastnosti metamaterialov je treba izvesti vrsto eksperimentalnih testov pri različnih stopnjah in hitrostih deformacije, da dobimo natančen vpogled v njihovo deformacijsko obnašanje. Celične strukture imajo v splošnem pri nateznih obremenitvah krhko obnašanje. Zato se v glavnem preizkušajo v tlačnih režimih obremenjevanja, kjer imajo edinstven mehanski odziv, ki ga zaznamuje elastična deformacija, ki ji sledi obsežno območje napetostnega platoja in zgoščevanje. Tipične metode preizkušanja so prikazane na sliki 7.2. Vrsta testa se običajno določi s hitrostjo deformacije, ki ga želimo doseči, in sicer kvazistatični, prehodno dinamični ali visokohitrostni način. Ti načini deformacije se lahko določijo na podlagi kritičnih hitrostih, ki jih določimo na podlagi kvazistatičnega eksperimentalnega testiranja.

Kvazistatično testiranje metamaterialov je tipično izvedeno na univerzalnem preizkuševalnem stroju, ki je lahko gnan in krmiljen s servohidravličnim ali elektro

pogonom. V primerih, opisanih v nadaljevanju, je bilo testiranje izvedeno na preizkuševalnem stroju INSTRON 8801 pri deformacijski hitrosti $0,005 \text{ s}^{-1}$ (hitrost obremenjevanja $0,01 \text{ mm/s}$) v skladu s standardom ISO 13314: 2011 [77].

Pri zmerno povečani hitrosti obremenitve, vendar še vedno v kvazistatičnem načinu deformacije, je mogoče deformacije spremljati z infrardečo termografijo s pomočjo hitro ohlajene srednje valovne (MW) infrardeče kamere z detektorjem InSb, ki zazna sproščanje toplote med nepovratno plastično deformacijo [83]. Zajemanje deformacijskih procesov je še posebej koristno zaradi visokih hitrosti posnetkov termičnih slikovnih detektorjev, kot je uporabljena kamera detektorja InSb, ki lahko doseže do 700 Hz pri delovanju pri kriogenih temperaturah -200 °C (73 K). Ta pristop omogoča opazovanje širjenja območij plastifikacije in rasti razpok. Ohlajene kamere srednjega infrardečega vala s frekvenco slik več kot 100 Hz omogočajo hitro pridobivanje vzorcev deformacije, ki nastanejo zaradi segrevanja materiala med nepovratno deformacijo. Ta metoda je učinkovita pri vizualizaciji vzorcev deformacije v različnih celičnih materialih [84], [85]. Vendar je ta metoda omejena na obremenitvene primere pri višjih hitrostih obremenitve, kot je to običajno pri kvazistatičnih preizkusih zaradi sproščanja toplote pri nižjih hitrostih obremenitve. Vizualizacija lokalnega sproščanja toplote toplotno prevodnih kovin ni izvedljiva za kvazistatično obremenitev. Med testi,



Slika 7.2: Najpogostejše metode preizkušanja mehanskih lastnosti celičnih metamaterialov

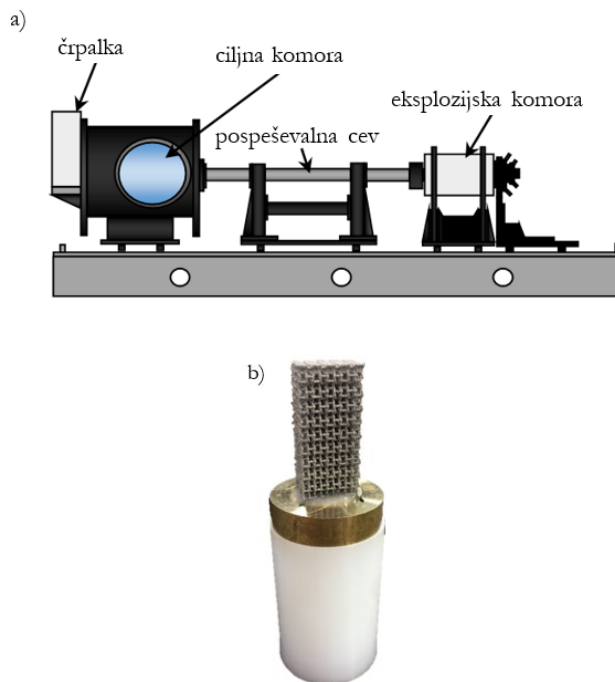
predstavljenimi v tem delu, je bila IR termografova spremljava izvedena s pomočjo srednjevalovne kamere za termično slikanje IR Flir SC 5000 (frekvenca slike 608 Hz z ohlajenim srednjevalovnim senzorjem InSb z občutljivostjo do 0,02 K).

Ko so potrebne višje udarne energije pri zmernih hitrostih udarca, se lahko za določitev mehanskega in deformacijskega vedenja metamaterialov uporabljajo naprave, ki izkoriščajo gravitacijski pospešek za pospešitev udarnega telesa (ang. *Drop Tower*) [86]. Za dinamično tlačno preizkušanje pri višjih hitrostih – nad 1000 s^{-1} , se lahko uporablja Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) ali njegove modificirane različice. Večina testov, predstavljenih tukaj, je bila izvedena z metodo Direct Impact Hopkinson Bar (DIHB), posebej zasnovano za dinamično karakterizacijo celičnih metamaterialov [32,33]. Naprava DIHB, modifikacija klasične naprave Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB), omogoča generiranje višjih deformacijskih hitrosti in udarnih energij v celičnih materialih. V tej eksperimentalni konfiguraciji je udarno telo s pomočjo stisnjenega plina pospešeno neposredno do vzorca. Ta neposredni udar omogoča neposredni prenos kinetične energije iz udarnega telesa na vzorec. Vendar pa omejen prostor znotraj pospeševalne cevi in deformacija, ki jo povzroči prehod udarnega telesa, otežujeta pripenjanje merilnih naprav na udarno telo.

V drugem sklopu testiranja pri visokih hitrostih obremenjevanja je bil uporabljen Taylorjev test na pripravi, katere sestavni deli so prikazani na sliki 7.3 a). Priprava je sestavljena iz eksplozijske in ciljne komore, med katerima je nameščena pospeševalna cev, ki jo od eksplozijske komore ločuje aluminijasta diafragma. V pospeševalni cevi je nameščen projektil, nanj pa je nameščen preizkušane (slika 7.3b). Projektil je nato pospešen zaradi eksplozije smodnika in potuje po pospeševalni cevi do ciljne komore, v kateri je z uporabo črpalke ustvarjen vakuum. V ciljni komori je na togo ploščo nameščen senzor tlaka (PVF2 11-125EK, Dynasen), ki izmeri povprečen tlak na merilni površini med procesom deformiranja preizkušanca.

Premer projektila znaša 40 mm, njegova masa pa znaša približno 180 g – odvisno od tega, kateri preizkušane je uporabljen. Glede na maso uporabljenega smodnika je možno doseči hitrosti projektila med 150 in 600 m/s.

V sklopu testiranja titanovih preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov je bilo izvedenih več kot 20 testov pri visokih hitrostih obremenjevanja.



Slika 7.3: Priprava za izvedbo Taylorjevega testa a) in projektil b)

Tipični proces deformiranja preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov je ob dinamičnem obremenjevanju pri visokih hitrostih prikazan na sliki 7.19. Slike procesa deformiranja so pridobljene s hitro kamero SHIMADZU HPV-1. Zaradi velikih deformacijskih hitrosti (tudi do 10000 s^{-1}) je bil dinamičen način deformacije materiala opažen pri vseh testiranih porznostih in geometrijah preizkušancev, pri čemer je bilo lokalizirano deformiranje na območju udarca preizkušanca v podporo opaženo tudi pri velikih deformacijah preizkušanca.

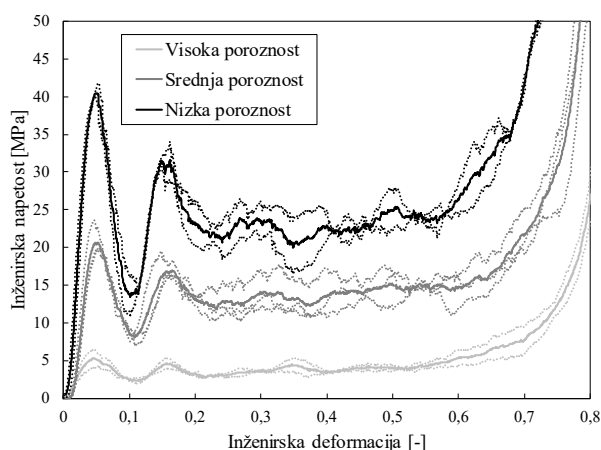
7.2.1 Kvizistatično obremenjevanje celičnih metamaterialov

7.2.1.1 Avksetične strukture iz obrnjenih tetrapodov

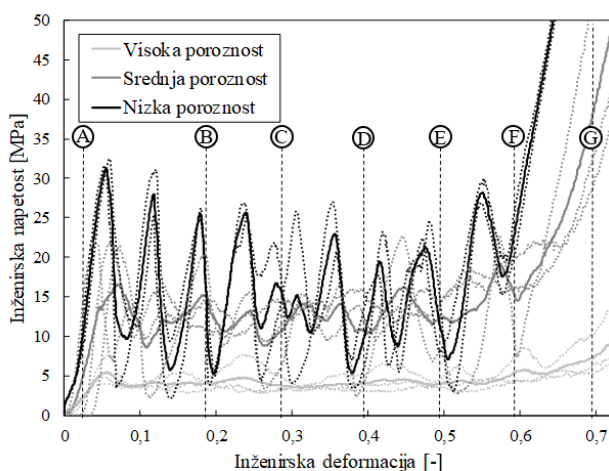
Kvizistatično testiranje avksetičnih struktur iz obrnjenih tetrapodov je bilo izvedeno na preizkuševalnem stroju INSTRON 8801 pri deformacijski hitrosti $0,005\text{ s}^{-1}$ (hitrost obremenjevanja $0,01\text{ mm/s}$). Strukture so bile testirane v dveh ortogonalnih smereh (X2 in X3), pri čemer je bil med

njima opažen zelo različen način deformiranja struktur. Poissonovo razmerje analiziranih avksetičnih celičnih struktur je podano v [55] in znaša do $-0,4$ v primeru obremenjevanja v smeri X3.

Deformacijsko obnašanje preizkušancev z različno poroznostjo je v primeru obremenjevanja v smeri X2 zelo podobno, kar je razvidno iz prikazanih odzivov na sliki 7.4. Kljub temu vrednost napetostnega platoja ni v linearnem odnosu s poroznostjo [63], kar je posledica večjega vpliva nepravilnosti pri proizvodnem procesu na strukture z manjšim polmerom medceličnih povezav kot na tiste z večjim premerom medceličnih povezav. Enako obnašanje je opaženo tudi pri obremenjevanju preizkušancev v smeri X3 (slika 7.5), kjer pa je opažena sprememba odziva pri različnih poroznostih.



Slika 7.4: Kvazistatično obremenjevanje kratkih preizkušancev v smeri X2

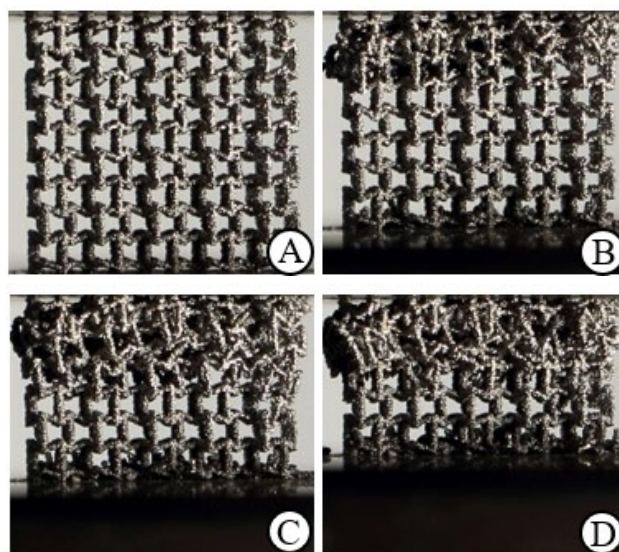


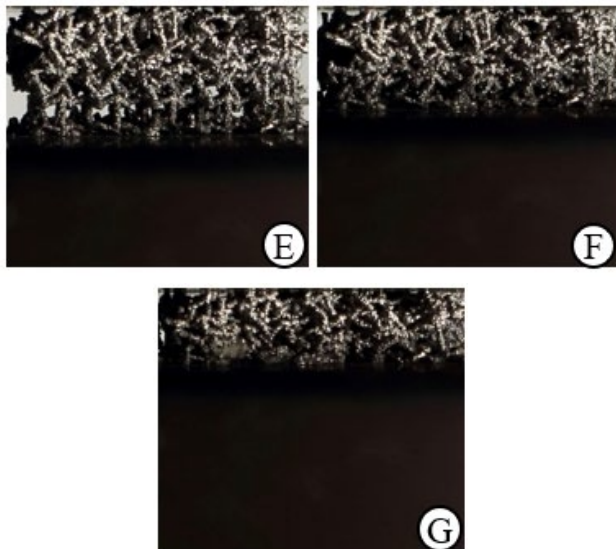
Slika 7.5: Kvazistatično obremenjevanje kratkih preizkušancev v smeri X3

V primeru tlačnega obremenjevanja v smeri X3 so bili opaženi zelo različni odzivi med različnimi poroznostmi avksetičnih struktur (slika 7.5). Strukture z nizko poroznostjo imajo značilno krhko porušitev po plasteh, kar je razvidno iz oscilacij na sliki 7.5. Za razliko od struktur z nizko poroznostjo se v primeru visoke poroznosti medcelične povezave porušijo že pri majhni obremenitvi, na kar vplivajo nepravilnosti pri proizvodnem procesu, ki so razvidne s slike 6.12. Potek deformiranja preizkušancev z visoko in nizko poroznostjo v smeri X3 je prikazan na slikah 7.6 in 7.7.

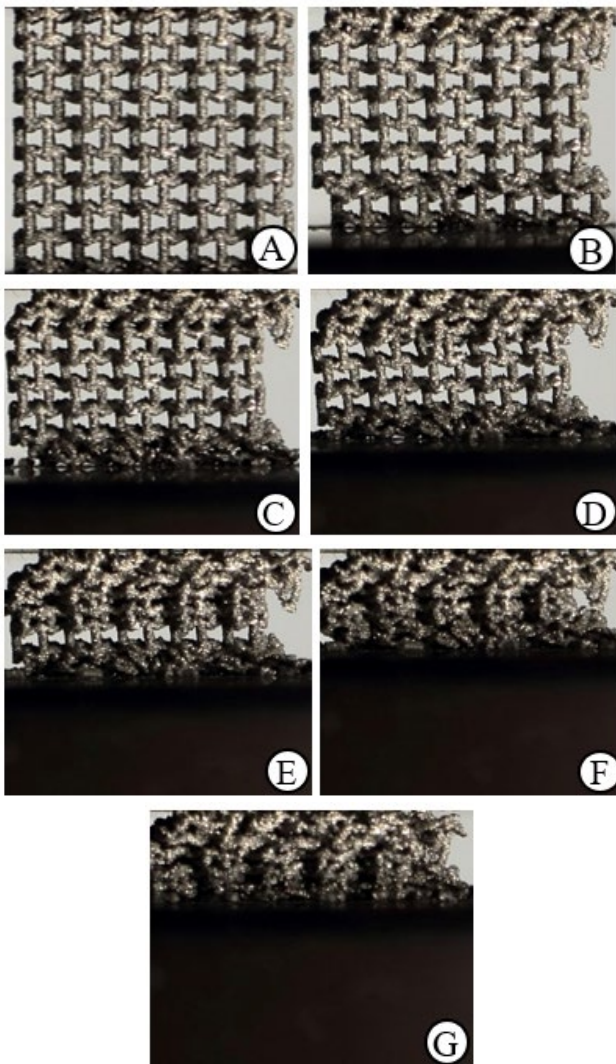
Primerjava med strukturami s srednjo in nizko poroznostjo pokaže, da se v obeh primerih pojavi porušitev v plasteh, vendar je ta veliko bolj izrazita v primerih struktur z nizko poroznostjo. Povprečna vrednost napetostnega platoja je iz tega razloga pri obeh podobna, vendar je začetna napetost tečenja v primeru struktur z nizko poroznostjo višja.

Kot je razvidno s slik 7.4–7.7, usmerjenost in poroznost avksetičnih celičnih struktur močno vplivata na mehanski odziv, kar je zelo pomembno za bodočo uporabo teh struktur kot samostojnih delov ali jeder kompozitnih struktur v različnih sodobnih konstrukcijah. Zaradi nepravilnosti pri izdelavi struktur, izdelanih z dodajalnimi tehnologijami, ne obstaja linearno razmerje med vrednostjo napetostnega platoja in poroznostjo (mehanski odzivi, normalizirani glede na maso struktur, niso enaki). Enako velja tudi za dolge preizkušance, kar je prikazano na sliki 7.8.

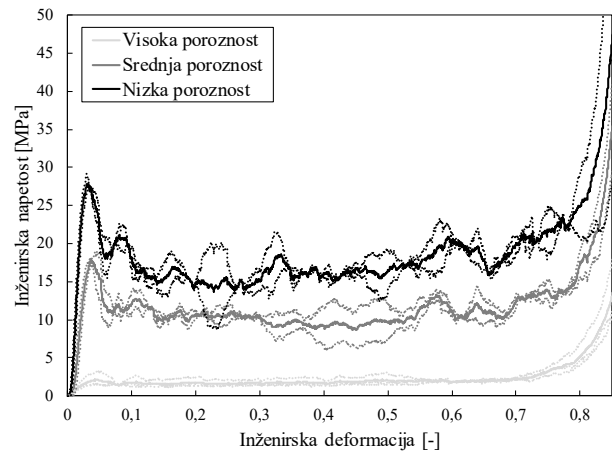




Slika 7.6: Odziv preizkušancev z visoko poroznostjo, obremenjenih v smeri X3.



Slika 7.7: Odziv preizkušancev z nizko poroznostjo, obremenjenih v smeri X3.



Slika 7.8: Kvizistatično obremenjevanje dolgih preizkušancev v smeri X2

Odziv dolgih preizkušancev na tlačno obremenitev je prikazan na sliki 7.8, kjer je razvidno, da je odziv zelo podoben tistemu pri kratkih preizkušancih (slika 7.4). Manjša razlika v vrednosti napetostnega platoja med kratkimi in dolgimi preizkušanci z nizko in srednjo poroznostjo (približno 10 MPa v primeru kratkih preizkušancev in 5 MPa v primeru dolgih preizkušancev) je posledica spremembe deformacijskega obnašanja in mehanizma porušitve, kar je bilo v nadaljevanju analizirano še z infrardečo (IR) termografijo in računalniškimi simulacijami.

Preglednica 7.1: Specifična absorpcijska energija in specifična togost avksetičnih struktur iz obrnjenih tetrapodov

Preizkušanec in smer obremenjevanja		SEA [J/g]	SS [MPa/g]
visoka poroznost	kratki preizkušanci X2	5,19	2,23
	kratki preizkušanci X3	5,60	2,28
	dolgi preizkušanci X2	2,57	0,45
srednja poroznost	kratki preizkušanci X2	12,94	5,99
	kratki preizkušanci X3	11,95	4,80
	dolgi preizkušanci X2	10,25	2,46
nizka poroznost	kratki preizkušanci X2	18,13	9,35
	kratki preizkušanci X3	12,21	7,19
	dolgi preizkušanci X2	13,45	3,08

Eksperimentalni rezultati so bili dodatno analizirani na podlagi izračuna specifične absorpcijske energije (ang. *Specific Energy Absorption* – SEA) in specifične togosti

(ang. *Specific Strength* – SS), ki sta bili izračunani z uporabo enačb 7.4 in 7.5.

Kot je možno opaziti v preglednici 7.1, imajo preizkušanci z visoko poroznostjo opazno manjše vrednosti SEA in SS v primerjavi s preizkušanci s srednjo in nizko poroznostjo, kar lahko predstavimo tudi kot mejni primer za upravičenost uporabe teh struktur v sodobnih naprednih konstrukcijah. Avksetični preizkušanci s srednjo in nizko poroznostjo imajo na podlagi SEA in SS boljšo učinkovitost glede na maso, ko so obremenjeni v smeri X2 (porušitev v strižnih ravninah – slika 7.18), kot preizkušanci, obremenjeni v smeri X3 (porušitev po plasteh – slika 7.7). Spremenjen način deformacije povzroči znižanje vrednosti SEA in SS za dolge preizkušance v primerjavi s kratkimi preizkušanci v vseh analiziranih primerih.

Kot je razvidno, so mehanske lastnosti v dveh smereh obremenjevanja zelo različne, kar rezultira v ortotropnem materialu, pri katerem je treba biti zelo pazljiv pri njegovem umeščanju v končni izdelek in tudi osnovni material v takšni strukturi ni optimalno izkoriščen.

