



Doktorska disertacija

# RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE CELIČNIH GRADIV NEUREJENE STRUKTURE

maj, 2009

Avtor: Matej BOROVIŠEK, univ. dipl. inž. str.

Mentor: red. prof. dr. Zoran REN

Avtor:	Matej BOROVIŠEK, univ. dipl. inž. str.
Naslov:	RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE CELIČNIH GRADIV NEUREJENE STRUKTURE
Klasifikacija:	UDK: 621.8:[539.216+544.77.022.535](043.3)
Ključne besede:	odprto-celična gradiva, računalniška tomografija, geometrijska rekonstrukcija, mehanske lastnosti, eksperimentalni preizkusi, računalniške simulacije, udarne obremenitve
Oblikovanje in prelom besedila:	Matej BOROVIŠEK, univ. dipl. inž. str.
Število izvodov:	
Tisk:	Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru



UNIVERZA V MARIBORU  
**FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO**  
2000 Maribor, Smetanova ul. 17, P.P. 224

Datum: 31. januar 2008

### TEMA ZA DOKTORSKO DISERTACIJO

Senat Fakultete za strojništvo je na svoji 6. redni seji dne 29. januarja 2008 v skladu s statutom Univerze v Mariboru

sprejel

**temo za doktorsko disertacijo**

z naslovom:

**"RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE CELIČNIH GRADIV  
NEUREJENE STRUKTURE",**

ki jo je prijavil

**Matej BOROVIŠEK, univ. dipl. inž. str.**

Doktorandovo delo spremlja:

Mentor: **red. prof. dr. Zoran REN**

Rok za oddajo doktorske disertacije v zadostnem številu vezanih izvodov je 4 leta.

Dekan:

izr. prof. dr. Niko SAMEC



PREJMEJO:

- prof. dr. Ren
- Matej Borovinšek
- Univerza v Mariboru
- arhiv







UNIVERZA V MARIBORU  
**FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO**  
2000 Maribor, Smetanova ul. 17, P.P. 224

Datum: 28. junij 2007

Po sklepu 1. redne seje senata Fakultete za strojništvo z dne 26. junija 2007 in v skladu s statutom Univerze v Mariboru

i m e n u j e m  
**KOMISIJO ZA OCENO TEME DOKTORSKE DISERTACIJE**

z naslovom  
**"RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE CELIČNIH GRADIV  
NEUREJENE STRUKTURE",**

ki jo je prijavil  
**Matej BOROVIŠEK, univ. dipl. inž. str.**

v sestavi:

- red. prof. dr. Jože FLAŠKER, predsednik
  - red. prof. dr. Zoran REN, član
  - red. prof. dr. Ivan PREBIL, član
- Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Komisija naj oceni ali kandidat izpolnjuje pogoje za pridobitev doktorata znanosti in ali daje predložena tema in vprašanja, ki jih kandidat namerava obravnavati v disertaciji, kandidatu dovolj možnosti za samostojen in izviren prispevek k ustrezni znanstveni disciplini.

Komisija je dolžna dati svojo oceno in mnenje praviloma v enem mesecu, najpozneje pa v treh mesecih od njenega imenovanja.



Dekan:  
izr. prof. dr. Niko SAMEC

PREJMEJO:

- prof. dr. Flašker
- prof. dr. Ren
- prof. dr. Prebil
- Borovinšek M.
- odloga



UNIVERZA V MARIBORU  
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

IZJAVA DOKTORSKEGA KANDIDATA

Podpisani **Matej Borovinšek**, vpisna številka **95027570**

**izjavljam,**

da je doktorska disertacija z naslovom RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE CELIČNIH  
GRADIV NEUREJENE STRUKTURE

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Podpis doktorskega kandidata:

---



## Zahvala

*Zahvaljujem se mentorju, prof. dr. Zoranu Renu, za nesebično pomoč, vodenje, usmerjanje in potrpežljivost pri izdelavi doktorske disertacije.*

*Zahvala gre tudi vsem sodelavcem Inštituta za konstruiranje in oblikovanje na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Mariboru za nudenje tehnične in strokovne pomoči ter časa za sproščene razprave o reševanju nastalih zapletov med raziskovalnim delom.*