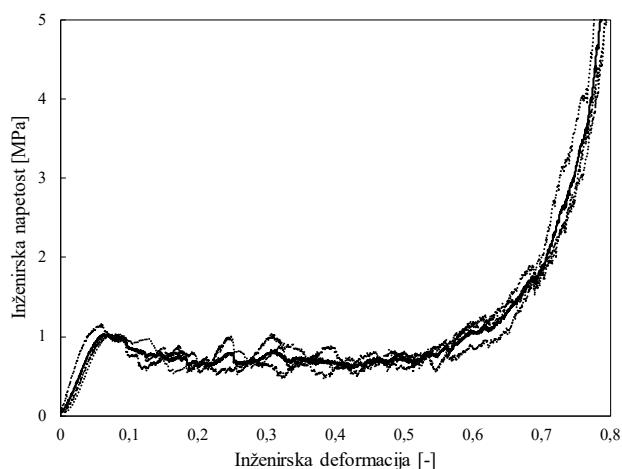
7.2.1.2 Kiralne avksetične strukture

Kot je bilo v predhodnem poglavju natančno predstavljeno, se pri avksetičnih strukturah iz obrnjenih tetrapodov pojavi izrazita lokalizirana porušitev medceličnih povezav, ki je posledica koncentracij napetosti v vozliščih, ki povezujejo medcelične povezave in ortotropnost. Veliko medceličnih povezav je usmerjenih tudi v smeri obremenjevanja, kar vodi do nekontroliranega uklona medceličnih povezav. Velik vpliv ima tudi to, da je usmerjenost medceličnih povezav, ki se stikajo v teh vozliščih, zelo različna. V sklopu razvoja novih geometrij avksetičnih struktur je

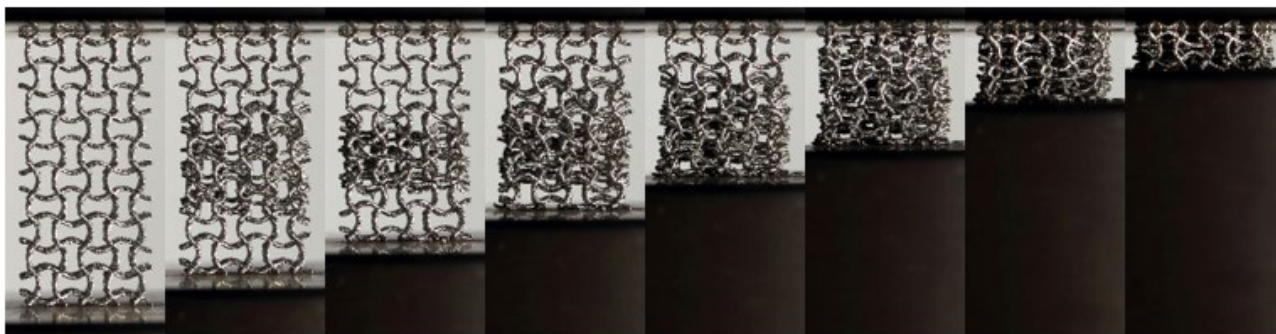
bila razvita kiralna avksetična struktura, katere medcelične povezave so ukrivljene, kar povzroči vnaprej predvideno deformacijo, ob tem pa se medcelične povezave v vozliščih stikajo pod bolj ugodnimi koti in zmanjšujejo koncentracije napetosti.

Kiralne avksetične celične strukture, izdelane iz titana in bakra, so bile preizkušene na enak način, kot so bile preizkušene avksetične strukture iz obrnjenih tetrapodov v predhodnem poglavju. Analiza Poissonovega razmerja kiralnih avksetičnih celičnih struktur je podana v [87], kjer je podana vrednost Poissonovega razmerja $-0,19$.

Preizkušanci iz titana so imeli za razliko od preizkušancev iz bakra, prikazanih na sliki 6.4, v prerezu 4×4 osnovne celice, kar pa ne vpliva na inženirske vrednosti napetosti in deformacij, kar je bilo pred izdelavo preizkušancev potrjeno s parametrično študijo z računalniškimi simulacijami. Rezultati eksperimentalnega testiranja pri kvazistatičnih pogojih obremenjevanja so prikazani na sliki 7.9.



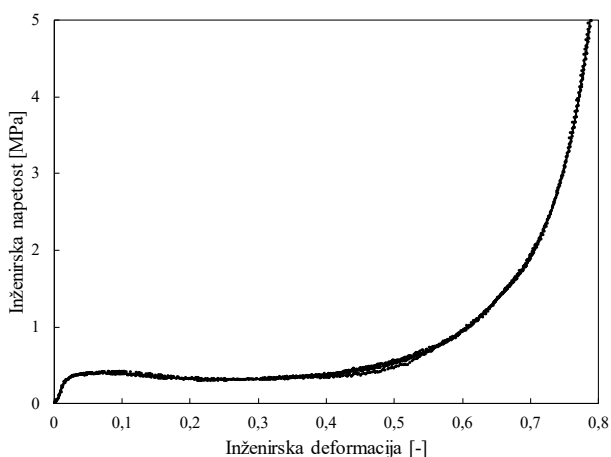
Slika 7.9: Kvazistatično obremenjevanje kiralnih preizkušancev iz titana



Slika 7.10: Potek deformacije kiralnih preizkušancev, izdelanih iz titana.

Na sliki 7.10 je prikazan proces deformacije kiralnih avksetičnih preizkušancev iz titana. Razviden je potek deformacije v posameznih plasteh, ki so posledica globalnega uklona preizkušanca v smeri prečno na pogled, prikazan na sliki 7.10.

V nadaljevanju je prikazan tudi mehanski odziv kiralnih avksetičnih struktur, izdelanih iz bakra, slika 7.11. Deformacijski odziv bakrenih preizkušancev je zelo podoben odzivu preizkušancev iz titana, vendar je zaradi debelejših medceličnih povezav vpliv uklona še večji.



Slika 7.11: Kvazistatično obremenjevanje kiralnih preizkušancev iz bakra

Preglednica 7.2: Specifična absorpcijska energija in specifična togost kiralnih struktur

Osnovni material struktur	SEA [J/g]	SS [MPa/g]
titan	6,63	0,186
baker	0,40	0,013

V primeru kiralnih struktur je bila specifična absorpcijska energija (preglednica 7.2) izračunana do 60 % deformacije. Kot je razvidno iz preglednice 7.2, imajo kiralne strukture iz titana veliko višjo specifično absorpcijsko energijo in specifično togost kot kiralne strukture iz bakra. Kiralne strukture pa imajo v splošnem manjše vrednosti SEA in SS kot strukture iz obrnjenih tetrapodov (preglednici 7.1 in 7.2), kar je lahko posledica tudi tega, da je poroznost kiralnih struktur precej večja v primerjavi s poroznostjo struktur iz obrnjenih tetrapodov (preglednici 6.1 in 6.2).

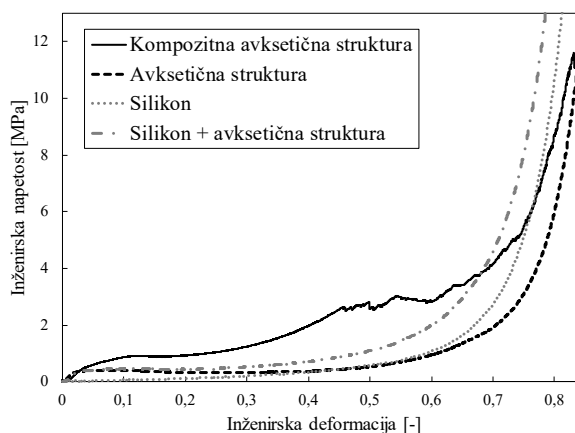
Z namenom izboljšanja mehanskih lastnosti avksetičnih celičnih struktur, predvsem absorpcije energije, so bile

izdelane tudi kompozitne avksetične celične strukture, ki so bile sestavljene iz bakrenih avksetičnih struktur in silikona (TEKASIL 2K Z010; TKK, d. o. o.). Oblivanje avksetičnih struktur s silikonom je bilo izvedeno v vakuumu, kar je preprečilo formiranje zračnih mehurčkov znotraj kompozitnih struktur, kar je razvidno tudi s slike 7.12.



Slika 7.12: Kompozitna kiralna avksetična struktura

Kvazistatični tlačni odziv kompozitnih kiralnih struktur je prikazan na sliki 7.13. Odziv kompozitnih struktur je primerjan z odzivom avksetične strukture, silikona in seštevka odzivov avksetične strukture ter silikona. Kot je razvidno iz rezultatov eksperimentov na sliki 7.13, uporaba kompozitnih avksetičnih struktur bistveno izboljša mehanski odziv v primerjavi s seštevkom odzivov avksetične strukture in silikona z enako maso kot kompozitna avksetična struktura. To je posledica vzajemnega delovanja silikona in avksetične strukture, kjer silikon ponuja podporo avksetičnim celičnim strukturam, katerih medcelične povezave se v tem primeru zlomijo šele pri večjih deformacijah.



Slika 7.13: Kvazistatično obremenjevanje kompozitnih kiralnih avksetičnih struktur

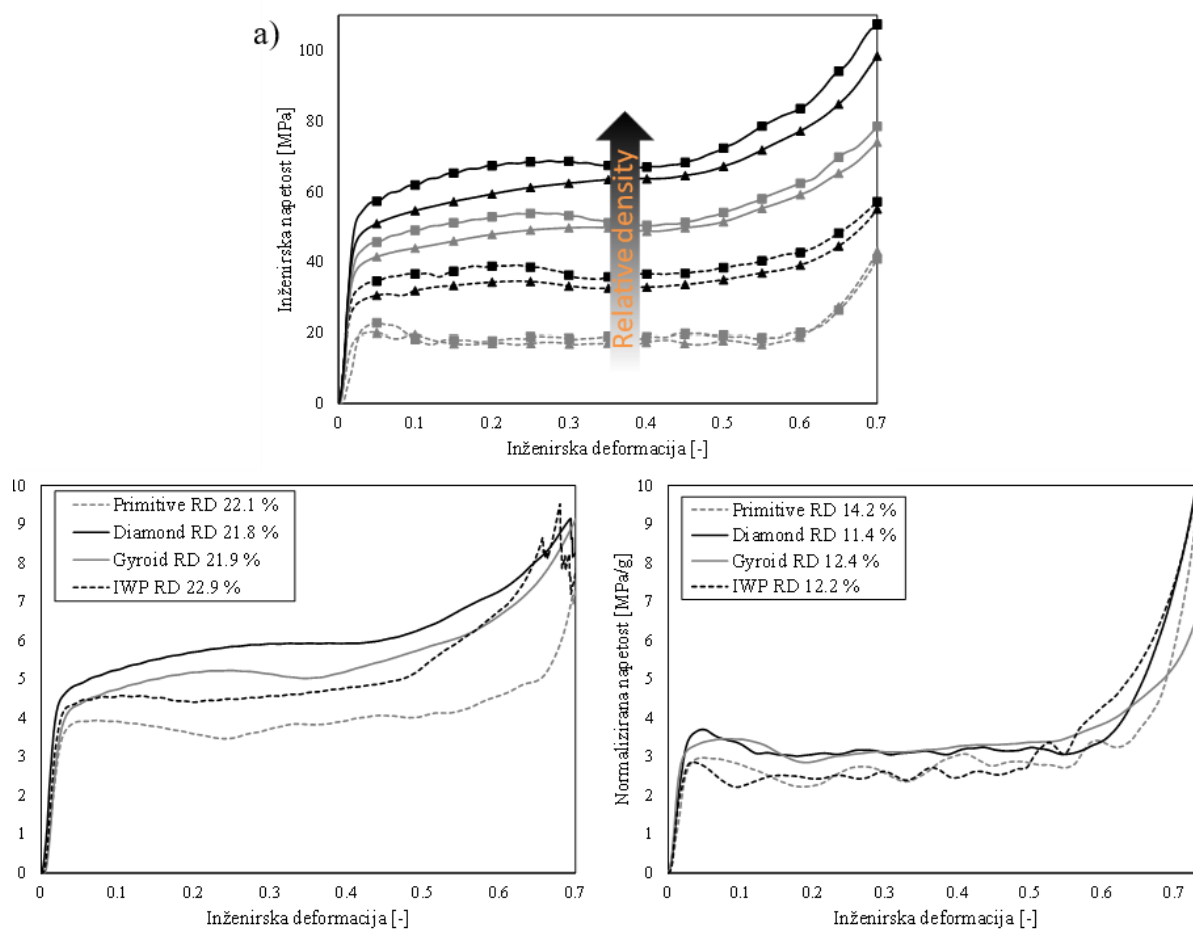
Za razliko od avksetičnih struktur, zgrajenih iz obrnjenih tetrapodov, kiralne avksetične strukture izkazujejo enake mehanske lastnosti v vseh treh oseh koordinatnega sistema, kar izboljša njihovo uporabnost. A še vedno obstajajo druge smeri obremenjevanja, kjer ne moremo predpostaviti mehanskega odziva brez natančne eksperimentalne ali računalniške študije.

7.2.1.3 Strukture TPMS

Kljub izboljšanju deformacijskih in mehanskih odzivov v primeru kiralnih struktur napram strukturam, zgrajenih iz obrnjenih tetrapodov, še vedno lahko opazimo določene lokalne porušitve kiralnih struktur, koncentracije napetosti pri stikih medceličnih povezav in ortotropne mehanske lastnosti. Temu se lahko delno izognemo s kompozitnimi strukturami, napolnjenimi s silikonom, ali pa spremenimo geometrijo metamateriala z uvedbo površin namesto medceličnih povezav, kar nam omogočajo strukture

TPMS. Mehanski odzivi vseh analiziranih struktur TPMS so prikazani na sliki 7.14. Prikazane so le povprečne vrednosti za vsako skupino vzorcev, saj je bila razlika v odzivih zanemarljiva. Dobra ponovljivost rezultatov je potrjena z vrednostmi standardne deviacije za napetost platoja in SEA. Tipičen mehanski odziv celičnih struktur je opazen v vseh analiziranih skupinah vzorcev, kjer začetnemu elastičnemu območju sledi napetostni plato in končno zgoščevanje strukture. Odzivi kažejo gladek prehod iz elastične v plastično regijo za vse vzorce, kar je značilnost površinskih struktur TPMS. Poleg tega vzorci kažejo raven in rahlo progresiven napetostni plato, kar je značilnost učinkovitih absorberjev energije [88].

Kvazistatično in dinamično deformacijsko obnašanje vsake skupine vzorcev je bilo analizirano s pomočjo posnetkov s kamero (QS-obremenjevanje, definirano na sliki 7.2) in IR-termografije (DYN obremenjevanje, definirano na sliki 7.2). Opaziti je, da je deformacijsko obnašanje pri QS- in DYN-preizkusih enako za vse



Slika 7.14: Mehanski odzivi različnih struktur TPMS (a) Diamond, b) Gyroid, c) IWP in d) Primitive) pri kvazistatičnem 0,1 mm/s (trikotniki) in dinamičnem 284 mm/s (štirikotniki) obremenjevanju

analizirane vzorce. Utrjevanje pri višjih hitrostih deformacije, opaženo v mehanskih odzivih (slika 7.14), je posledica utrjevanja osnovnega materiala in ne spremenjenega načina deformacije, ki ga povzroči vztrajnost pri višjih hitrostih deformacije [90], [91].

Deformacijski način vzorcev z nizko in visoko relativno gostoto v primeru vzorcev Primitive TPMS je primerljiv. V primeru diamantnih vzorcev se deformacija lokalizira na območju premikajoče plosče pri vzorcih z nižjo relativno gostoto, medtem ko je deformacija bolj enotna pri vzorcih z višjo relativno gostoto. Podobno je opaziti v primeru IWP in Gyroid vzorcev, kjer se strižna ravnina (IWP)/lokalna deformacija (Gyroid) oblikuje pri nižjih relativnih gostotah, medtem ko je pri vzorcih z višjimi relativnimi gostotami opaziti enotno deformacijo. Sprememba načina deformacije in manjši vpliv proizvodnje na mehanske lastnosti pri manj poroznih strukturah prav tako pripomoreta k boljši normalizirani mehanski učinkovitosti vzorcev z višjimi relativnimi gostotami, kar je opaziti v vrednostih SEA (slika 7.39).

Omeniti je treba, da so mehanske lastnosti, pridobljene v tem delu za površinske TPMS strukture, bistveno višje od tistih, ki so jih pridobili Cao et al. [92] za strukture, temelječe na medceličnih povezavah. Mehanske lastnosti so prav tako višje v primerjavi z nekaterimi avksetičnimi strukturami, temelječimi na medceličnih povezavah, izdelanimi iz titana [70] in bakra [91], kjer so bile uporabljene iste hitrosti obremenitve kot v tej raziskavi, in ni bilo opaženo utrjevanje pri večjih deformacijskih hitrostih.

7.2.2 Obremenjevanje pri višjih hitrostih

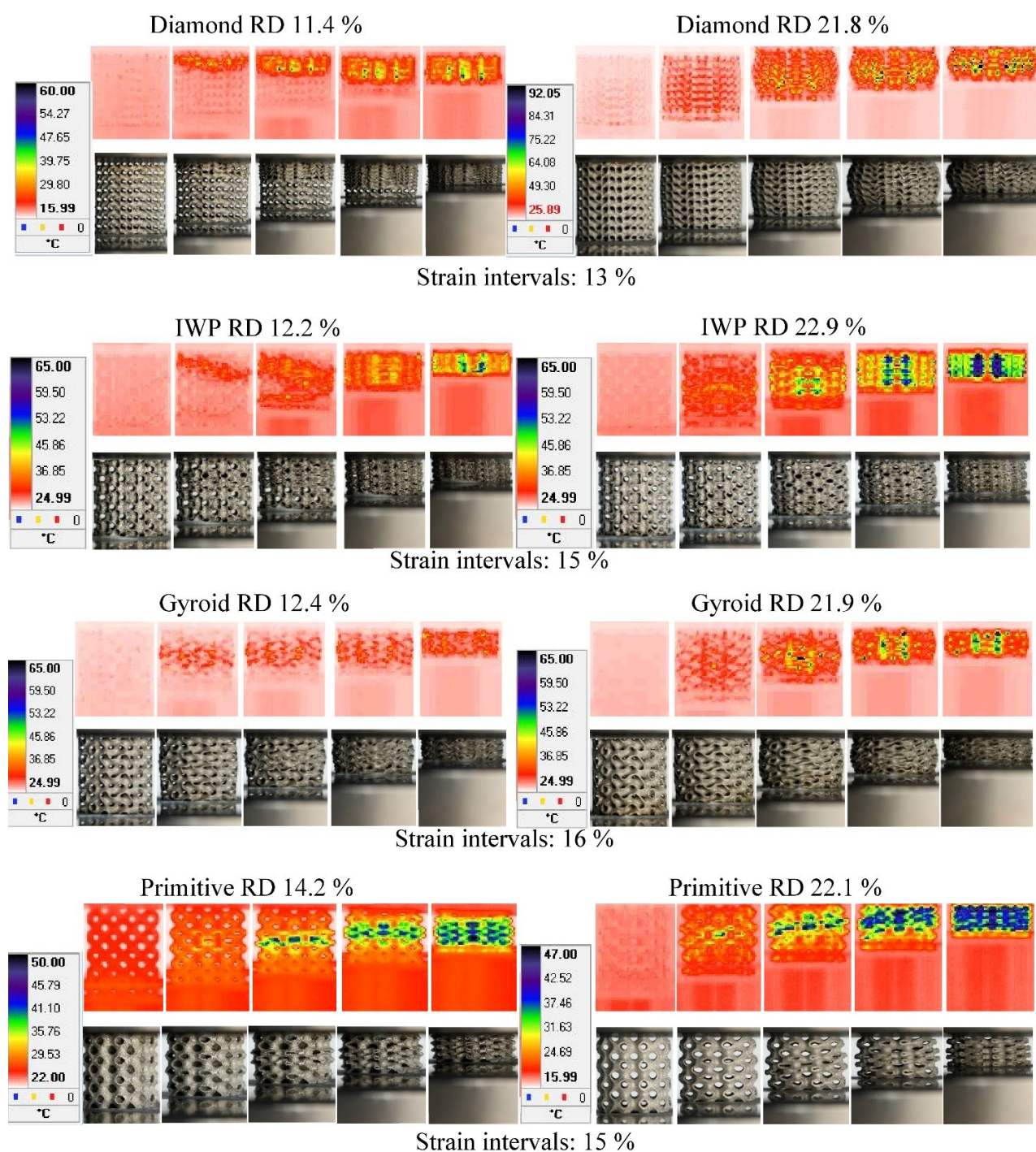
Deformacijsko obnašanje materialov pri različnih hitrostih deformacije je mogoče razvrstiti v tri načine: homogeni, prehodni in visokohitrostni način, kot je prikazano na sliki 7.2 [93]. V homogenem načinu so učinki vztrajnosti zanemarljivi, deformacija in porušitev se začneta na najšibkejšem delu strukture in se večinoma pojavita kot strižne ravnine. Pri naraščajočih hitrostih obremenitve začnejo učinki vztrajnosti prevladovati v odzivu. V visokohitrostnem načinu je opaziti le omejeno prečno deformiranje strukture na območju udarnega deformacijskega sprednjega roba, ne glede na položaj najšibkejšega dela strukture.

Visokohitrostni odziv se kaže v prehodnem načinu pri manjših deformacijah, medtem ko se homogen način pojavi pri večjih deformacijah.