*Iskrena zahvala staršem in vsem domačim za vso vzpodbudo, potrpežljivost, pomoč in razumevanje. Posebna zahvala gre Andreji za njeno pomoč, neomajno podporo ter dajanju vsakdanjih spodbud.*



# RAČUNALNIŠKO MODELIRANJE CELIČNIH GRADIV NEUREJENE STRUKTURE

**Ključne besede:** odprto-celična gradiva, računalniška tomografija, geometrijska rekonstrukcija, mehanske lastnosti, eksperimentalni preizkusi, računalniške simulacije, udarne obremenitve

**UDK:** 621.8:[539.216+544.77.022.535](043.3)

## POVZETEK

Obstoječi konstitutivni modeli celičnih gradiv, ki so danes vključeni v različnih sistemih za inženirske računalniške simulacije, ne upoštevajo vpliva geometrijske neurejenosti na spremembo makroskopskih lastnosti celičnega gradiva ob istočasnem upoštevanju različnih deformacijskih hitrosti oziroma ob upoštevanju dinamičnih obremenitev. Zaradi tega je bil razvit nov rešetkasti model neurejenih odprto-celičnih gradiv, ki omogoča upoštevanje vpliva neurejenosti in različnih deformacijskih hitrosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv pri velikih deformacijah.

Zaradi velikega vpliva neurejenosti strukture odprto-celičnih gradiv na njihove lastnosti in pomanjkanja podatkov o geometrijski strukturi odprto-celičnih gradiv, je bila za namen modeliranja neurejenih odprto-celičnih gradiv razvita tehnika avtomatizirane 3D rekonstrukcije njihovih geometrijskih značilnosti na osnovi tomografskih posnetkov. Analize rekonstruiranih modelov so pokazale, da imajo realne trdne pene bogato in raznoliko porazdelitev osnovnih geometrijskih značilnosti in se njihove geometrijske lastnosti bistveno razlikujejo od urejenih struktur s tetrakaidekaedrično oziroma kubično osnovno celico, ki so služile kot osnova številnim raziskavam v preteklosti.

Na podlagi statistično obdelanih podatkov o strukturi realnih aluminijastih pen je bila narajena primerjava s statistično obdelanimi podatki dveh računalniških modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv, ki sta osnovana na ravnotežnih Kelvinovih in Weaire-Phelanovih celicah. Dokazano je, da modeli osnovani na Weaire-Phelanovi delitvi prostora bolje opisujejo strukturo realnih pen. Pokazalo se je tudi veliko odstopanje realnih pen od popolnoma naključnih računalniških modelov, kar potrjuje predpostavko, da trdne pene vendarle niso povsem naključne strukture, ampak na njihov nastanek močno vpliva fizikalno ozadje načina penjenja med proizvodnim postopkom. S primerjalno analizo je bila določena tudi ustrezna stopnja neurejenosti novo razvitega modela odprto-celičnih struktur, pri kateri lastnosti računalniško generiranih modelov najbolj sovpadajo z lastnostmi podobnih realnih aluminijastih pen.

Za namen validacije uporabe razvitih Weaire-Phelanovih modelov v računalniških simulacijah so bili opravljeni eksperimentalni kvazi-statični in dinamični (udarni) tlačni enoosni eksperimentalni preizkusi vzorcev aluminijastih odprto-celičnih pen, kjer je bil ugotovljen pričakovano velik vpliv relativne gostote na togost celičnih gradiv. Primerjava rezultatov eksperimentalnih preizkusov in računalniških simulacij je pokazala dobro ujemanje makroskopskih mehanskih lastnosti, kar dokazuje primernost uporabe neurejenih rešetkastih modelov odprto-celičnih aluminijastih pen na osnovi Weaire-Phelanovih celic v računalniških simulacijah obnašanja teh gradiv pri različnih hitrostih tlačnega obremenjevanja.





# COMPUTATIONAL MODELING OF IRREGULAR CELLULAR STRUCTURES

**Key words:** open-cell cellular materials, computer tomography, geometry reconstruction, mechanical properties, experimental testing, computer simulations, impact loading

**UDK:** 621.8:[539.216+544.77.022.535](043.3)

## ABSTRACT

Constitutive models of cellular materials integrated into existing computer simulation software do not account for the effects of cell shape irregularity of such materials on their macroscopic mechanical properties in combination with different strain rates under impact loading conditions. Thus a new lattice computer model of irregular open-cell materials was developed which accounts for irregularity and strain rate effects on the mechanical properties of open-cell materials at large deformations.