Pri analizi utrjevanja s hitrostjo deformacije v celičnih metamaterialih je eden najpomembnejših kazalcev kritična hitrost, pri kateri se način deformacije spremeni v visoko-hitrostni način, kar povzroči izjemno togost pri visokih hitrostih deformacije [94] zaradi učinkov vztrajnosti, povezanih z dinamično lokalizacijo stiskanja pri hitrostih deformacije, ki presegajo kritične vrednosti hitrosti deformacije [90]. Analiza kritičnih hitrosti, pri katerih se način deformacije spremeni, je ključnega pomena za uporabo celičnih metamaterialov. Zlasti ker jih je mogoče uporabiti kot absorberje trkov in udarcev v mnogih sodobnih kompozitnih konstrukcijah in zaradi njihovega posebnega deformacijskega obnašanja z dolgim območjem napetostnega platoja, ki omogoča absorpcijo znatne količine mehanske energije. Številni konstitutivni modeli za tlačno obremenjevanje se lahko uporabijo za opis dinamične deformacije celičnih (poroznih) materialov, kot je prikazano v [94]. Za to raziskavo je bil uporabljen model Rigid Power Law Hardening (R-PLH), ker zagotavlja natančno oceno napetosti, ki nastanejo pri obremenjevanju do zgoščevanja. Model Rigid Power Law Hardening (R-PLH) je konstitutivni model, ki se uporablja za opis obnašanja celičnih materialov pod dinamičnimi obremenitvami. Temelji na predpostavki, da se material utrjuje po potenčnem zakonu s konstanto občutljivostjo na hitrost deformacije. Kritične hitrosti za nekatere izbrane celične strukture so prikazane na sliki 7.16.

Primerjava kritičnih hitrosti na sliki 7.16 kaže, da se kritične hitrosti na splošno povečujejo z zmanjšanjem poroznosti, tj. povečana gostota metamateriala povzroči višje kritične hitrosti.

Za določitev vpliva hitrosti deformiranja na mehanski odziv pri tlačnem obremenjevanju so bili preizkušanci preizkušeni tudi pri dinamični obremenitvi (hitrost obremenjevanja 284 mm/s – dosežena deformacijska hitrost 14,8 s⁻¹) na preizkuševalnem stroju INSTRON 8801. Takšna hitrost obremenjevanja je omogočala tudi natančno analizo poteka deformiranja s pomočjo IR-termografije.



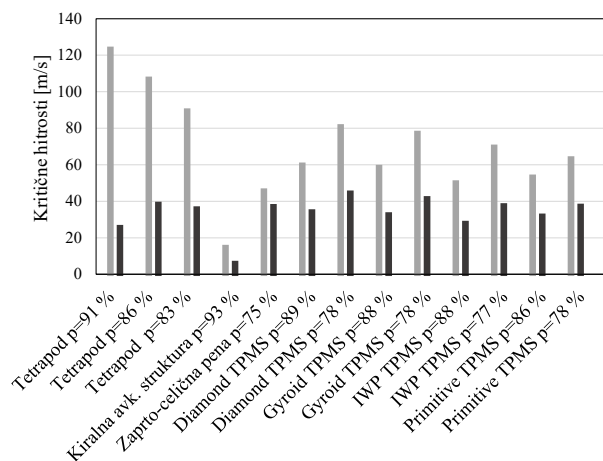
Slika 7.15: Mehanski odzivi različnih struktur TPMS (korak deformacije: 15 %)

Vpliv hitrosti deformiranja je bil analiziran pri vseh preizkušancih, vendar je bil največji vpliv hitrosti deformiranja na mehanski odziv pričakovati v primeru preizkušancev z najnižjo poroznostjo, saj imajo največjo vztrajnost, ki lahko povzroči spremembo v načinu deformacije. Kot je razvidno s slike 7.17, ni bistvene razlike med povprečnim kvazistatičnim in dinamičnim odzivom pri analiziranih deformacijskih hitrostih.

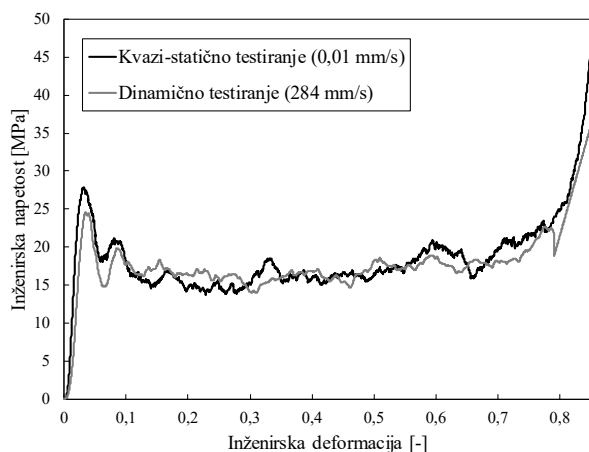
V nadaljevanju je bil na osnovi IR-termografije analiziran tudi način deformiranja, kar omogoča bolj natančen vpogled v proces razvoja plastične deformacije in deformiranja (slika 7.18).

Tipični proces deformiranja preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov je ob dinamičnem obremenjevanju pri visokih hitrostih prikazan na sliki 7.19. Slike procesa deformiranja so pridobljene s hitro kamero SHIMADZU HPV-1. Zaradi velikih deformacijskih hitrosti do 10000 s^{-1} je bil dinamičen način deformacije

materiala opažen pri vseh testiranih poroznostih in geometrijah preizkušancev, pri čemer je bilo lokalizirano deformiranje na območju udarca preizkušanca v podporo opaženo tudi do velikih vrednosti deformacije preizkušanca.



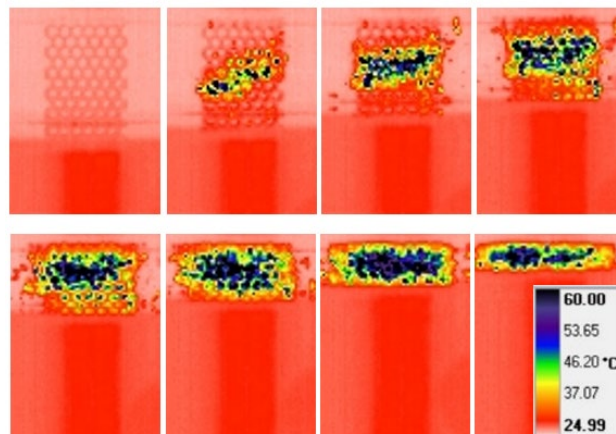
Slika 7.16: Primerjava prvih (črna) in drugih (siva) kritičnih hitrosti različnih celičnih metamaterialov z različnimi poroznostmi



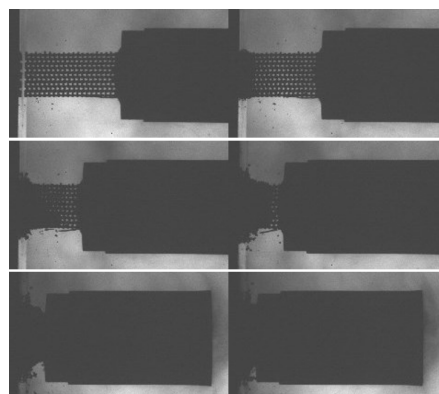
Slika 7.17: Primerjava povprečnih kvazistatičnih in dinamičnih odzivov dolgih preizkušancev z nizko poroznostjo

Mehanski odziv avksetičnih preizkušancev je bil ovrednoten z merjenjem povprečnega tlaka (napetosti), ki ga povzroči preizkušalec na vpenjalno pripravo, kjer je nameščen merilec tlaka. Tlačni signal je bil z namenom odstranitve visokofrekvenčnih šumov in oscilacij filtriran z uporabo filtra z desetimi podatkovnimi točkami, ki je vgrajen v programu MS Excel. Tipični odziv celičnih struktur pri tlačni obremenitvi (napetostni plato in zgoščevanje) je lahko

opažen v vseh analiziranih primerih, ki so prikazani na sliki 7.20.

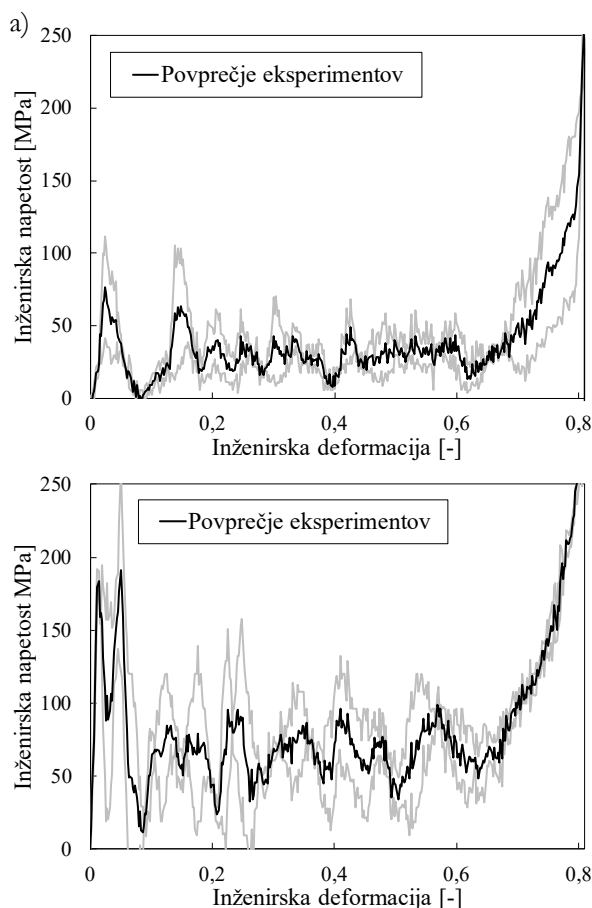


Slika 7.18: Razvoj območja plastične deformacije v kratkih preizkušancih iz obrnjenih tetrapodov pri dinamičnem obremenjevanju v smeri X2 (korak deformacije: 10 %)



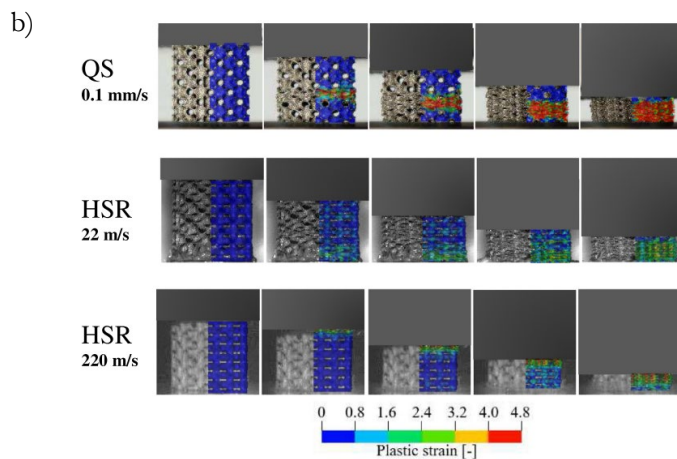
Slika 7.19: Proces deformiranja preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov s srednjo poroznostjo (korak deformacije: 10 %) [95]

Za celoten mehanski odziv je začetna oscilacija, ki jo lahko opazimo v vseh odzivih preizkušancev (slika 7.20) in je posledica visoke hitrosti ob trku v oviro (izmerjena vrednost v tlačnem senzorju), nepomembna in bi jo lahko z naprednejšimi filtri tudi izločili iz odziva. Kot pričakovano se med vzorci z različnimi relativnimi gostotami razlikujejo predvsem vrednosti napetostnega platoja, ki znaša približno 80 MPa v primeru preizkušancev z nizko poroznostjo, 70 MPa s srednjo in 50 MPa z visoko poroznostjo. Razlika v poroznosti vpliva tudi na deformacijo zgoščevanja, ki je $\sim 0,75$ pri preizkušancih z nizko poroznostjo in $\sim 0,82$ pri preizkušancih s srednjo in visoko poroznostjo.



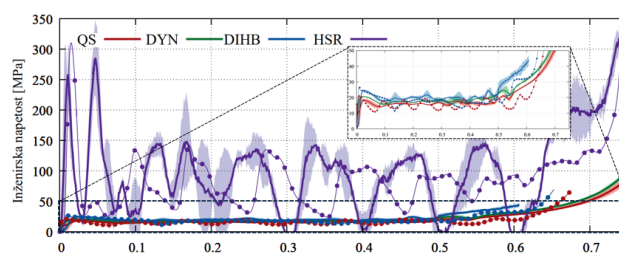
Slika 7.20: Eksperimentalni rezultati kratkih preizkušancev iz obrnjenih tetrapodov pri visokih hitrostih obremenjevanja: a) visoka poroznost, b) srednja poroznost

Vpliv povišane hitrosti obremenjevanja na deformacijski odziv pri eksperimentalnem testiranju izbranih TPMS-metamaterialov je prikazan na sliki 7.21. Deformacijski odziv struktur IWP se razlikuje pri testiranju QS in DIHB (slika 7.21). V primeru kvazistatične obremenitve pride do lokalizirane porušitve na sredini vzorca, kjer ima material čas, da reagira in odpove v najšibkejši plasti z največ izdelovalnimi napakami. Deformacija je bolj enakomerno porazdeljena v primeru DIHB-obremenjevanja, kar kaže na začetek vpliva mikroinercije pri povečani hitrosti deformacije. Ta sprememba načina deformacije zaradi učinkov vztrajnosti vpliva tudi na mehanski odziv in povzroči bolj izrazito utrjevanje. Deformacija v primeru HSR obremenjevanja je lokalizirana na strani udarca, kar povzroči značilno utrjevanje zaradi povišanja deformacijske hitrosti.

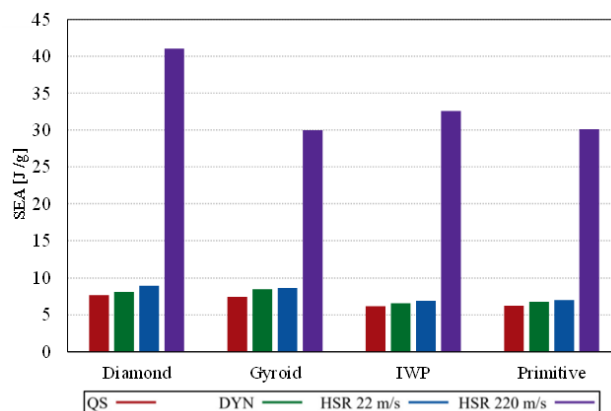


Slika 7.21: Deformacijski odziv IWP-struktur pri eksperimentu in računalniških simulacijah pri različnih hitrostih obremenjevanja

Mehanski odzivi IWP-strukture pri različnih hitrostih obremenjevanja so prikazani na sliki 7.22, kjer je opazno znatno utrjevanje ob zviševanju hitrosti obremenjevanja.

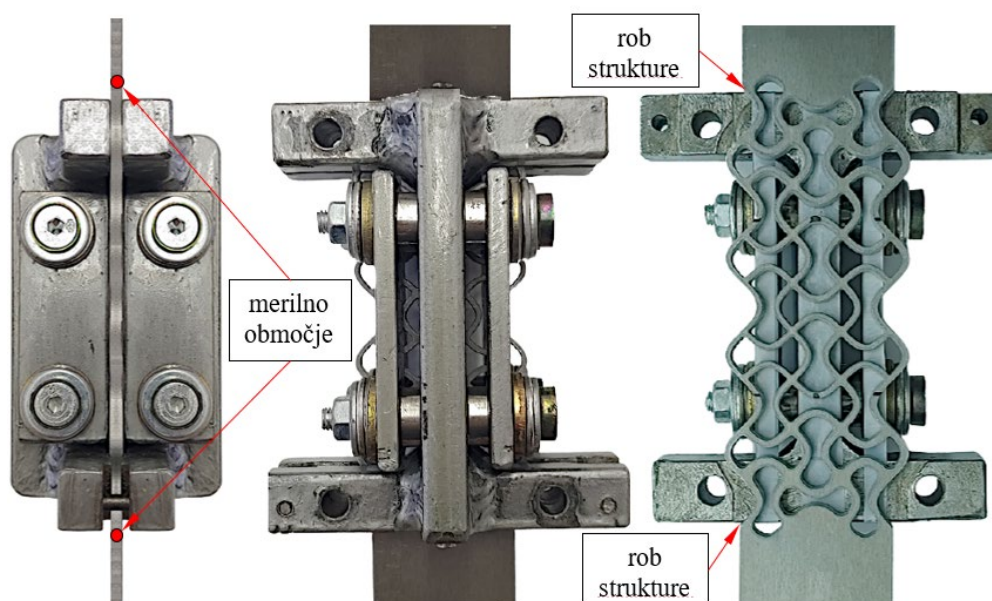


Slika 7.22: Mehanski odziv IWP-struktur pri eksperimentu (polne črte) in računalniških simulacijah (črte s pikami) pri različnih hitrostih obremenjevanja



Slika 7.23: Vrednosti SEA različnih struktur TPMS pri različnih hitrostih obremenjevanja

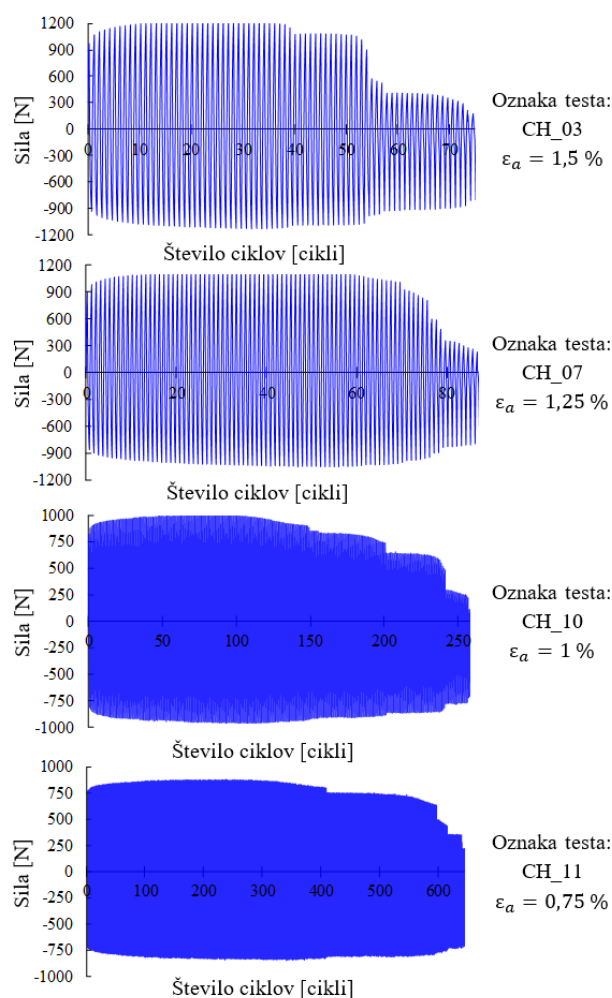
Ovrednotenje utrjevanja pri višjih hitrostih deformacije različnih struktur TPMS je bilo izvedeno na podlagi primerjave SEA. To je pokazalo, da je v primerih



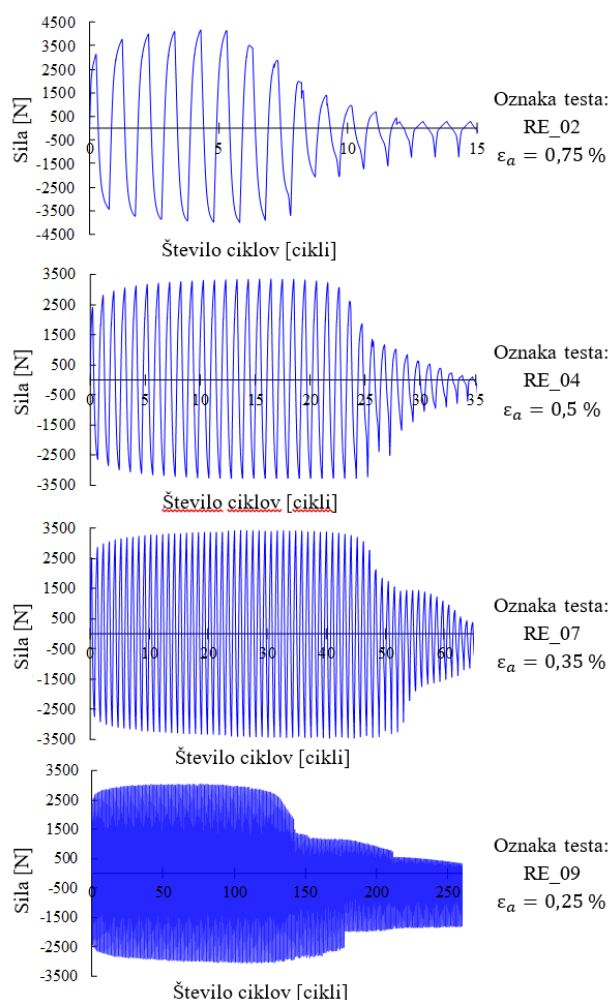
Slika 7.27: Protiuklonska priprava [72]

Na sliki 7.27 je prikazana protiuklonska priprava, ki je bila prilagojena glede na geometrijo kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture. Z namenom zmanjšanja trenja med kontaktnimi površinami protiuklonske priprave in vzorcem je bila uporabljena PTFE-folija debeline 0,1 mm. Podrobnejši opis omenjene priprave je podan v [96]. Dinamični testi avksetičnih vzorcev so bili izvedeni na različnih ravneh amplitudne deformacije s kontrolo deformacije pri $R = -1$. Pomik vzorca, katerega potek je bil določen s sinusno funkcijo, je bil nadzorovan z optičnim ekstenziometrom med dvema točkama na bočni strani vzorca, kot je prikazano na sliki 7.27. Z namenom enake izvedbe testov in nadaljnje neposredne primerjave rezultatov sta bili merilni točki v obeh geometrijskih primerih locirani na bočni strani, in sicer za 4 mm oddaljeni od roba strukture vzdolž vertikalne smeri.

Dinamični testi so bili izvedeni s kontrolo deformacije na različnih ravneh amplitudne deformacije. V eksperimentalnem testiranju je bila življenjska doba kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture določena z odpovedjo ene izmed celičnih povezav. Odpovedi celičnih povezav avksetičnih struktur so razvidne iz eksperimentalnega odziva sile v odvisnosti od števila ciklov. Nekaj primerov eksperimentalnih odzivov kiralne avksetične strukture je prikazanih na sliki 7.28, vbočene šestkotne avksetične strukture pa na sliki 7.29.



Slika 7.28: Eksperimentalni odzivi kiralne avksetične strukture [72]



Slika 7.29: Eksperimentalni odzivi vbočene šestkotne avksetične strukture [72]

Iz eksperimentalnih odzivov, prikazanih na slikah 7.28 in 7.29, je razvidno izrazito zmanjšanje togosti vzorca ob pretrgu ene izmed celičnih povezav, kar povzroči nefunkcionalnost analizirane strukture. Na podlagi tega je bilo privzeto, da je življenjska doba kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture določena s prvo odpovedjo celične povezave. Iz eksperimentalnih odzivov kiralne avksetične strukture je razvidno postopno odpovedovanje celičnih povezav, medtem ko pri vbočeni šestkotni avksetični strukturi več celičnih povezav odpove sočasno. V vseh avksetičnih vzorcih se je odpoved povezav zgodila v osrednjem delu vzorca. Na sliki 7.30 so označena mesta odpovedi celičnih povezav kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture, ki so bila enaka ne glede na raven amplitudne deformacije, pri kateri je bil izveden eksperimentalni test.



Slika 7.30: Mesta odpovedi celičnih povezav
a) kiralna struktura, b) vbočena šestkotna struktura [72]

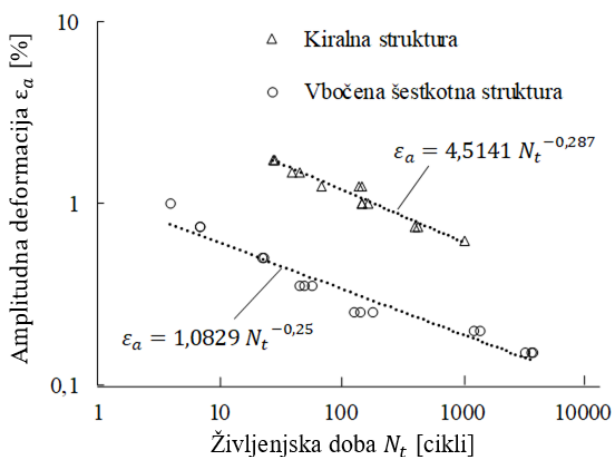
Pri dinamičnem testiranju kiralne avksetične strukture je bilo privzetih šest ravni amplitudnih deformacij, pri vbočeni šestkotni avksetični strukturi pa sedem ravni amplitudnih deformacij. Na vsaki amplitudni ravni sta bila izvedena vsaj dva dinamična testa. Delni eksperimentalni rezultati kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture so zbrani in predstavljeni v preglednici 7.3.

Preglednica 7.3: Delni eksperimentalni rezultati kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture

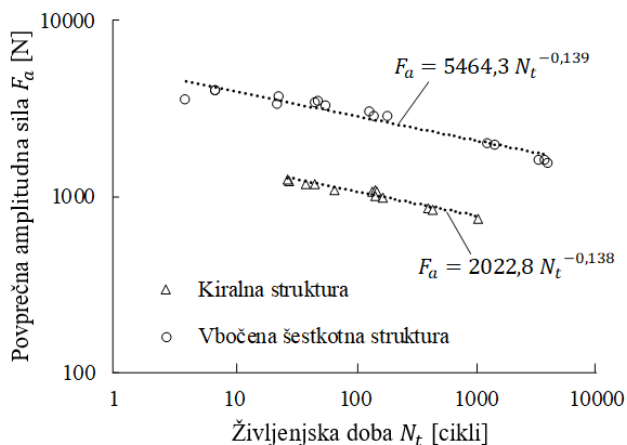
Oznaka testa	Povprečna amplitudna deformacija ϵ_a [%]	Povprečna amplitudna sila F_a [N]	Povprečna energija na cikel Δw [mJ]	Življenjska doba N_t [cikli]
CH_01	1,75	1238,5	3010,4	29
CH_02	1,50	1189,4	2234,0	40
CH_03	1,25	1066,9	946,3	143
CH_04	1,00	1080,5	601,2	153
CH_05	0,75	868,1	176,3	413
CH_06	0,63	744,2	81,1	1076
RE_01	1,00	3585,0	9118,9	4
RE_02	0,75	4017,1	7273,8	7
RE_03	0,50	3356,4	2756,4	23
RE_04	0,35	3347,7	1277,0	59
RE_05	0,25	3067,8	578,5	133
RE_06	0,20	1995,1	10,2	1453

V preglednici 7.3 so podani eksperimentalni rezultati življenjske dobe avksetičnih vzorcev (N_t), povprečne deformacijske energije stabilnih histereznih zank (Δw) in povprečne amplitudne sile stabilnih histereznih zank (F_a). Zaradi različnih togosti vzorcev so bili eksperimentalni rezultati predstavljeni v treh različnih oblikah vzdržljivostnih krivulj:

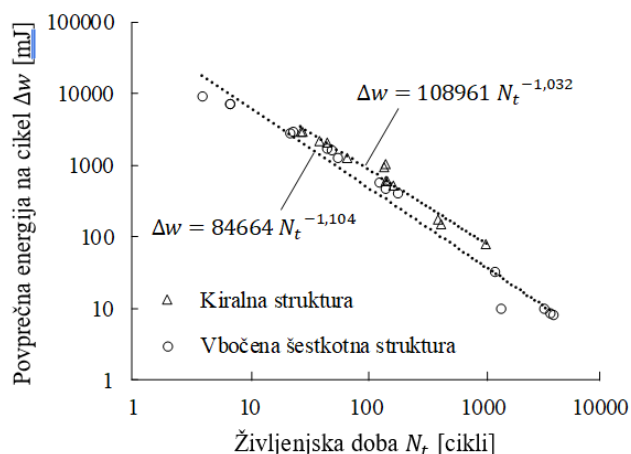
- vzdržljivostna krivulja $\varepsilon_a - N_t$ na sliki 7.31, ki predstavlja odvisnost amplitudne deformacije (ε_a) od števila ciklov do odpovedi vzorca (N_t),
- vzdržljivostna krivulja $F_a - N_t$ na sliki 7.32, ki predstavlja odvisnost amplitudne sile (F_a) od števila ciklov do odpovedi vzorca (N_t), in
- vzdržljivostna krivulja $\Delta w - N_t$ na sliki 7.33, ki predstavlja odvisnost povprečne deformacijske energije na cikel (Δw) od števila ciklov do odpovedi vzorca (N_t).



Slika 7.31: Vzdržljivostni krivulji $\varepsilon_a - N_t$ [72]



Slika 7.32: Vzdržljivostni krivulji $F_a - N_t$ [72]



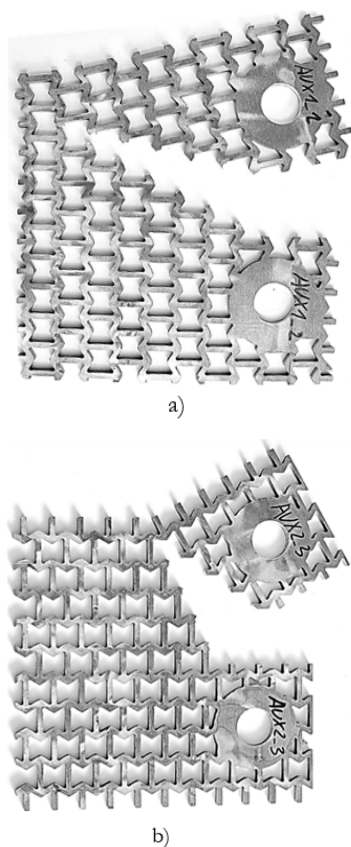
Slika 7.33: Vzdržljivostni krivulji $\Delta w - N_t$ [72]

Kot je bilo že zgoraj omenjeno, je kiralna avksetična struktura v primerjavi z vbočeno šestkotno avksetično strukturo prožnejša, kar je tudi razvidno iz diagrama na sliki 7.31, kjer na enaki ravni amplitudne deformacije (ε_a) kiralna struktura prenese približno več kot sto dodatnih obremenitvenih ciklov kot vbočena šestkotna struktura. Z diagrama na sliki 7.32 je situacija vzdržljivostnih krivulj ravno obratna, pri čemer je razvidno, da vbočena šestkotna avksetična struktura vzdrži višje obremenitve kot kiralna avksetična struktura. Diagram na sliki 7.33 prikazuje tretjo obliko predstavitve eksperimentalnih rezultatov, na kateri je prikazana povprečna deformacijska energija na cikel (Δw) v odvisnosti od števila ciklov do odpovedi vzorca (N_t). Z diagrama na sliki 7.33 je razvidno, da se vzdržljivostni krivulji kiralne in vbočene šestkotne avksetične strukture zelo približata. Od tod sledi, da obe avksetični strukturi pri enaki povprečni deformacijski energiji na cikel dosežeta podobno število obremenitvenih ciklov do odpovedi prve celične povezave, čeprav je kiralna avksetična struktura prožnejša v primerjavi z vbočeno šestkotno avksetično strukturo.

V sklopu raziskovalnega dela [97] je bila izvedena eksperimentalna analiza vpliva ciklične obremenitve na smeri širjenja poškodbe. V predstavljeni študiji je bila geometrija CT (ang. *Compact tension*) preizkušanca privzeta kot globalna oblika analiziranih geometrij. Kot je prikazano na sliki 7.34, sta se vzorca razlikovala glede na orientacijo osnovne celice vbočene šestkotne avksetične strukture. Obe geometrijski obliki vzorca sta imeli začetno makroskopsko zarezo, ki se je pri vbočeni strukturi razprostirala skozi dve celici, v rotirajoči

skupaj, kar pomeni, da je življenjska doba obeh avksetičnih struktur precej podobna. Iz enačbe potenčne regresije je razvidno, da ima vzorec z oznako AUX_2 nekoliko višjo dinamično trdnost v primerjavi z vzorcem z oznako AUX_1.

Na sliki 7.38 je prikazana smer širjenja odpovedi medceličnih povezav obeh tipov vzorcev. S slike je razvidno, da orientacija osnovne celice vpliva na smer širjenja odpovedi. Smer širjenja odpovedi medceličnih povezav je bila enaka pri vseh preizkušanih vzorcih ne glede na raven obremenitve, pri kateri je bil izveden eksperimentalni test. V obeh strukturah se je zlom posameznih celic pojavil v vogalu medceličnih povezav in se nato v naslednjih celicah širil v smeri največje koncentracije napetosti.



Slika 7.38: Porušena preizkušanca: a) vzorec z vbočeno šestkotno strukturo in b) vzorec z rotirajočo vbočeno šestkotno strukturo

7.4 Primerjava različnih geometrij

Rezultati eksperimentalnega testiranja različnih celičnih metamaterialov so dobro dokumentirani v referenčni literaturi v prejšnjih poglavjih in so na splošno

primerjani v tem poglavju. Na doseženo specifično absorpcijo energije (SEA) vpliva več dejavnikov, kot so vrsta osnovnega materiala strukture, relativna gostota, topologija enotskih celic in hitrost deformacije, kar otežuje neposredno primerjavo. Slika 7.39 prikazuje vrednosti SEA, pridobljene za različne celične metamateriale pri kvazistatičnem tlačnem obremenjevanju do 50 % deformacije, kjer temnejše barve senčenja predstavljajo vzorce z nižjo poroznostjo v vsaki analizirani skupini celičnih struktur, medtem ko svetlejše barve senčenja predstavljajo vzorce z višjo poroznostjo. Prikazani so tudi rezultati tetrapodnih celičnih struktur, izdelanih iz titana [70], kirlnih celičnih struktur iz titana in bakra [91], [98], UniPore celičnih struktur iz bakra [99], zaprtocelične aluminijaste pene [100] in odprtocelične aluminijaste pene [101]. Opaženo je, da Diamond in Gyroid strukture dosegajo specifične vrednosti absorpcije energije, ki presegajo mnoge strukture na osnovi medceličnih povezav.

S slike 7.39 je jasno razvidno, da poroznost in osnovni material pomembno vplivata na kapaciteto SEA. Strukture z nizko poroznostjo lahko absorbirajo več mehanske energije skozi deformacijo kot materiali z višjo poroznostjo, ki imajo manjšo togost. Podoben rezultat velja tudi za osnovne materiale, pri katerih materiali z višjim Youngovim modulom kažejo večjo kapaciteto SEA.

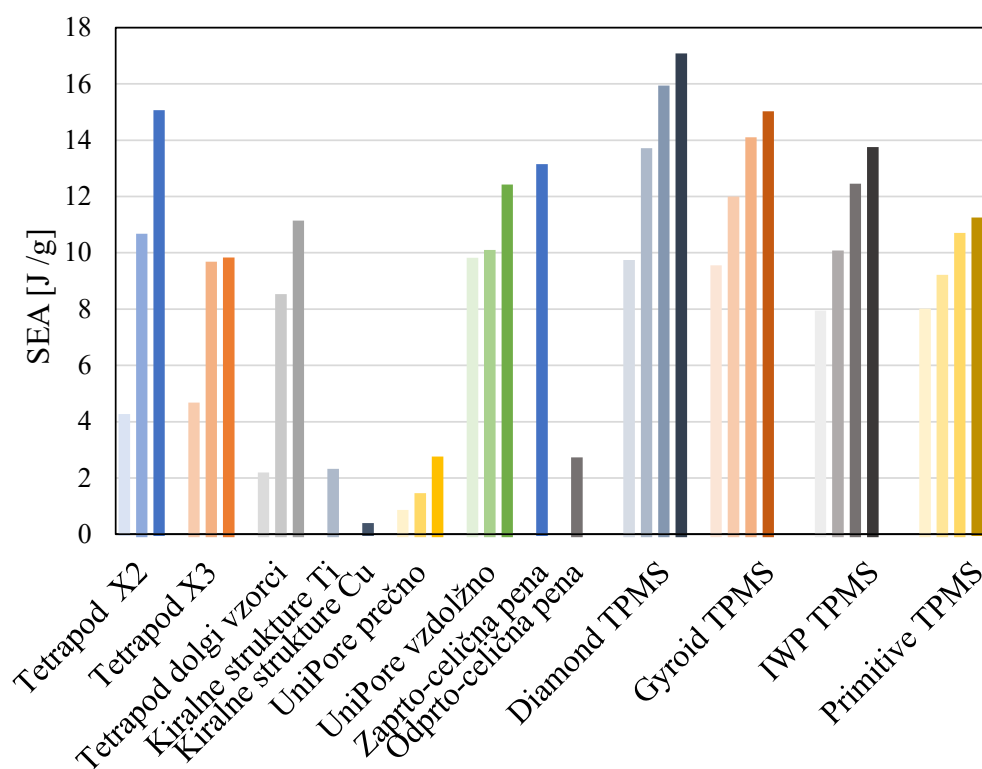
Absolutno je najbolj dosledno SEA pri 50 % deformaciji opaziti pri TPMS, zaprtoceličnih penah in UniPore strukturah. Treba je omeniti, da se pri UniPore strukturah zgoščevanje pojavi že pri 50 % deformaciji, zato prikazano SEA predstavlja skupno SEA za to vrsto strukture. Druge analizirane celične strukture se zgoščujejo pri precej višjih deformacijah, kar prispeva k skupni kapaciteti SEA teh celičnih struktur pozneje. Strukture TPMS na splošno presegajo druge strukture pri vseh analiziranih ravneh relativne gostote. To je pripisano njihovi geometriji, temelječi na površinah, ki izboljšuje mehanske lastnosti v primerjavi z geometrijo, temelječo na medceličnih povezavah, v primeru avksetičnih in odprtoceličnih pen.

Razmerje med poroznostjo, osnovnim materialom in kapaciteto SEA je mogoče dodatno raziskati z analizo mehanizmov deformacije različnih celičnih struktur.

Zaprto-celične in TPMS pene na primer preidejo skozi kombinacijo elastične deformacije, plastične deformacije in upogiba sten celic, kar jim omogoča, da absorbirajo pomembno količino energije, preden pride do zgostitve. UniPore, odprto-celične in analizirane avksetične strukture pa se večinoma zanašajo na elastično deformacijo, kje prevladuje natezna/tlačna napetost, kar omejuje njihovo kapaciteto SEA ter jih naredi lažje in bolj prilagodljive. Izbira celične strukture za določeno aplikacijo bo odvisna od specifičnih zahtev te aplikacije. Če je visoka kapaciteta SEA ključnega pomena, so TPMS, zaprto-celične pene ali druge strukture z nizko poroznostjo in visoko togostjo morda najboljša izbira. Če pa sta teža ali prilagodljivost bolj pomembna, so odprto-celične strukture ali druge strukture z višjo poroznostjo morda primernejše.

Z vidika utrujanja se celične strukture z ukrivljenimi medceličnimi povezavami bolje obnesejo zaradi več razlogov, povezanih z razporeditvijo

napetosti in zmanjšanjem koncentracij napetosti znotraj same strukture. Pri cikličnih obremenitvah, ki povzročajo utrujanje materiala, so koncentracije napetosti na ostrih vogalih ali točkah prelomov ključne točke začetka razpok. Ukrivljene medcelične povezave razporedijo te napetosti bolj enakomerno, saj gladke ukrivljenosti zmanjšujejo lokalne koncentracije napetosti in s tem zavirajo rast mikrorazpok. Dodatno ukrivljena geometrija omogoča bolj elastično deformacijo, kar pomeni, da struktura bolje absorbira energijo cikličnih obremenitev brez trajnih poškodb. Zaradi teh lastnosti ukrivljene povezave podaljšujejo življenjsko dobo strukture, saj preprečujejo hitro propagacijo razpok in zmanjšujejo vpliv utrujanja na celoten sistem. Takšna optimizacija je še posebej pomembna v aplikacijah, kjer so materiali izpostavljeni ponavljajočim se mehanskim obremenitvam, kot so letalski ali avtomobilski deli.



Slika 7.39: Primerjava SEA različnih celičnih metamaterialov pri kvazistatičnem obremenjevanju [102][103]

8 Računalniške simulacije

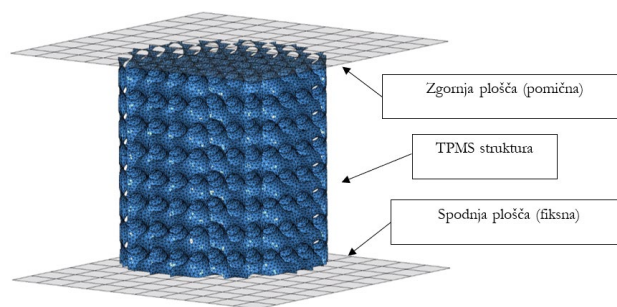
Računalniške simulacije so zelo pomembno orodje za reševanje zahtevnih inženirskih in znanstvenih problemov, kjer je z analitičnimi metodami zelo težko pridobiti vpogled v realno stanje analiziranega problema. Temelji na preslikavi realnih fizikalnih problemov v diskretno obliko matematičnih zapisov. Računalniške simulacije predstavljajo alternativno orodje znanstvenim eksperimentalnim preizkusom v laboratorijih, ki so zelo zahtevni, dragi in pogosto nevarni. Na podlagi računalniških simulacij pridobimo natančen vpogled v dogajanje, ki ga med eksperimenti ni mogoče nadzorovati in mu slediti. Iz tega razloga se v današnjih časih vse pogostejše uporabljajo računalniške simulacije tako v znanosti kot tudi v splošnem inženirstvu, kjer predstavljajo vmesni člen med eksperimentalnimi modeli in teoretičnimi predpostavkami. S sodobnimi metodami optimizacije lahko na podlagi validiranih računalniških modelov tudi spreminjamo topologijo avksetičnih celičnih struktur.

8.1 Računalniške simulacije monotonega obremenjevanja

Prvi korak k uspešni simulaciji je pravilna geometrijska predstavitev celičnega metamateriala, ki je odvisna od topologije vsakega metamateriala posebej. Izdelani vzorci aluminijeve odprtocelične pene zahtevajo CT-analizo dovolj visoke ločljivosti, da se zajamejo geometrijske podrobnosti in omogoči natančna segmentacija kovinske faze [104]. V primeru zaprtoceličnih pen je lahko uporabljen homogeniziran model (ang. *crushable foam*) [100]. Avksetične strukture so bile modelirane s pomočjo linijskih končnih elementov, ki omogočajo izredno kratke računske čase v primerjavi z volumskimi končnimi elementi (KE) [70]. Za diskretizacijo TPMS površinskih struktur pa so bili uporabljeni površinski končni elementi, ki ob pohitritvi preračuna omogočajo tudi zelo natančen opis

geometrije metamateriala [89], za kreiranje mreže KE pa je bil uporabljen program PrePoMax [105].