Due to large effect of the cell shape irregularity on mechanical properties of open-cell materials and lack of data on geometrical structure of open-cell materials, an automated 3D geometry reconstruction technique based on analysis of tomographic pictures was developed for the purpose of more realistic modelling of irregular open-cell materials. Analyses of the reconstructed models showed that real open-cell structures have rich and diverse distribution of basic geometrical properties and that their geometrical properties significantly differ from the regular structures with cubic or tetrakaidekahedral basic cells, which were used in many research studies in the past.

Geometrical data of aluminium foam samples was statistically analysed and compared with similarly statistically analysed geometrical data of two irregular open-cell computer models, which were based on equilibrium Kelvin cells and Weaire-Phelan cells. It was proven that models based on Weaire-Phelan cells describe the structure of real foams better in comparison with models based on Kelvin cells. Also, a significant discrepancy between the real foam geometry and the geometry of completely random generated computer models was determined, which confirms the assumption that the structure of a solid real foam is not random and that its formation is strongly influenced by the physical background of the foaming type during the production process. Comparative analysis was used to determine the irregularity parameter of newly developed representative lattice model of open-cell materials, at which the properties of computer generated models concur best with properties of similar real aluminium foams.

Quasi-static and dynamic (impact) experimental uni-axial compression tests of aluminium open-cell foam samples were carried out to validate the developed Weaire-Phelan computer models. The results showed expected significant influence of relative density on open-cell foam load carrying capacity. Comparison of experimental results and results of computer simulations showed a good agreement of macroscopic mechanical properties, which confirms that irregular lattice modelling of open-cell aluminium foams based on Weaire-Phelan cell model is appropriate for simulating the behaviour of such materials under different compressive loading rates.



# KAZALO

1	UVOD . . . . .	1
1.1	Cilji in teze doktorske disertacije . . . . .	2
1.2	Pregled vsebine . . . . .	3
2	KOVINSKA CELIČNA GRADIVA . . . . .	5
2.1	Proizvodnja kovinskih celičnih gradiv . . . . .	7
2.1.1	Proizvodnja zaprto-celičnih kovinskih gradiv . . . . .	8
2.1.2	Proizvodnja odprto-celičnih kovinskih gradiv . . . . .	11
2.2	Mehanske lastnosti celičnih gradiv . . . . .	14
2.2.1	Vpliv relativne gostote . . . . .	16
2.2.2	Vpliv geometrije celične strukture . . . . .	17
2.2.3	Vpliv deformacijske hitrosti . . . . .	18
2.2.4	Vpliv polnil . . . . .	19
3	REKONSTRUKCIJA STRUKTURE CELIČNIH GRADIV . . . . .	21
3.1	Opis analiziranih vzorcev odprto-celične pene . . . . .	23
3.2	Uporabljene metode . . . . .	26
3.2.1	Segmentacija zajetih 2D slik . . . . .	27
3.2.2	Izgradnja topološkega modela . . . . .	30
3.2.3	Izgradnja rešetkastega modela . . . . .	31
3.3	Rezultati in diskusija . . . . .	33
3.3.1	Dolžine robov celic . . . . .	35
3.3.2	Notranji koti med robovi celic . . . . .	37
3.3.3	Površina in oblika oken celic . . . . .	38
3.3.4	Prostornina in oblika celic . . . . .	39
3.4	Zaključek . . . . .	41
4	MODELIRANJE NEUREJENIH CELIČNIH STRUKTUR . . . . .	43
4.1	Voronjeva delitev prostora in odprto-celične strukture . . . . .	44
4.1.1	Modeliranje z neurejeno razporeditvijo začetnih točk . . . . .	46
4.1.2	Modeliranje z urejeno razporeditvijo začetnih točk . . . . .	47
4.2	Ravnotežen model tekoče pene . . . . .	47