Pri vseh v tem delu predstavljenih računalniških modelih so bili uporabljeni enaki robni pogoji v programu LS-PrePost. Napake pri izdelavi, ki so povzročile variacije premera medceličnih povezav, in debeline površin so bile upoštevane posredno prek uporabljenih materialnih parametrov. To je bilo doseženo z izvedbo inverznih parametričnih računalniških simulacij, ki uporabljajo eksperimentalne podatke za določitev vrednosti neznanih parametrov. V simulacijah s končnimi elementi so bili vzorci postavljeni med dve plošči, pri čemer so bili predpisani naslednji robni pogoji: spodnja plošča je imela omejene vse prostostne stopnje, zgornja plošča pa predpisano konstantno hitrost proti spodnji plošči (slika 8.1).

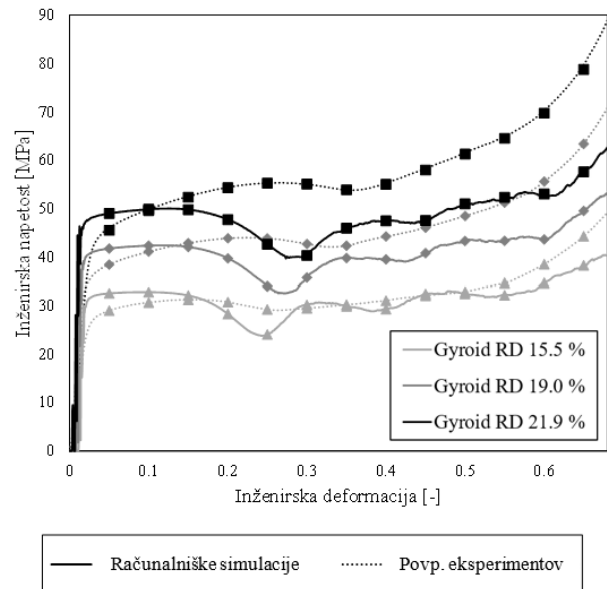


Slika 8.1: Predpis robnih pogojev

Osnovni material avksetičnih celičnih struktur v programu LS-DYNA je bil opisan z materialnim modelom MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024), ki ob modeliranju plastifikacije in utrjevanja z dodatkom MAT_ADD_EROSION omogoča modeliranje razvoja poškodb in porušitve tudi za linijske končne elemente [106]. V ta model je mogoče vključiti tudi odvisnost materialnih parametrov od hitrosti deformacije na podlagi Cowper-Symondsovega modela.

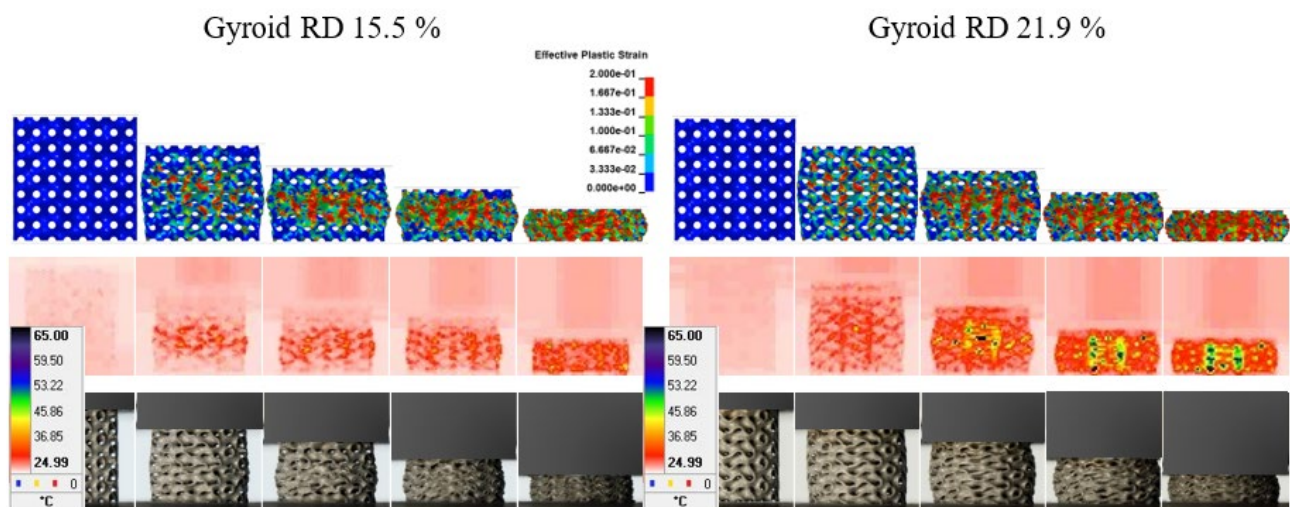
Ta model je odvisen od hitrosti obremenjevanja, njegovo utrjevanje pa je opisano z odsekovno-linearnim elasto-plastičnim modelom [107]. Pogosto se uporablja za modeliranje obnašanja kovin in zlitin ter je primeren za simulacijo velikih deformacij in plastičnega tečenja v celičnih strukturah pod udarnim obremenjevanjem. Izvedene so bile inverzne računalniške simulacije obremenjenih vzorcev, da bi pridobili enake makroskopske rezultate simulacije, kot so bili izmerjeni pri eksperimentalnem testiranju za vse metamaterialne in celoten razpon deformacij do zgoščevanja. To pomeni, da so bili materialni parametri, uporabljeni v modelu MAT_024, prilagojeni, dokler se simulirane napetostno-deformacijske krivulje niso ujemale z eksperimentalnimi podatki. Validacija računalniških modelov temelji na natančni primerjavi deformacijskega obnašanja in mehanskega odziva med računalniškimi in eksperimentalnimi rezultati. Poleg tega se lahko validirani računalniški modeli uporabijo tudi za proučevanje uporabe teh metamaterialov v prihodnjih aplikacijah. Mehanski odziv izbrane strukture Gyroid TPMS pri različnih hitrostih obremenitve je prikazan na sliki 8.2. Pri eksperimentalnih je napetost platoja skoraj konstantna do vrednosti deformacije 35 %, kjer začne postajati opazen učinek lokalnega zgoščevanja in se naklon platoja začne povečevati (utrjevanje). Računalniško napovedani mehanski odziv kaže bolj izrazit padec napetosti v območju napetostnega platoja in poteka pri nižji ravni deformacije (25 %–29 %). Na splošno lahko sklepamo o dobri korelaciji krivulj, računalniški modeli tudi dobro opišejo zgoščevanje strukture.

Zelo natančno deformacijsko obnašanje je mogoče opazovati v računalniškem modelu v primerjavi z IR termografskimi posnetki, kot je prikazano na sliki 8.3. Deformacija je lokalizirana v središču strukture in se nato z večanjem globalne deformacije širi proti robovom.

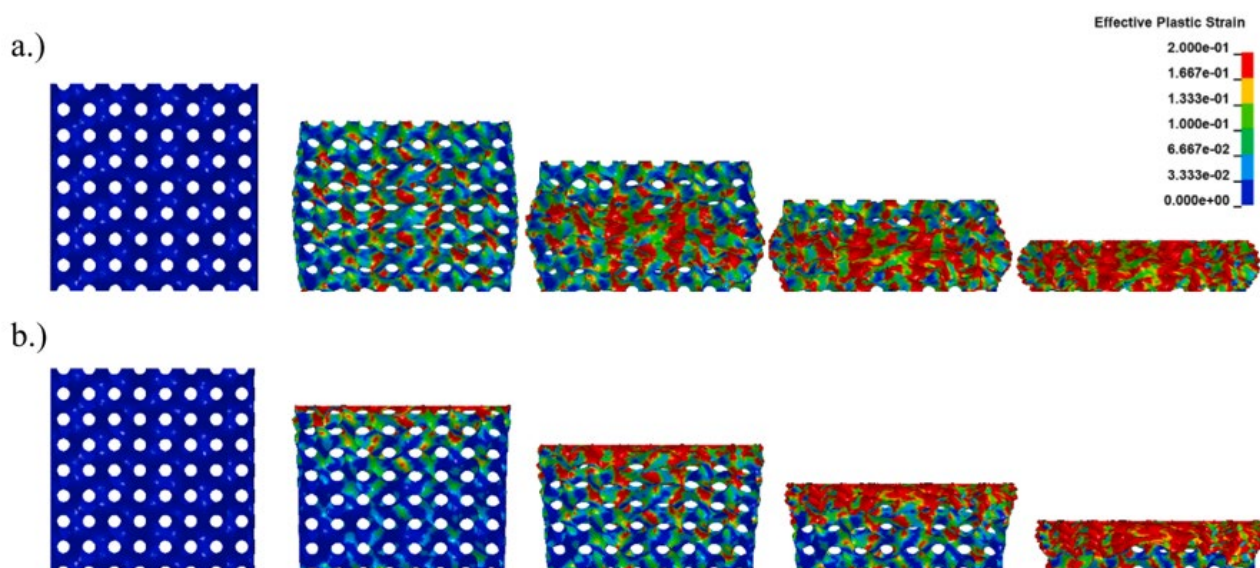


Slika 8.2: Primerjava računalniških in eksperimentalnih mehanskih odzivov Gyroid TPMS struktur z različnimi relativnimi gostotami

Računalniški modeli ponujajo tudi možnost napovedovanja obnašanja metamaterialov pri hitrostih obremenitve, ki jih ni mogoče doseči pri eksperimentalnem testiranju, slika 8.4. Metamateriali se lahko uporabijo v zaščiti pred eksplozijami kot jedro sendvič panelov, kjer se njihova topologija lahko določi in optimizira z računalniškimi simulacijami [108].



Slika 8.3: Deformacijska obnašanja Gyroid TPMS struktur dveh različnih gostot, zajeto z računalniško simulacijo (na vrhu), IR-termografijo (sredina) in videom iz eksperimenta (dno slike).

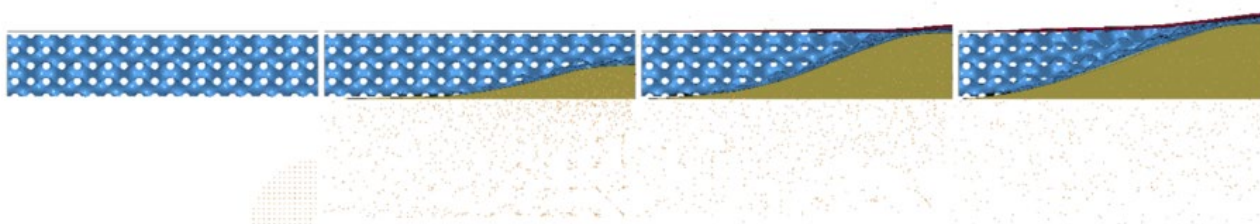


Slika 8.4: Deformacija Gyroid TPMS-struktur pri hitrosti obremenjevanja 30 m/s (homogen odziv) in pri 100 m/s (visokohitrostni odziv)[108]

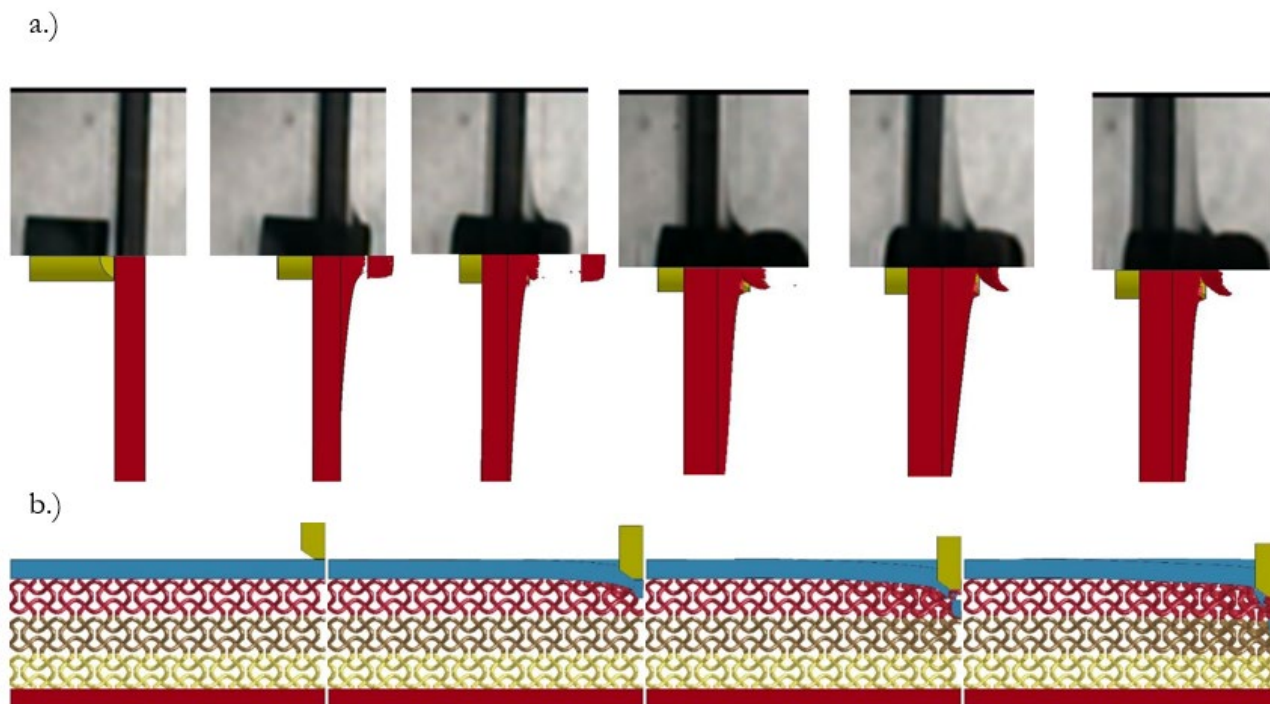
Študija je bila izvedena za avksetično strukturo [98] in strukture TPMS [108]. Tipični odziv deformacije je prikazan na sliki 8.5. S spremembo Poissonovega razmerja v tem primeru ni možno znižati največjega pomika sendvič strukture (največji pomik je 42,2 mm) v primerjavi z jedrom z enako poroznostjo in pozitivnim Poissonovim razmerjem (največji pomik je 41,6 mm), vendar je SEA avksetičnega jedra z negativnim Poissonovim razmerjem 25 % večja. Manjši pomik v primeru pozitivnega Poissonovega razmerja je posledica tega, da je veliko medceličnih povezav orientiranih pravokotno na prekrivni plošči, kar zagotavlja izjemno togost in omejuje pomik prekrivnih plošč proti notranjosti sendvič strukture. Iz tega sledi, da je v primeru avksetičnega jedra deformacija spodnje plošče razporejena po širšem območju in zato je SEA jedra večja, kar je lahko ključna lastnost v mnogih aplikacijah na področju balistične zaščite.

Poleg obremenitve z eksplozijo se lahko sendvič paneli, napolnjeni z metamateriali, uporabijo tudi za balistično zaščito. Za prikaz je bila izbrana obremenitev s

projektilom, ki simulira fragmente (FSP), kjer so bile najprej testirane aluminijaste in titanske plošče, da bi se določile balistične limitne hitrosti [109]. Na podlagi teh testov so bili razviti in validirani računalniški modeli, nato pa so bili ovrednoteni odzivi sendvič panelov. Dokazano je bilo, da uporaba sendvič strukture poveča balistično hitrost, pri kateri izstrellek prebije zgornjo ploščo sendvič strukture, v primerjavi s polno ploščo enakih dimenzij. Balistična hitrost se je povečala zgolj za 5 %, kar je posledica lokalne obremenitve zgornje plošče. Zgornja plošča se ne deformira na večjem območju, kar bi z obsežnejšo deformacijo avksetične strukture prispevalo k učinkovitejši absorpciji energije. To je možno delno rešiti s še bolj duktilnim materialom prekrivnih plošč, kot je obravnavana titanova zlitina, vendar je ob tem treba upoštevati tudi dejstvo, da se pri tako visokih hitrostih obremenitve material deformira drugače kot pri statični obremenitvi.



Slika 8.5: Deformacijsko obnašanje sendvič panela, napolnjenega s strukturo TPMS, pri eksplozijski obremenitvi [108]



Slika 8.6: Deformacijsko obnašanje plošče iz titana (a.) in sendvič panela (b.) pri udarcih FSP projektila

8.2 Računalniški modeli napovedovanja življenjske dobe

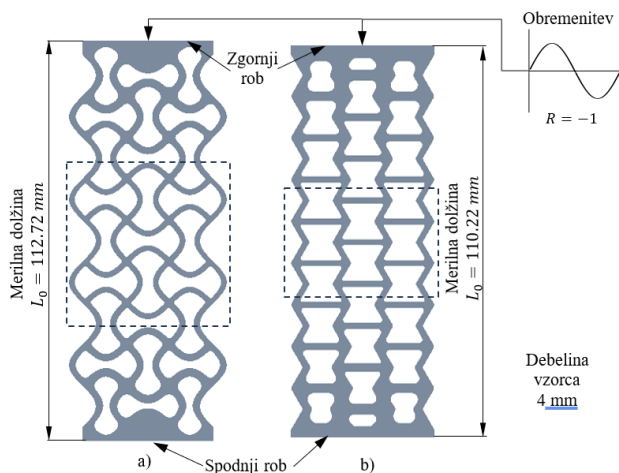
Napovedovanje življenjske dobe je kompleksen problem, ki vključuje številne negotovosti, kot so variacije materialnih lastnosti, nepopolno poznavanje obremenitev in vplivov okolja. Tradicionalne metode napovedovanja življenjske dobe, ki temeljijo na empiričnih podatkih, so pogosto omejene na specifične pogoje in ne omogočajo natančne napovedi za kompleksne sisteme. Numerični modeli, ki temeljijo na fizikalnih zakonih, omogočajo bolj celovito razumevanje mehanizmov, ki vodijo do odpovedi, in s tem bolj zanesljive napovedi. S pomočjo računalniških modelov lahko simuliramo obnašanje materialov pod različnimi obremenitvami in okoliškimi pogoji. Definirani robni pogoji znotraj modela so določeni na podlagi vrste analize in izbire metode za izračun življenjske dobe. V primeru deformacijske metode (območje LCF) se obremenitev modelira kot en zaprt obremenitveni cikel, medtem ko v primeru napetostne metode (območje HCF) samo skrajne točke obremenitvenega cikla.

V sklopu raziskovalnega dela [110] je bil razvit in potrjen računalniški model za napovedovanje življenjske dobe vbočene in kiralne 2D-avksetične strukture (slika 8.7). Preizkušanci so bili modelirani v

obliki ploščatih nateznih vzorcev s spreminjajočo togostjo vzdolž vzorca. Za material vzorcev so bili privzeti materialni parametri za aluminijevo zlitino z materialno oznako AA 5083-H111. Materialni parametri so bili predhodno določeni na podlagi obsežne mehanske karakterizacije osnovnega materiala in so predstavljeni v strokovni literaturi [111], [112]. V analizi je bil privzet elastooplastični materialni model s kinematičnim utrjanjem materiala. Materialni parametri kinematičnega utrjanja so bili določeni na podlagi stabilne histerezne zanke, ki je bila določena v sklopu mehanske karakterizacije osnovnega materiala [72]. Znotraj materialnega modela so bili definirani tudi utrujenostni materialni parametri, ki so bili predhodno določeni za osnovni material [111].

Pred začetkom izvedbe numerične analize je treba predpisati še robne pogoje vpetja in obremenitve. Ti so bili predpisani na robove analiziranih geometrij. Analize so bile izvedene v kontroli deformacije (razmerje obremenitve $R = \square 1$), kjer je bil na zgornji rob predpisan pomik sinusne oblike. Računalniške simulacije so bile izvedene na različnih ravneh amplitudne deformacije. Analizirani geometriji sta bili diskretizirani s kvadratnimi pravokotnimi končnimi elementi, pri čemer je bila velikost končnega elementa določena na podlagi konvergenčne analize. Za izračun življenjske dobe je bila privzeta deformacijska metoda z

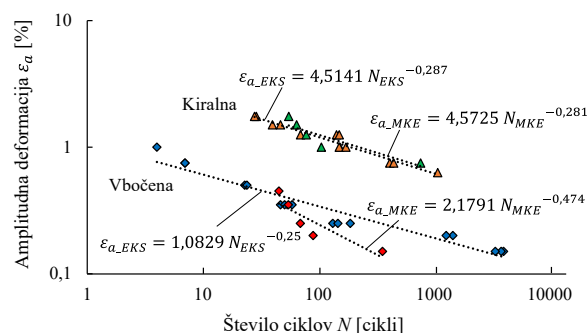
upoštevanjem korekcije srednje napetosti. Numerični model je bil razvid znotraj programskega paketa ANSYS Mechanical [113].