4.2.1	Kelvinove celice . . . . .	48
4.2.2	Weaire-Phelanove celice . . . . .	48
4.3	Model neurejene odprto-celične strukture . . . . .	49
4.3.1	Priprava modela . . . . .	52
4.4	Statistično vrednotenje modelov . . . . .	52
4.4.1	Potrebno število vzorcev . . . . .	53
4.4.2	Statistična analiza vzorcev . . . . .	55
4.4.3	Dolžine robov celic . . . . .	56
4.4.4	Notranji koti med robovi celic . . . . .	57
4.4.5	Površina in oblika oken celic . . . . .	58
4.4.6	Prostornina in oblika celic . . . . .	60
4.5	Primerjava rezultatov računalniških modelov z rekonstruiranimi modeli . . . . .	62
4.6	Zaključek . . . . .	66
5	EKSPERIMENTALNI PREIZKUSI ODPRTO-CELIČNIH GRADIV . . . . .	69
5.1	Način preizkušanja . . . . .	69
5.2	Rezultati preizkušanja . . . . .	71
6	RAČUNALNIŠKE SIMULACIJE OBNAŠANJA NEUREJENIH ODPRTO-CELIČNIH GRADIV POD VPLIVOM TLAČNIH OBREMENITEV . . . . .	83
6.1	Teoretične osnove eksplcitnih dinamičnih simulacij . . . . .	85
6.1.1	Stabilnost časovne integracije . . . . .	86
6.1.2	Izračun časovnega koraka . . . . .	86
6.1.3	Vpliv deformacijske hitrosti na trdnostne lastnosti gradiv . . . . .	87
6.1.4	Kontakti . . . . .	88
6.2	Računalniški model neurejenega odprto-celičnega gradiva . . . . .	90
6.2.1	Hitrost obremenjevanja v kvazi-statičnih simulacijah . . . . .	94
6.2.2	Glajenje mreže . . . . .	95
6.2.3	Potrebno število plasti celic v modelu . . . . .	97
6.2.4	Potrebno število linijskih končnih elementov po dolžini roba celice . . . . .	99
6.3	Validacija numeričnega modeliranja odprto-celičnih gradiv . . . . .	101
6.4	Validacija Voronojevih modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv . . . . .	108
6.4.1	Rezultati kvazi-statičnih simulacij . . . . .	110
6.4.2	Rezultati dinamičnih simulacij . . . . .	114
6.4.3	Zaključek . . . . .	116
6.5	Vpliv deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti . . . . .	118



7	ZAKLJUČEK . . . . .	125
7.1	Doseženi cilji in rezultati . . . . .	125
7.2	Priporočila za nadaljnje delo . . . . .	128





## UPORABLJENI SIMBOLI IN KRATICE

V predloženem delu so simboli in kratice opisani in razloženi na mestu, kjer so uporabljeni. Matrike so označene z velikimi krepkimi latinskimi črkami. Vektorje predstavljajo male krepke latinske črke. Komponente vektorjev in matrik ter ostali simboli so označeni z ležečimi latinskimi in grškimi črkami.



# 1 UVOD

Za številne veje moderne industrije so izrednega pomena lahki materiali, ki imajo privlačno kombinacijo fizikalnih in mehanskih lastnosti, kot je nizka gostota in visoka specifična togost v primerjavi z njihovo maso. Tem kriterijem zelo dobro ustrezajo kovinska celična gradiva, ki se za te namene vedno pogosteje uporabljajo. Celična gradiva so strukture, zgrajene iz popolnoma oprijemajočih se poliedrov. Če je osnovni material celičnega gradiva vsebovan le na robovih poliedrov (celice so povezane z odprtimi ploskvami oziroma okni), spada takšno gradivo med odprto-celična gradiva, v nasprotnem primeru, ko tudi ploskve poliedrov vsebujejo osnovni material, pa je takšno gradilo zaprto-celično gradivo (slika 1.1).