Slika 8.7: Geometrija vzorcev s predpisanimi robnimi pogoji:
a) kiralna struktura in b) vbočena šestkotna struktura

Numerični model vbočene in kiralne avksetične strukture je bil v nadaljevanju potrjen s primerjavo numeričnih (MKE) in eksperimentalnih (EKS) rezultatov, ki so bili predstavljeni v treh različnih oblikah vzdržljivostnih krivulj: $\epsilon_a - N$, $F_a - N$ in $\Delta w - N$. Na sliki 8.8 je predstavljena primerjava vzdržljivostnih krivulj amplitudnih deformacij (ϵ_a) v odvisnosti od števila ciklov (N). Iz primerjave je razvidno, da ima kiralna struktura daljšo življenjsko dobo pri višjih amplitudnih deformacijah v primerjavi z vbočeno šestkotno avksetično strukturo. V primerjavi $F_a - N$ je situacija ravno obratna. Vbočena struktura vzdrži višje amplitudne sile (struktura je bolj toga) v primerjavi s kiralno strukturo, ki je bolj fleksibilna. V primeru vzdržljivostnih krivulj $\Delta w - N$ krivulji ležita ena na drugi. Ta pojav je posledica različnih togosti avksetičnih vzorcev. Geometrija kiralnega vzorca je manj toga, a bolj prožna kot geometrija vbočenega vzorca. Na podlagi prožnosti je življenjska doba kiralnega vzorca daljša pri višjih amplitudnih deformacijah v primerjavi z vbočenimi vzorci. Po drugi strani pa kiralni vzorec prenese manjšo amplitudno silo kot bolj tog vzorec. Pri obeh analiziranih strukturah so najbolj kritični deli vzdolžne povezave na mestih z dobro izraženimi ukrivljenostmi. To je še posebej izrazito v primeru kiralne avksetične strukture, saj so na teh mestih kot posledica rotacije medceličnih povezav največji notranji upogibni momenti. Posledično so na

teh mestih največje napetosti in deformacije, ki vodijo do krajše življenjske dobe. Več o študiji je predstavljeno v [110].

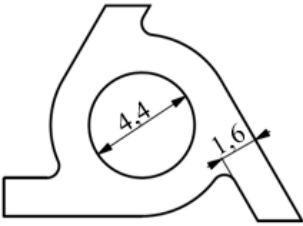
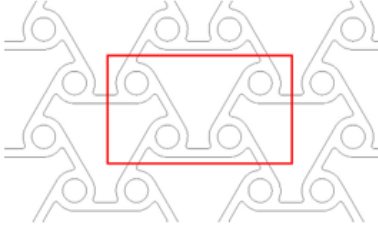
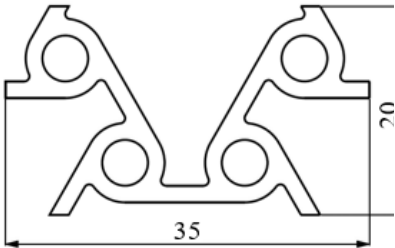
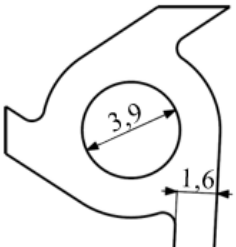
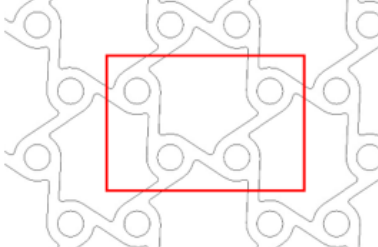
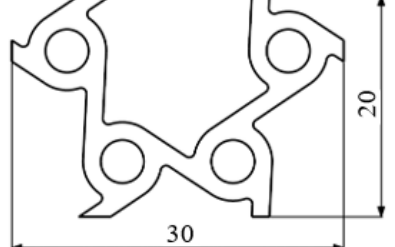
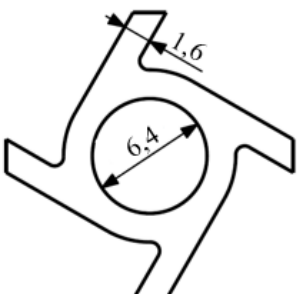
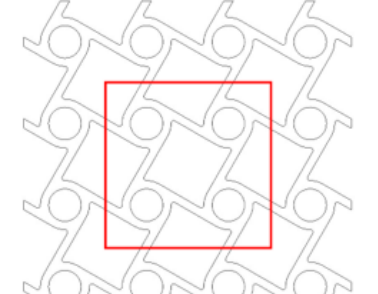
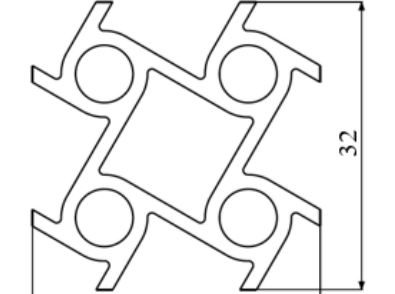
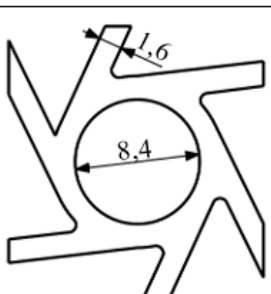
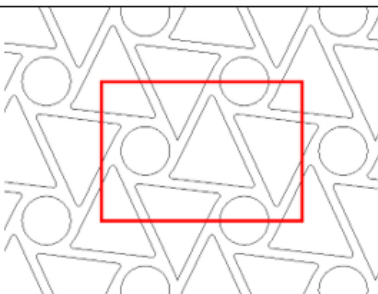
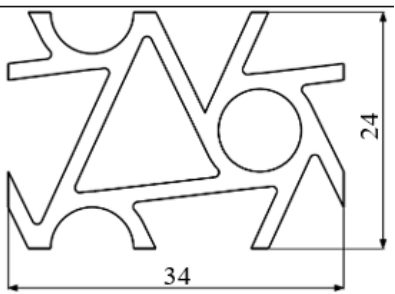
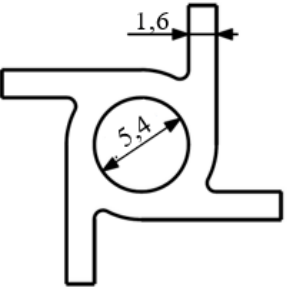
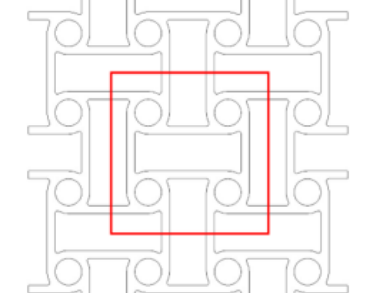
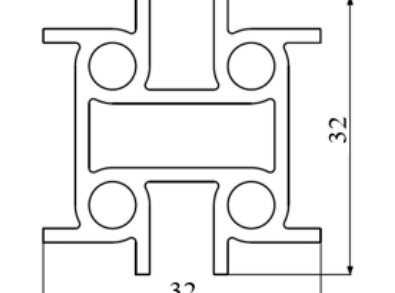


Slika 8.8: Primerjava vzdržljivostnih krivulj $\epsilon_a - N$

V nadaljevanju je potrjen računalniški model služil kot osnova za parametrično študijo različnih oblik kiralnih struktur. V sklopu SolidWorks CAD programa je bil razvit grafični vmesnik, ki na podlagi vhodnih dimenzijskih parametrov osnovnega vozlišča kreira kiralno geometrijo osnovne celice, ki je periodično ponovljiva. Shematski prikaz osnovnih celic je prikazan v preglednici 8.1.

V prvem delu študije je bil raziskan vpliv števila osnovnih celic na mehanski natezni odziv. Za določitev ustreznega števila celic analiziranih kiralnih avksetičnih struktur so bili pripravljene numerični modeli s konfiguracijo celic 1×1 ali ena osnovna celica, 2×2 ali štiri osnovne celice, 3×3 ali devet osnovnih celic in 4×4 ali šestnajst osnovnih celic. Namen določitve ustreznega števila osnovnih celic je bil preveriti odziv struktur različnih konfiguracij, saj lahko vpliv robnih pogojev povzroči nepravilne odzive struktur. Znotraj modelov so bili robni pogoji vpetja predpisani na spodnji rob analizirane geometrije, medtem ko je bila obremenitev v obliki pomika predpisana na zgornji rob.

V sklopu študije so bile izvedene numerične simulacije za vsako konfiguracijo kiralnih avksetičnih struktur. Med numeričnimi simulacijami smo spremljali reakcijsko silo in pomik na zgornjih robovih vsake strukture v vsakem časovnem koraku. Za primerjavo odzivov je bila pretvorjena izračunana reakcijska sila ter pomik v inženirsko napetost (σ_e) in inženirsko deformacijo (ϵ_e) z uporabo naslednjih enačb:

Tip	Osnovno vozlišče	Ponavljajoči del	Osnovna celica
Trianti-kiral			
Trikiral			
Tetrakiral			
Hexakiral			
Tetraanti-kiral			

$$\sigma_e = \frac{F}{A} = \frac{F}{a \cdot t},$$

(8.1)

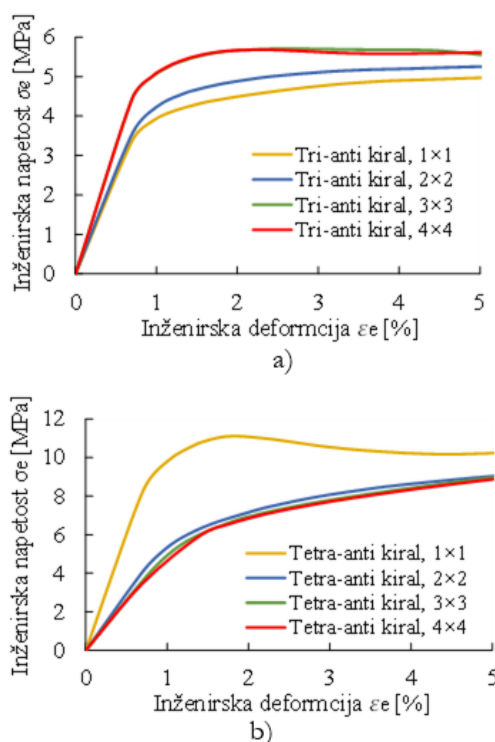
$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L}{L_0},$$

(8.2)

kjer F predstavlja izračunano reakcijsko silo, a širina analizirane strukture in t debelino strukture. V enačbi (8.2) ΔL predstavlja izračunani premik in L_0 začetno dolžino analizirane strukture (glej preglednico 8.1).

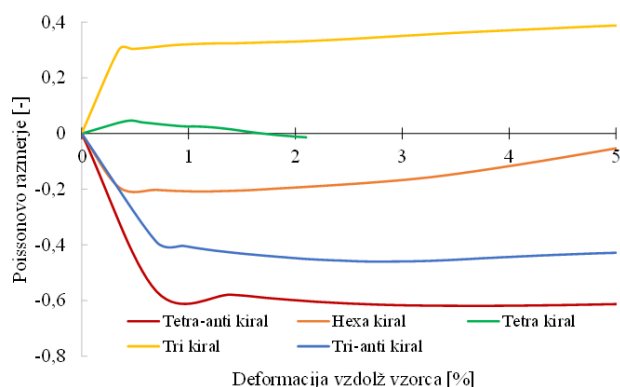
Grafični prikaz rezultatov primerjave mehanskih odzivov trianti in tetraanti kiralne strukture so prikazani na sliki 8.9. Primerjava med napetostno-deformacijskimi odzivi so pokazali, da je 1×1 konfiguracija osnovnih celic neprimerna za obravnavo v nadaljnjih numeričnih simulacijah, saj je odziv za vseh pet analiziranih struktur bistveno odstopal od vseh preostalih konfiguracij. V trianti kiralni strukturi se je

odziv razporeditve 2×2 precej razlikoval od odziva razporeditve 3×3 in 4×4 , katerih odzivi so zelo podobni. Poleg primerjave odzivov analiziranih struktur je bil za določitev ustreznega števila osnovnih celic upoštevan tudi vpliv robnih pogojev in potrebnega računskega časa za izračun numerične simulacije. Na podlagi vsega je bila v nadaljevanju za vse nadaljnje numerične simulacije izbrana konfiguracija 4×4 , saj so bile razlike v računskih časih med konfiguracijo 3×3 in 4×4 relativno majhne, vpliv robnih pogojev pa zanemarljiv.



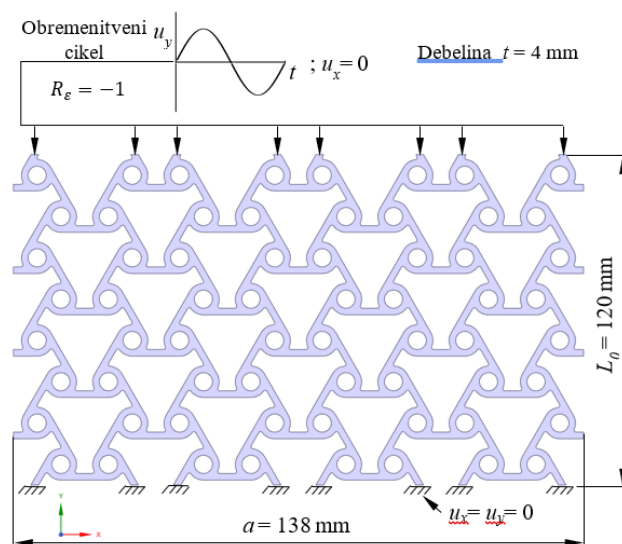
Slika 8.9: Mehanski odziv: a) triantikiral in b) tetraantikiral

V sklopu raziskave je bilo v nadaljevanju za 4×4 konfiguracije osnovnih celic izračunano Poissonovo razmerje, ki je prikazano na sliki 8.10. Numerični rezultati kažejo, da imajo trikiralna in tetrakiralna struktura pozitivno Poissonovo razmerje, kar pomeni, da v teh dveh tipih struktur ni prišlo do avksetičnega učinka. Poissonovo razmerje tetrakiralne strukture je proti koncu obremenitve postalo negativno, vendar je ostalo večino časa pozitivno. Za heksakiralno strukturo je bilo Poissonovo razmerje celotno obdobje obremenitve negativno, vendar se je vse bolj približevalo pozitivni vrednosti. Tetraantikiralna in triantikiralna struktura sta imeli negativno Poissonovo razmerje v celotnem obremenitvenem obdobju.



Slika 8.10: Poissonovo razmerje analiziranih kiralnih avksetičnih struktur

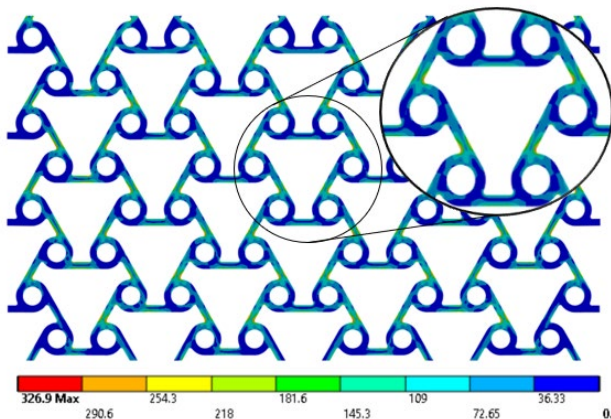
V nadaljevanju so bile numerične simulacije izvedene v režimu LCF. V računskem modelu so bili robni pogoji vpetja predpisani na spodnji rob geometrije, kjer je bilo omejeno gibanje v x- in y-smeri. Numerične simulacije so bile izvedene pri različnih amplitudah deformacije, kjer je bil pomik kot en zaprt sinusni obremenitveni cikel predpisan na zgornji rob. Računske analize so bile izvedene v kontroli deformacije ($R_\epsilon = 1$), pri čemer je bila deformacija kontrolirana po celotni dolžini analizirane geometrije. Grafični predstavitev robnih pogojev za triantikiralno avksetično strukturo s konfiguracijo 4×4 je predstavljena na sliki 8.11.



Slika 8.11: Predpisani robni pogoji

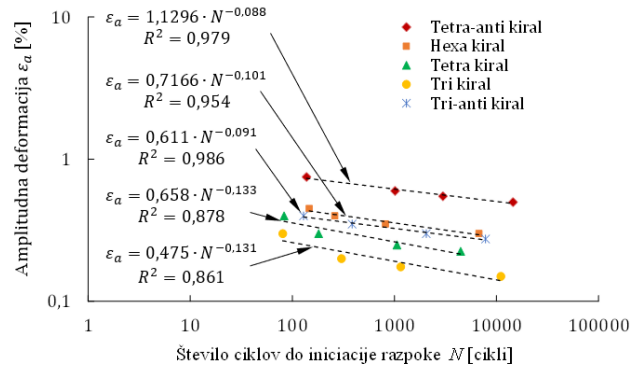
Število ciklov do iniciacije utrujenostne razpoke je bilo izračunano z uporabo deformacijskega pristopa z upoštevanjem Morrow korekcije srednje napetosti. Na sliki 8.12 je prikazana porazdelitev Misesove primerjalne napetosti po triantikiralni avksetični strukturi. S porazdelitve napetosti je razvidno, da so

največje napetosti koncentrirane na stičiščih medceličnih povezav, kjer se pojavi največji zarezni učinek.



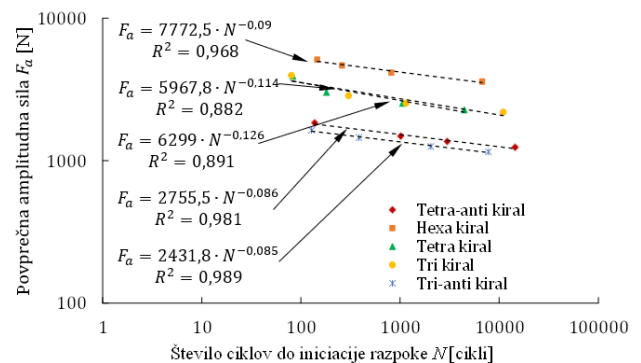
Slika 8.12: Porazdelitev primerjalnih napetosti v [MPa]

Tako kot v predhodni študiji so bili v tej študiji prav tako numerični rezultati predstavljeni v različnih oblikah vzdržljivostnih krivulj. Na sliki 8.13 je prikazana odvisnost amplitudne deformacije od števila ciklov do iniciacije razpoke. Rezultati kažejo, da je tetraantikiralna struktura pokazala najvišjo, trikiralna struktura pa najnižjo odpornost za nastanek utrujenostne razpoke. Pri tem je treba poudariti, da ima trikiralna struktura najvišje pozitivno Poissonovo razmerje v primerjavi z drugimi strukturami.



Slika 8.13: Primerjava vzdržljivostnih krivulj $\varepsilon_a - N$

Na sliki 8.14 je prikazana primerjava največje amplitudne sile v odvisnosti od števila ciklov do iniciacije razpoke. Iz rezultatov je razvidno, da hexakiralna struktura prenese najvišjo silo pri enakem številu ciklov v primerjavi z drugimi strukturami. Prav tako lahko iz naklona vzdržljivostnih krivulj sklepamo, da je omenjena struktura najbolj toga, za najmanj togo pa se je pokazala triantikiralna struktura.



Slika 8.14: Primerjava vzdržljivostnih krivulj $F_a - N$

9 Uporaba celičnih metamaterialov

Zaradi svojih izjemnih mehanskih in termičnih lastnosti ter številnih drugih prednosti se celična gradiva uvrščajo med izjemno vsestranske materiale z velikim potencialom za uporabo v različnih industrijskih panogah.

Primeri uporabe celičnih gradiv:

- Avtomobilska industrija: lažji deli karoserije, notranjost vozila, filtri za gorivo in zrak
- Železniška industrija: lažji vagoni, zvočna izolacija, toplotna izolacija
- Vojaška industrija: zaščitna oprema, balistična zaščita, lahka konstrukcija letal in plovil
- Ladijska industrija: lažje ladje, plovila in komponente, toplotna izolacija
- Vesoljska industrija: lahki sateliti, toplotna izolacija, strukturni elementi
- Medicina: implantati, ortopedski pripomočki, tkivno inženirstvo
- Splošno konstruiranje lahkih konstrukcij: lahke konstrukcije, sendvič strukture, polnila za votle komponente

Poleg omenjenih primerov se celična gradiva uporabljajo tudi kot:

- Filtri: za čiščenje zraka, vode in drugih tekočin
- Toplotni izmenjevalci: za izboljšanje prenosa toplote
- Izolatorji: za zmanjšanje toplotnih izgub
- Sredice v sendvič strukturah: za povečanje togosti in trdnosti
- Polnila v votlih komponentah: za povečanje togosti, absorpcijo energije trka in dušenje vibracij

Kljub svojim izjemnim lastnostim se celična gradiva v industriji še ne uporabljajo tako množično, kot bi se lahko. To je posledica:

- Pomanjkanja podrobne karakterizacije ustreznih materialnih lastnosti: treba je natančno določiti mehanske, termične, akustične in druge lastnosti celičnih gradiv za različne pogoje uporabe.
- Premalo praktičnih izkušenj: treba je pridobiti več znanja o uporabi celičnih gradiv v realnih pogojih in s tem zmanjšati tveganja pri implementaciji.
- Nezaupanje v uporabo novih gradiv: industrija je pogosto konservativna in raje uporablja preizkušene materiale. Nova gradiva se običajno začnejo uporabljati šele po 15 letih od začetka njihovega razvoja, če izkažejo izjemno potencialno uporabnost.
- Stroški izdelave.

Da bi se celična gradiva bolj množično uporabljala v industriji, je treba:

- Nadaljevati z raziskavami in razvojem celičnih gradiv ter podrobno karakterizirati njihove lastnosti.
- Pridobiti več praktičnih izkušenj z uporabo celičnih gradiv v različnih industrijskih panogah.
- Sodelovati z industrijo in predstaviti prednosti uporabe celičnih gradiv.
- Razviti standarde in smernice za uporabo celičnih gradiv.
- Poiskati ali razviti stroškovno bolj ugodno proizvodno tehnologij izdelave tovrstnih metamaterialov.

S temi ukrepi se bo povečala uporaba celičnih gradiv v različnih industrijskih panogah, kar bo prineslo številne prednosti, kot so:

- Lažje konstrukcije
- Manjša poraba energije
- Izboljšana zmožljivost
- Večja varnost
- Učinkovitejša raba virov
- Zmanjšanje emisij CO₂

Celična gradiva imajo velik potencial za preoblikovanje različnih industrijskih panog. Z nadaljnjim razvojem in s sodelovanjem med raziskovalci, inženirji in industrijo lahko dosežemo široko uporabo teh inovativnih materialov in s tem ustvarimo bolj trajnosten in napreden svet. Nekaj že izdelanih prototipov in serijskih proizvodov je podanih v naslednjih odstavkih po posameznih področjih uporabe.

V avtomobilski industriji se celični materiali vse bolj uveljavljajo zaradi svojih prednosti, kot so nizka gostota, visoka trdnost, dobra toplotna in zvočna izolacija ter sposobnost absorpcije energije ob trkih. Takšni materiali igrajo ključno vlogo pri doseganju ciljev, kot so zmanjšanje teže vozil, izboljšanje varnosti in optimizacija energetske učinkovitosti.

V avtomobilski industriji se najpogosteje uporabljajo naslednje vrste celičnih materialov:

- **Polimerne pene in penasti materiali:** Pene so izjemno lahke in imajo dobro absorpcijo energije, kar jih naredi primerne za uporabo v varnostnih komponentah, kot so zaščitni elementi v primeru trkov, zaščitne obloge in materiali za notranjost vozil. Pogosto uporabljeni materiali so poliuretanske pene, ekspanzirani polistiren (EPS) in ekstrudirani polistiren (XPS).
- **Aluminijaste celične strukture:** Aluminijaste celične strukture so znane po svoji odlični trdnosti in nizki teži. Glede na zahtevano togost lahko izberemo odprtočelične ali zaprtočelične strukture. Te celične strukture se pogosto uporabljajo v strukturnih delih vozil, kot so karoserijske plošče, strehe in prednji deli avtomobilov. Prav tako se uporabljajo v sistemih za absorpcijo energije, kjer

so zaradi svoje sposobnosti učinkovitega prenašanja udarnih sil zelo cenjene.

Uporaba celičnih materialov v avtomobilski industriji prinaša številne prednosti:

- **Zmanjšanje teže vozil:** Celični materiali so lažji od tradicionalnih materialov, kot so polne kovine ali polimerni materiali, zaradi česar je mogoče zmanjšati skupno težo vozila. Lažja vozila porabijo manj goriva, kar vodi k večji energetski učinkovitosti in nižjim emisijam CO₂, kar je ključnega pomena za doseg okoljevarstvenih ciljev.
- **Povečanje varnosti:** Zaradi svoje sposobnosti absorpcije udarnih energij so celični materiali idealni za varnostne komponente avtomobila. Uporabljajo se v zaščitnih strukturah, kot so prednji in zadnji odbijači, notranja zaščita kabine ter dodatki za izboljšanje varnosti potnikov. Celični materiali pomagajo pri razporeditvi udarne energije in zmanjšanju poškodb ob trkih.
- **Izboljšanje akustičnih in toplotnih lastnosti:** Celični materiali so izjemno učinkoviti pri zmanjševanju hrupa in vibracij ter ponujajo dobro toplotno izolacijo. To je še posebej pomembno v notranjosti avtomobilov, kjer se uporabljajo za zmanjšanje zvočnih in toplotnih učinkov znotraj kabine. Tako omogočajo udobnejšo vožnjo in boljši nadzor nad temperaturnimi pogoji v vozilu.
- **Enostavnost oblikovanja in prilagodljivost:** Celični materiali so lahko oblikovani v različne geometrijske oblike in velikosti, kar omogoča enostavno integracijo v različne komponente vozil. To je še posebej pomembno pri proizvodnji avtomobilskih delov, ki morajo imeti specifične dimenzije ali biti optimizirani za določeno funkcionalnost.

Nekaj aplikacij v avtomobilski industriji in industriji tirnih vozil je prikazano na sliki 9.1.

Celični materiali se uporabljajo tudi za balistično zaščito zaradi svoje izjemne sposobnosti absorpcije energije in razporeditve udarnih sil. Ti materiali so zasnovani tako, da učinkovito ublažijo vpliv projektilov, medtem ko ostanejo lahki in fleksibilni. V kombinaciji z drugimi materiali, kot so kevlar ali aramidna vlakna, celične

strukture omogočajo izdelavo lahkih, a trdnih zaščitnih plošč, ki se uporabljajo v zaščitnih oblekah, oklepih vozil in balističnih ščitih. Takšna uporaba pripomore k večji zaščiti pred balističnimi napadi, hkrati pa ohranja udobje in mobilnost uporabnikov. Primer sredice sendvič strukture za uporabo v zaščitnih ploščah je prikazan na sliki 9.2.



Slika 9.1: Absorpcijski komponenti iz aluminijaste pene (zgoraj) in vlaka ICE (spodaj) [63]



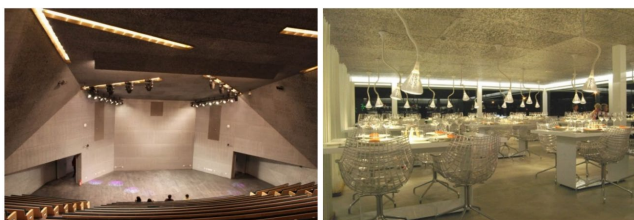
Slika 9.2: Sredica sendvič strukture za uporabo v zaščitnih ploščah za blaženje udarnega vala pri eksploziji [63]

V konstrukcijah se celicni materiali pogosto uporabljajo zaradi svojih odličnih lastnosti, kot so lahkost, trdnost in energetska učinkovitost. Plošče iz aluminijaste pene so široko uporabljene za nosilne strukture v modernih stavbah, mostovih in drugih infrastrukturnih objektih, saj zagotavljajo izjemno trdnost pri nizki teži, kar omogoča zmanjšanje skupne mase konstrukcije. Poleg tega celicni materiali, kot so betonske pene, izboljšujejo toplotno in zvočno izolacijo, kar pripomore k večji energetske učinkovitosti in udobju v stavbah. Uporaba teh materialov omogoča tudi enostavnejšo obdelavo in oblikovanje ter zmanjšanje stroškov gradnje, saj so celicni materiali pogosto cenovno ugodni ter enostavni za transport in montažo. Kot polnilo v različnih konstrukcijah so celicne strukture prikazane na sliki 9.3.



Slika 9.3: Nosilec tekstilnega stroja in dvigala, napolnjen z aluminijasto peno. [63]

Celični materiali se lahko v akustiki uporabljajo predvsem zaradi svoje sposobnosti učinkovitega zmanjševanja hrupa in absorpcije zvoka. Zaradi svoje porozne strukture in visoke poroznosti celični materiali učinkovito absorbirajo zvočne valove in preprečujejo njihovo širjenje. Vgrajeni v stene, strop in tla ti materiali pomagajo zmanjšati zvočne vibracije in hrup med prostori ter izboljšati akustične lastnosti prostorov, kot so studii, dvorane, pisarne ali stanovanja. Celični materiali se uporabljajo tudi v avtomobilskih in letalskih industrijah za zmanjšanje hrupa, kar pripomore k večjemu udobju uporabnikov in boljši zvočni izolaciji.



Slika 9.4: Strop koncertne dvorane (levo) in stene restavracije (desno), prekriti z aluminijasto peno zaradi boljše akustike. [63]

Celični materiali se v izmenjevalcih toplote uporabljajo zaradi svojega visokega razmerja površine in prostornine, ki omogoča učinkovit prenos toplote pri nizki teži. Zaradi svoje porozne strukture omogočajo boljše izkoriščanje prostora za prenos toplote med tekočinami ali plini, kar povečuje učinkovitost izmenjevalcev toplote. Na primer, aluminijaste pene se pogosto uporabljajo v industrijskih hladilnih sistemih in klimatskih napravah, saj omogočajo hitro hlajenje ali segrevanje tekočin, obenem pa ohranjajo nizko težo sistema.



Slika 9.5: Izmenjevalci toplote [63]

Celični materiali se v filtraciji uporabljajo zaradi svoje porozne strukture, ki omogoča učinkovito zajemanje trdnih delcev, plinov ali tekočin, hkrati pa zagotavlja nizek tokovni upor. Zaradi visokega razmerja površine in prostornine, celični materiali, kot so kovinske pene, keramika in polimerni materiali, omogočajo hitro filtracijo in dolgo življenjsko dobo filtrirnih elementov. V industriji, kjer so potrebni visoki standardi filtracije, se celični materiali uporabljajo v filterih za pline, tekočine in prah, na primer v avtomobilskih izpušnih sistemih, sistemih za čiščenje zraka, vodnih filterih ali v kemičnih procesih. Poleg tega omogočajo enostavno čiščenje in ponovno uporabo, saj je njihova struktura običajno enostavna za vzdrževanje, kar povečuje njihovo učinkovitost in zmanjšuje stroške delovanja.



Slika 9.6: Različne manjše komponente (npr. filteri), izdelane iz celičnih gradiv [63]

Celični materiali se v medicini uporabljajo tudi v implantatih (endoprotezah), kjer izkoriščajo svoje lastnosti, kot so nizka teža, biokompatibilnost in sposobnost absorpcije energije. Ti materiali so pogosto zasnovani tako, da omogočajo optimalno integracijo z naravnimi tkivi, hkrati pa zagotavljajo podporo ali zaščito poškodovanemu delu telesa. Na primer, v ortopediji se celični materiali, kot so titanova in kompozitna celična struktura, uporabljajo v protezah kosti ali v vsadkih, saj omogočajo lažje in močnejše strukture, ki so manj obremenjujoče za pacientove kosti in mišice. Poleg tega se celični materiali v nekaterih primerih uporabljajo tudi za zobne implantate, kjer njihova porozna struktura omogoča boljše oprijemanje in rast kosti okoli implantata. Zmožnost prilagajanja lastnosti teh materialov telesu omogoča razvoj bolj udobnih in funkcionalnih medicinskih rešitev.

Aluminijaste celične plošče in betonske pene so pogosto uporabljene v fasadnih sistemih, strehah in notranjih predelnih stenah, saj ponujajo visoko trdnost pri nizki teži, kar omogoča enostavnejšo gradnjo in večjo oblikovalsko svobodo. Celični materiali tudi učinkovito izolirajo zvok in temperaturo, zaradi česar prispevajo k bolj udobnim in energetsko učinkovitim prostorih. Poleg tega omogočajo boljšo protipožarno zaščito, saj imajo mnogi materiali v tej kategoriji visoko odpornost proti ognju. Z uporabo celičnih materialov lahko arhitekti oblikujejo lahke, a trdne strukture, ki so okolju prijazne in prispevajo k trajnostni gradnji, kar je prikazano na sliki 9.8.



Slika 9.7: Kolčna endoproteza [114]



Slika 9.8: Fasada cerkve, prekrita s ploščami iz kovinske pene, in fasada gorske kočice, prekrita s kompozitnimi ploščami s sredico iz aluminijeve pene [63]

10 Zaključek

Učbenik *Geometrijske in mehanske lastnosti celičnih metamaterialov* obravnava kompleksno področje karakterizacije celičnih metamaterialov, ki združujejo inovativne geometrijske zasnove in edinstvene mehanske lastnosti. Učbenik je razdeljen na deset poglavij, ki bralca vodijo od osnovnih konceptov do naprednih raziskav, proizvodnih metod in praktične uporabe. Obravnavani so različni tipi celičnih metamaterialov, kot so avksetične strukture in strukture TPMS, ter njihove proizvodne metode, geometrijska in mehanska karakterizacija ter primerjava mehanskih lastnosti. Zaključno poglavje se posveča aplikacijam teh materialov v industriji, vključno z medicino, letalsko in avtomobilsko industrijo ter gradbeništvom.

Pomembni ključni pojmi, ki jih bralec osvoji, ko predela gradivo, so:

1. **Celični metamateriali** – Inovativni materiali z edinstvenimi geometrijskimi in mehanskimi lastnostmi.
2. **Avksetične strukture** – Celični materiali z negativnim Poissonovim razmerjem, kar omogoča širjenje pri nateznih obremenitvah.
3. **Strukture TPMS** – Triply periodic minimal surface; geometrijske strukture z visoko trdnostjo, nizko gostoto in prilagodljivimi lastnostmi.
4. **Dodajalna tehnologija** – Ključna proizvodna metoda za natančno izdelavo kompleksnih celičnih struktur.
5. **Metoda Končnih Elementov (MKE)** – Računalniški modeli za simulacijo mehanskega obnašanja metamaterialov.
6. **Geometrijska karakterizacija** – Analiza različnih 2D- in 3D-geometrij ter vpliva proizvodnih tehnologij na kakovost struktur.
7. **Mehanska karakterizacija** – Proučevanje mehanskih lastnosti z uporabo kvazistatičnih, dinamičnih in cikličnih obremenitev.

8. **Monotona in ciklična obremenitev** – Testi, ki proučujejo utrujanje materiala, življenjsko dobo in odpornost proti različnim hitrostim obremenitev.

Ugotovitve, ki se nanašajo na predhodno podane pojme, so:

1. **Struktura metamaterialov** – Geometrija in izdelovalna tehnologija ključno vplivata na mehanske lastnosti, kot so trdnost, absorpcija energije in odpornost na utrujanje.
2. **Dodajalna tehnologija** – Ta proizvodna metoda omogoča izdelavo struktur, ki jih tradicionalne tehnologije ne morejo doseči, kot so kompleksne avksetične in geometrije TPMS.
3. **Različni tipi obremenitev** – Mehanske lastnosti metamaterialov se močno razlikujejo glede na način obremenitve, pri čemer avksetične strukture kažejo večjo prožnost in odpornost.
4. **Primerjava lastnosti** – Avksetične strukture so primerne za aplikacije, ki zahtevajo visoko absorpcijo energije, strukture TPMS pa za uporabo, kjer sta ključni nizka teža in trdnost.
5. **Simulacije in eksperimenti** – Računalniški modeli z metodo končnih elementov učinkovito dopolnjujejo eksperimentalne raziskave in omogočajo optimizacijo strukture že v fazi načrtovanja.

Sklepi na podlagi ugotovitev in dela, predstavljenega v tem učbeniku:

1. **Prilagodljivost metamaterialov** – Zaradi kombinacije nizke gostote, trdnosti in prilagodljivih lastnosti so celični metamateriali idealni za širok spekter industrijskih aplikacij.
2. **Pomen natančnosti** – Kakovost in mehanske lastnosti struktur so močno odvisne od natančnosti

proizvodnje, ki jo najbolj zagotavlja dodajalna tehnologija.

3. **Uporaba v realnih aplikacijah** – Celični metamateriali že kažejo velik potencial v industriji (letalstvo, medicina, gradbeništvo) zaradi svoje zmožnosti prilagajanja specifičnim potrebam.
4. **Vpliv geometrije** – Geometrijska raznolikost, zlasti pri TPMS in avksetičnih strukturah, odpira možnosti za optimizacijo glede na obremenitve in druge pogoje.
5. **Raziskovalni potencial** – Področje metamaterialov ostaja odprto za nadaljnje raziskave, zlasti v smislu razvoja novih geometrij in optimizacije mehanskih lastnosti.

Ugotovitve in sklepi poudarjajo prebojnost celičnih metamaterialov na področju materialov z naprednimi lastnostmi, kar jih postavlja v ospredje razvoja tehnologij in aplikacij. V tem učbeniku je podan celovit vpogled v napredne celične metamateriale in je pomemben vir za raziskovalce, inženirje ter vse, ki se zanimajo za to področje. Podrobno obravnava osnovne in napredne koncepte, proizvodne tehnike ter praktične aplikacije, s čimer zagotavlja široko razumevanje in spodbuja nadaljnje raziskave ter razvoj v tej hitro razvijajoči se disciplini. Učbenik izpostavlja tudi prihodnje trende in možnosti razvoja celičnih metamaterialov, kar je ključnega pomena za njihovo implementacijo v sodobni industriji.

Literatura

- [1] L. J. Gibson and M. F. Ashby, "The mechanics of 2D cellular material," *Proc. R. Soc.*, no. 382, pp. 25–45, 1982.
- [2] D. Lehmhus, M. Vesenjaj, S. de Schampheleire, and T. Fiedler, "From stochastic foam to designed structure: Balancing cost and performance of cellular metals," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 922, pp. 1–32, 2017, doi: 10.3390/ma10080922.
- [3] K. Stöbener, J. Baumeister, G. Rausch, and M. Rausch, "Forming metal foams by simpler methods for cheaper solutions," *Metal Powder Report*, vol. 60, no. 1, pp. 12–16, 2005. doi: 10.1016/S0026-0657(05)00316-4.
- [4] A. Mauko, "Visokohitrostna karakterizacija mehanskih lastnosti celičnih metamaterialov," Univerza v Mariboru, 2022. [Online]. Available: www.fg.um.si
- [5] B. Nečemer, F. Zupanič, and Z. Ren, "Celični kovinski materiali," *Vakuumist*, vol. 36, no. 1, pp. 13–18, 2016.
- [6] J. Banhart, "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams," *Progress in Materials Science*, vol. 46, no. 6, pp. 559–632, 2001. doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [7] M. Borovinšek, "Računalniško modeliranje celičnih gradiv neurejene strukture," University of Maribor, 2009.
- [8] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, and M. F. Ashby, "Multifunctionality of cellular metal systems," vol. 43, 1999.
- [9] Y. Li, "The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus, and shear modulus in hexagonal materials," *Phys. Status Solidi*, vol. 38, no. 1, pp. 171–175, 1976, doi: 10.1002/pssa.2210380119.
- [10] N. Novak, M. Vesenjaj, and Z. Ren, "Auxetic cellular materials - a Review," *Strojniški Vestn. - J. Mech. Eng.*, vol. 62, no. 9, pp. 485–493, 2016, doi: 10.5545/sv-jme.2016.3656.
- [11] A. E. H. Love, *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Volume 1*. Cambridge University Press, 1892. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=JFTbrz0Fs5UC&pgis=1>
- [12] K. E. Evans, "Auxetic polymers: a new range of materials," *Endeavour*, vol. 15, no. 4, pp. 170–174, 1991, doi: 10.1016/0160-9327(91)90123-S.
- [13] A. Alderson, "A triumph of lateral thought," *Chem. Ind.*, vol. 10, pp. 384–391, 1999, [Online]. Available: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=10067728>
- [14] N. Chan and K. E. Evans, "Indentation resilience of conventional and auxetic foams," *J. Cell. Plast.*, vol. 34, no. 3, pp. 231–260, 1998, doi: 10.1177/0021955X9803400304.
- [15] R. S. Lakes and K. Elms, "Indentability of conventional and negative Poisson's ratio foams," *J. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 12, pp. 1193–1202, 1993, doi: 10.1177/002199839302701203.
- [16] K. L. Alderson, A. Fitzgerald, and K. E. Evans, "The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene," *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 16, pp. 4039–4047, 2000, doi: 10.1023/A:1004830103411.
- [17] H. M. A. Kolken and A. A. Zadpoor, "Auxetic mechanical metamaterials," *RSC Adv.*, vol. 7, pp. 5111–5129, 2017, doi: 10.1039/C6RA27333E.
- [18] W. Yang, Z. M. Li, W. Shi, B. H. Xie, and M. B. Yang, "On auxetic materials," *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 10, pp. 3269–3279, 2004, doi: 10.1023/B:JMSC.0000026928.93231.e0.
- [19] F. Scarpa, L. G. Ciffo, and J. R. Yates, "Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 1, pp. 49–56, 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/1/006.
- [20] S. Krödel, T. Delpero, A. Bergamini, P. Ermanni, and D. M. Kochmann, "3D auxetic microlattices with independently controllable acoustic band gaps and quasi-static elastic moduli," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 16, no. 4, pp. 357–363, 2014, doi: 10.1002/adem.201300264.
- [21] S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, and J. Shu, "A Comparative Study of Ballistic Resistance of Sandwich Panels with Aluminum Foam and Auxetic Honeycomb Cores," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 5, pp. 1–15, Jan. 2013, doi: 10.1155/2013/589216.
- [22] R. La Magna and J. Knippers, "Tailoring the Bending Behaviour of Material Patterns for the Induction of Double Curvature," in *Humanizing Digital Reality - Design Modelling Symposium Paris 2017*, 2018, no. September. doi: 10.1007/978-981-10-6611-5.