Zaradi zanimivosti lahkih materialov se v zadnjem času na področju celičnih gradiv izvajajo številne raziskave, ki se ukvarjajo s proučevanjem mehanskih lastnosti kovinskih celičnih gradiv [1]. Na lastnosti takšnih gradiv ima velik vpliv njihova struktura, zato samo uporaba eksperimentalnih metod za razumevanje procesa deformiranja celičnih gradiv ni dovolj. Struktura celičnih gradiv je namreč neurejena, kar onemogoča ponovljivost eksperimentalnih preizkusov, poleg tega pa je merjenje določenih fizikalnih veličin med preizkusi zelo zahtevno ali celo nemogoče. Zaradi tega se za izvajanje takšnih študij uporabljajo računalniške simulacije, s pomočjo katerih je mogoče podrobneje analizirati



**Slika 1.1:** Odprto-celična in zaprto-celična gradiva iz različnih osnovnih materialov

obnašanje celičnih gradiv pod vplivom zunanjih obremenitev. S takšnim pristopom je tako mogoče analizirati tudi vplive geometrijske in topološke neurejenosti strukture celičnih gradiv na njihove mehanske lastnosti. Sama struktura celičnega gradiva namreč skupaj z vrsto osnovnega materiala in relativno gostoto določa makroskopsko obnašanje takšnih gradiv.

## 1.1 Cilji in teze doktorske disertacije

Glavni cilj doktorske disertacije je združitev trenutno zelo aktualnih področij v okviru inženirskih računalniških simulacij, in sicer področje modeliranja neurejenih celičnih gradiv in področje udarnih dinamičnih obremenitev. Kljub temu da je posameznim področjem namenjena velika pozornost, pa sta poznavanje obnašanja in karakterizacija celičnih struktur še vedno nepopolna [2].

Obstoječi konstitutivni modeli celičnih gradiv, ki so danes vključeni v različnih sistemih za inženirske računalniške simulacije, ne morejo upoštevati vpliva geometrijske neurejenosti na spremembo makroskopskih lastnosti celičnega gradiva ob istočasnem upoštevanju različnih deformacijskih hitrosti oziroma ob upoštevanju dinamičnih obremenitev. Zaradi tega je cilj doktorske disertacije razviti model neurejenih odprto-celičnih gradiv, ki omogoča upoštevanje vpliva neurejenosti in deformacijske hitrosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv tudi pri velikih deformacijah.

Za proučevanje mehanskih lastnosti kovinskih celičnih gradiv je bilo razvito veliko število analitičnih in numeričnih modelov na osnovi pravih geometričnih oblik celičnega gradiva, t.i. osnovnih celicah [3]. Vendar takšni modeli ne omogočajo modeliranja realne neurejene strukture celičnih gradiv. Zaradi tega so bili za proučevanje vpliva neurejenosti geometrije celičnega gradiva na njegove statične trdnostne lastnosti razviti neurejeni rešetkasti modeli celičnih gradiv [4, 5, 6, 7], ki pa so bili uporabljeni le v statičnih simulacijah oziroma simulacijah do nizke stopnje deformacije. Na podlagi teh rezultatov je bila postavljena teza, da bi nadgradnja neurejenih rešetkastih modelov s kontaktom med robovi celic rešetkastega modela omogočila tudi izvajanje dinamičnih udarnih obremenitev do velikih deformacij.

Osnovo za vse obstoječe neurejene modele celičnih gradiv predstavlja ravnotežna struktura, neurejenost v njih pa temelji na ustrezni izbiri stopnje neurejenosti med postopkom priprave rešetkastega modela. Za ravnotežno strukturo večina avtorjev uporablja strukturo Kelvinovih celic, kljub dejstvu, da sta že leta 1994 Weaire in Phelan odkrila strukturo celic, ki ima nižjo površinsko energijo od Kelvinovih celic. Zaradi tega je bila za pripravo modela neurejenega odprto-celičnega gradiva v doktorski nalogi uporabljena Weaire-Phelanova struktura s predpostavljeno tezo, da takšna struktura predstavlja boljše izhodišče za modeliranje realne strukture odprto-celičnih gradiv.

Med pripravo neurejenega modela odprto-celičnega gradiva je potrebno izbrati stopnjo neurejenosti. Za simulacije obnašanja realnih celičnih gradiv je potrebno to stopnjo izbrati na tak način, da so dobljeni modeli geometrijsko čim bolj podobni realni neurejeni strukturi celic. Tako je bil cilj naloge določiti ustrezno stopnjo neurejenosti v modelu odprto-celičnega gradiva na podlagi statistične analize geometrijskih in topoloških lastnosti vzorcev odprto celičnih gradiv