- [23] Y. C. Fung, *Foundations of Solid Mechanics*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1965.
- [24] R. S. Lakes, "Advances in negative Poisson's ratio materials," *Adv. Mater.*, vol. 5, no. 4, pp. 293–296, 1993, doi: 10.1002/adma.19930050416.
- [25] N. Benbattouche, G. A. Saunders, E. F. Lambson, and W. Honle, "The dependences of the elastic stiffness moduli and the Poisson ratio of natural iron pyrites FeS₂ upon pressure and temperature," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 22, no. 5, pp. 670–675, 1989, doi: 10.1088/0022-3727/22/5/015.
- [26] D. J. Gunton and G. a. Saunders, "The Young's modulus and Poisson's ratio of arsenic, antimony and bismuth," *J. Mater. Sci.*, vol. 7, pp. 1061–1068, 1972, doi: 10.1007/BF00550070.
- [27] K. E. Evans, M. A. Nkansah, I. J. Hutchinson, and S. C. Rogers, "Molecular Network Design," *Nature*, vol. 353, p. 124, 1991, doi: 10.1038/353124a0.
- [28] K. Muto, R. W. Bailey, and K. J. Mitchell, "Special requirements for the design of nuclear power stations to withstand earthquakes," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 177, pp. 155–203, 1963, doi: 10.1243/PIME_PROC_1963_177_018_02.
- [29] A. Yeganeh-Haeri, D. J. Weidner, and J. B. Parise, "Elasticity of α -Cristobalite: A Silicon Dioxide with a Negative Poisson's Ratio," *Science (80-.)*, vol. 257, no. July, pp. 30–32, 1992, doi: 10.1126/science.257.5070.650.
- [30] W. Voigt, *Lehrbuch der kristallphysik (mit ausschluss der kristalloptik)*. Leipzig; Berlin: B.G. Teubner, 1928.
- [31] C. Lees, J. F. Vincent, and J. E. Hillerton, "Poisson's ratio in skin," *Biomed. Mater. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 19–23, 1991, doi: 10.3233/BME-1991-1104.
- [32] R. F. Almgren, "An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio = -1," *J. Elast.*, vol. 15, pp. 427–430, 1985, doi: 10.1007/BF00042531.
- [33] R. S. Lakes, "Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio," *Science (80-.)*, vol. 235, pp. 1038–1040, 1987, doi: 10.1126/science.235.4792.1038.
- [34] K. E. Evans and B. D. Caddock, "Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 22, pp. 1883–1887, 1989, doi: 10.1088/0022-3727/22/12/013.
- [35] B. D. Caddock and K. E. Evans, "Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 22, no. 12, pp. 1877–1882, 1989, doi: 10.1088/0022-3727/22/12/012.
- [36] G. W. Milton, "Composite materials with poisson's ratios close to -1 ," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 40, no. 5, pp. 1105–1137, 1992, doi: 10.1016/0022-5096(92)90063-8.
- [37] J. B. Choi and R. S. Lakes, "Nonlinear analysis of the Poisson's Ratio in negative Poisson's Ratio Foams," *J. Compos. Mater.*, vol. 29, no. 1, pp. 113–128, 1995.
- [38] J. N. Grima and K. E. Evans, "Auxetic behavior from rotating squares," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 19, no. 17, pp. 1563–1565, 2000, doi: 10.1023/A:1006781224002.
- [39] J. N. Grima, A. Alderson, and K. E. Evans, "Auxetic behaviour from rotating rigid units," *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 242, no. 3, pp. 561–575, 2005, doi: 10.1002/pssb.200572706.
- [40] A. Alderson and K. E. Evans, "Microstructural modelling of auxetic microporous polymers," *J. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 13, pp. 3319–3332, 1995, doi: 10.1007/BF00349875.
- [41] J. N. Grima, V. Zammit, R. Gatt, A. Alderson, and K. E. Evans, "Auxetic behaviour from rotating semi-rigid units," *Phys. Status Solidi Basic Res.*, vol. 244, no. 3, pp. 866–882, 2007, doi: 10.1002/pssb.200572706.
- [42] M. Taylor, L. Francesconi, M. Gerendás, A. Shanian, C. Carson, and K. Bertoldi, "Low Porosity Metallic Periodic Structures with Negative Poisson's Ratio," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 15, pp. 2365–2370, 2013, doi: 10.1002/adma.201304464.
- [43] C. W. Smith, J. N. Grima, and K. E. Evans, "A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: Missing rib foam model," *Acta Mater.*, vol. 48, no. 17, pp. 4349–4356, 2000, doi: 10.1016/S1359-6454(00)00269-X.
- [44] C. Körner and Y. Liebold-Ribeiro, "A systematic approach to identify cellular auxetic materials," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, p. 025013, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/24/2/025013.
- [45] X. Ren, R. Das, P. Tran, T. D. Ngo, and Y. M. Xie, "Auxetic metamaterials and structures: A review," *Smart Mater. Struct.*, 2018.
- [46] R. S. Lakes, "Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects," *J. Mater. Sci.*, vol. 26, no. 9, pp. 2287–2292, 1991, doi: 10.1007/BF01130170.
- [47] D. Prall and R. S. Lakes, "Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of -1 ," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 39, no. 3, pp. 305–314, Mar. 1997, doi: 10.1016/S0020-7403(96)00025-2.
- [48] H. Abramovitch *et al.*, "Smart tetrachiral and hexachiral honeycomb: Sensing and impact detection," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 7, pp. 1072–1079, 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.07.017.

- [49] A. Alderson *et al.*, "Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 7, pp. 1042–1048, 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.07.009.
- [50] C. He, P. Liu, and A. C. Griffin, "Toward Negative Poisson Ratio Polymers through Molecular Design," *Macromolecules*, vol. 31, no. Copyright (C) 2013 American Chemical Society (ACS). All Rights Reserved., pp. 3145–3147, 1998, doi: 10.1021/ma970787m.
- [51] Y. T. Yao, M. Uzun, and I. Patel, "Workings of auxetic nano-materials," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 585–593, 2011.
- [52] N. Ravirala, A. Alderson, and K. L. Alderson, "Interlocking hexagons model for auxetic behaviour," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 17, pp. 7433–7445, 2007, doi: 10.1007/s10853-007-1583-0.
- [53] A. Alderson and K. E. Evans, "Rotation and dilation deformation mechanisms for auxetic behaviour in the β -cristobalite tetrahedral framework structure," *Phys. Chem. Miner.*, vol. 28, no. 10, pp. 711–718, 2001, doi: 10.1007/s002690100209.
- [54] N. Gaspar, C. W. Smith, A. Alderson, J. N. Grima, and K. E. Evans, "A generalised three-dimensional tethered-nodule model for auxetic materials," *J. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 2, pp. 372–384, 2011, doi: 10.1007/s10853-010-4846-0.
- [55] J. Schwerdtfeger, P. Heintz, R. F. Singer, and C. Körner, "Auxetic cellular structures through selective electron beam melting," *Phys. Status Solidi B*, vol. 247, no. 2, pp. 269–272, 2010, doi: 10.1002/pssb.200945513.
- [56] R. Critchley, I. Corni, J. A. Wharton, F. C. Walsh, R. J. K. Wood, and K. R. Stokes, "The preparation of auxetic foams by three-dimensional printing and their characteristics," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 15, no. 10, pp. 980–985, 2013, doi: 10.1002/adem.201300030.
- [57] T. Fila *et al.*, "Impact Testing of Polymer-filled Auxetics Using Split Hopkinson Pressure Bar," *Adv. Eng. Mater.*, p. n/a–n/a, 2017, doi: 10.1002/adem.201700076.
- [58] Josephine V. Carstensen and James K. Guest, "Topology Optimization of Cellular Materials," in *17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference AIAA*, 2016, no. June, pp. 1–10. doi: 10.1115/DETC2015-47757.
- [59] A. Rafsanjani and D. Pasini, "Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs," *Extrem. Mech. Lett.*, vol. 9, no. December, pp. 291–296, 2016, doi: 10.1016/j.eml.2016.09.001.
- [60] W. H. Meeks and J. Pérez, "The classical theory of minimal surfaces," *Bull. Am. Math. Soc.*, vol. 48, no. 3, pp. 325–407, 2011, doi: 10.1090/S0273-0979-2011-01334-9.
- [61] J. W. Neuberger, *Minimal Surfaces*, vol. 1670. 2010. doi: 10.1007/978-3-642-04041-2_16.
- [62] W. H. Meeks and G. Tinaglia, "Triply periodic constant mean curvature surfaces," *Adv. Math. (N. Y.)*, vol. 335, pp. 809–837, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.aim.2018.07.018.
- [63] M. Vesenjak. Konstrukcijske lastnosti in uporaba celičnih gradiv : skripta / avtor Matej Vesenjak. - 1. izd. - Maribor : Univerzitetna založba Univerze, 2017, ISBN 978-961-286-126-1, COBISS.SI-ID 93595649.
- [64] T. Fiedler *et al.*, "Determination of the thermal conductivity of periodic APM foam models," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 73, no. 0, pp. 826–833, 2014, doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2014.02.056.
- [65] K. L. Alderson and K. E. Evans, "The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio," *Polymer (Guildf.)*, vol. 33, no. 20, pp. 4435–4438, 1992, doi: 10.1016/0032-3861(92)90294-7.
- [66] A. P. Pickles, R. S. Webber, K. L. Alderson, P. Neale, and K. E. Evans, "The effect of the processing parameters on the fabrication of auxetic polyethylene - Part I The effect of compaction conditions," *J. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 16, pp. 4059–4068, 1995, doi: 10.1007/BF00360709.
- [67] N. Chan and K. E. Evans, "Fabrication methods for auxetic foams," *J. Mater. Sci.*, vol. 32, pp. 5945–5953, 1997, doi: 10.1023/A:1018606926094.
- [68] J. N. Grima, D. Attard, R. Gatt, and R. N. Cassar, "A Novel Process for the Manufacture of Auxetic Foams and for Their re-Conversion to Conventional Form," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 11, no. 7, pp. 533–535, 2009, doi: 10.1002/adem.200800388.
- [69] J. N. Grima, J. J. Williams, and K. E. Evans, "Networked calix[4]arene polymers with unusual mechanical properties," *Chem. Commun.*, vol. 1, pp. 4065–4067, 2005, doi: 10.1039/b505839b.
- [70] N. Novak, M. Vesenjak, L. Krstulović-Opara, and Z. Ren, "Mechanical characterisation of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods," *Compos. Struct.*, vol. 196, no. January, pp. 96–107, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.024.
- [71] Y. Hou, R. Neville, F. Scarpa, C. Remillat, B. Gu, and M. Ruzzene, "Graded conventional-auxetic Kirigami sandwich structures: Flatwise compression and edgewise loading," *Compos. Part B Eng.*, vol. 59, pp. 33–42, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.084.
- [72] B. Nečemer, "Malociklično utrujanje avksetičnih celičnih struktur," University of Maribor, 2021.

- [73] O. Al-Ketan and R. K. Abu Al-Rub, "MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces," *Mater. Des. Process. Commun.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–10, Dec. 2021, doi: 10.1002/mdp2.205.
- [74] X. Z. Zhang, H. P. Tang, M. Leary, T. Song, L. Jia, and M. Qian, "Toward Manufacturing Quality Ti-6Al-4V Lattice Struts by Selective Electron Beam Melting (SEBM) for Lattice Design," *JOM The J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 70, no. 9, pp. 1870–1876, 2018, doi: 10.1007/s11837-018-3030-x.
- [75] J. Schwerdtfeger, P. Heinel, R. F. Singer, and C. Körner, "Selective Electron Beam Melting: A New Way to Auxetic Cellular Structures," *Mater. Sci. Technol.*, pp. 724–729, 2009.
- [76] T. Hipke, G. Lange, and R. Poss, *Taschenbuch für Aluminiumschäume*. Düsseldorf: Alu Media, 2007.
- [77] *ISO 13314:2011 - Mechanical testing of metals - ductility testing - compression test for porous and cellular metals*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2011. [Online]. Available: www.iso.org
- [78] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and properties*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1997.
- [79] S. Glodež, J. Flašker, D. Jelaska, and M. Opalić, *Dimenzioniranje na življenjsko dobo*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2006.
- [80] J. M. Hyzak and I. M. Bernstein, "The effect of defects on the fatigue crack initiation process in two p/m superalloys: part i. fatigue origins," *Metall. Trans. A*, vol. 13, no. 1, pp. 33–43, Jan. 1982, doi: 10.1007/BF02642413.
- [81] P. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *J. Basic Eng.*, vol. 85, no. 4, p. 528, 1963, doi: 10.1115/1.3656900.
- [82] P. C. Paris, M. P. Gomez, and W. E. Anderson, "A rational analytic theory of fatigue," *Trend Eng.*, no. 13, pp. 9–14, 1961.
- [83] L. Krstulović-Opara, M. Surjak, M. Vesenjak, Z. Tonković, J. Kodvanj, and Ž. Domazet, "Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 73, pp. 166–174, 2015, doi: 10.1016/j.infrared.2015.09.014.
- [84] I. Duarte, M. Vesenjak, L. Krstulović-Opara, and Z. Ren, "Static and dynamic axial crush performance of in-situ foam-filled tubes," *Compos. Struct.*, vol. 124, pp. 128–139, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.01.014.
- [85] L. Krstulović-Opara, M. Vesenjak, I. Duarte, and Z. Ren, "Infrared thermography as a method for energy absorption evaluation of metal foams," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 4, pp. 1025–1030, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.03.041.
- [86] N. Novak *et al.*, "Quasi-static and impact behaviour of foam-filled graded auxetic panel," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 178, no. October 2022, p. 104606, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104606.
- [87] F. Warmuth, F. Osmanlic, and L. Adler, "Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting," *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, p. 8, 2017, doi: 10.1088/1361-665X/26/2/025013.
- [88] O. Duncan *et al.*, "Review of Auxetic Materials for Sports Applications: Expanding Options in Comfort and Protection," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 6, pp. 941–974, Jun. 2018, doi: 10.3390/app8060941.
- [89] N. Novak *et al.*, "Quasi-static and dynamic compressive behaviour of sheet TPMS cellular," *Compos. Struct.*, vol. 266, no. February, p. 113801, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113801.
- [90] P. J. Tan, S. R. Reid, J. J. Harrigan, Z. Zou, and S. Li, "Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I - Experimental data and observations," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 53, no. 10, pp. 2174–2205, 2005, doi: 10.1016/j.jmps.2005.05.007.
- [91] N. Novak, M. Vesenjak, S. Tanaka, K. Hokamoto, and Z. Ren, "Compressive behaviour of chiral auxetic cellular structures at different strain rates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 141, no. February, p. 103566, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103566.
- [92] X. Cao *et al.*, "Dynamic compressive behavior of a modified additively manufactured rhombic dodecahedron 316L stainless steel lattice structure," *Thin-Walled Struct.*, vol. 148, no. December 2019, p. 106586, 2020, doi: 10.1016/j.tws.2019.106586.
- [93] Z. Zheng, J. Yu, and J. Li, "Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 1–4, pp. 650–664, 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.05.007.
- [94] Y. Sun and Q. M. Li, "Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 112, no. October 2017, pp. 74–115, 2018, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006.
- [95] N. Novak, K. Hokamoto, M. Vesenjak, and Z. Ren, "Mechanical behaviour of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods at high strain rates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 122, no. August, pp. 83–90, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.001>.

- [96] D. Šeruga, M. Nagode, and J. Klemenc, "Eliminating friction between flat specimens and an antibuckling support during cyclic tests using a simple sensor," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 9, 2019, doi: 10.1088/1361-6501/ab1e35.
- [97] B. Nečemer, T. Vuherer, S. Glodež, and J. Kramberger, "Fatigue behaviour of re-entrant auxetic structures made of the aluminium alloy AA7075-T651," *Thin-Walled Struct.*, vol. 180, no. August, p. 109917, 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109917.
- [98] N. Novak, L. Starčević, M. Vesenjaj, and Z. Ren, "Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core," *Compos. Struct.*, vol. 210, no. November 2018, pp. 167–178, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.050>.
- [99] M. Vesenjaj, K. Hokamoto, M. Sakamoto, T. Nishi, L. Krstulović-Opara, and Z. Ren, "Mechanical and microstructural analysis of unidirectional porous (UniPore) copper," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 867–880, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.038.
- [100] N. Novak *et al.*, "Compressive Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foam at Different Strain Rates," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 24, p. 4108, 2019, doi: 10.3390/ma12244108.
- [101] M. Vesenjaj, C. Veyhl, and T. Fiedler, "Analysis of anisotropy and strain rate sensitivity of open-cell metal foam," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 541, pp. 105–109, 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.02.010.
- [102] N. Novak, M. Vesenjaj, M. Nishi, S. Tanaka, K. Hokamoto, and Z. Ren, "Mechanical behavior of cellular materials—from quasistatic to high strain rate impact response," in *Explosion, Shock-Wave and high-strain rate phenomena of advanced materials*, K. Hokamoto, Ed. Elsevier, 2021.
- [103] N. Novak, M. Vesenjaj, and Z. Ren, "High Strain Rate Hardening of Metallic Cellular Metamaterials," *J. Dyn. Behav. Mater.*, May 2024, doi: 10.1007/s40870-024-00425-x.
- [104] M. Borovinšek, M. Vesenjaj, M. Jože, and Z. Ren, "Computational Reconstruction of Scanned Aluminum Foams for Virtual Testing," *J. Serbian Soc. Comput. Mech.*, vol. 2, no. 2, pp. 16–28, 2008.
- [105] M. Borovinšek, "PrePoMax." <https://prepomax.fs.um.si/>
- [106] J. Hallquist, *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [107] S. Marzi, O. Hesebeck, M. Brede, and F. Kleiner, "A Rate-Dependent, Elasto-Plastic Cohesive Zone Mixed-Mode Model for Crash Analysis of Adhesively Bonded Joints," 2009.
- [108] N. Novak, M. Borovinšek, O. Al-ketan, Z. Ren, and M. Vesenjaj, "Impact and blast resistance of uniform and graded sandwich panels with TPMS cellular structures," *Compos. Struct.*, vol. 300, no. April, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116174.
- [109] N. Novak, M. Vesenjaj, G. Kennedy, N. Thadhani, and Z. Ren, "Response of Chiral Auxetic Composite Sandwich Panel to Fragment Simulating Projectile Impact," *Phys. Status Solidi B*, vol. 1900099, no. 10, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1002/pssb.201900099.
- [110] B. Nečemer, J. Klemenc, F. Zupanič, and S. Glodež, "Modelling and predicting of the LCF-behaviour of aluminium auxetic structures," *Int. J. Fatigue*, vol. 156, no. November 2021, p. 106673, 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106673.
- [111] B. Nečemer, F. Zupanič, D. Gabriel, E. A. Tarquino, M. Šraml, and S. Glodež, "Low cycle fatigue behaviour of ductile aluminium alloys using the inelastic energy approach," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 800, no. October 2020, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140385.
- [112] B. Nečemer, F. Zupanič, T. Vuherer, and S. Glodež, "High-Cycle Fatigue Behaviour of the Aluminium Alloy 5083-H111," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 7, 2023, doi: 10.3390/ma16072674.
- [113] "Ansys Mechanical Finite Element Analysis (FEA) Software for Structural Engineering 2023."
- [114] H. M. A. Kolken, S. Janbaz, S. M. A. Leeftang, K. Lietaert, H. H. Weinans, and A. A. Zadpoor, "Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials," *Mater. Horiz.*, 2017, doi: 10.1039/C7MH00699C.

GEOMETRIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CELIČNIH METAMATERIALOV

NEJC NOVAK, BRANKO NEČEMER

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija
n.novak@um.si, branko.necemer@um.si

Učbenik z naslovom "Mehanske in geometrijske lastnosti celičnih metamaterialov" je namenjen kot študijsko gradivo pri predavanjih predmetov Konstruiranje s celičnimi gradivi in Dimenzioniranje lahkih konstrukcij za študente Univerze v Mariboru. Učbenik temelji na raziskavah naprednih metamaterialov, ki združujejo edinstvene mehanske in geometrijske lastnosti. Vsebuje pregled sodobnih celičnih metamaterialov in izdelovalnih tehnologij, uporaba eksperimentalnih in numeričnih pristopov, ter izsledke opravljenih raziskav mehanske in geometrijske karakterizacije. Vsebina učbenika je v skladu z učnimi načrti omenjenih predmetov.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fs.4.2025](https://doi.org/10.18690/um.fs.4.2025)

ISBN

978-961-286-990-8

Ključne besede:

celični metamateriali,
mehanske lastnosti,
geometrijske lastnosti,
mehansko testiranje,
računalniške simulacije



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fs.4.2025](https://doi.org/10.18690/um.fs.4.2025)

ISBN

978-961-286-990-8

Keywords:

cellular metamaterials,
mechanical properties,
geometrical properties,
mechanical testing,
computational simulations

GEOMETRICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULAR METAMATERIALS

NEJC NOVAK, BRANKO NEČEMER

University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia
n.novak@um.si, branko.necemer@um.si

The textbook entitled "Mechanical and geometrical properties of cellular metamaterials" is intended as study material for lectures on the course Design with Cellular Materials and Dimensioning of Lightweight Structures for students of the University of Maribor. The textbook is based on research into advanced metamaterials that combine unique mechanical and geometric properties. It contains an overview of modern cellular metamaterials and manufacturing technologies, the use of experimental and numerical approaches, and the results of mechanical and geometric characterisation research. The textbook's content is in accordance with the curricula of the mentioned subjects.



University of Maribor Press



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo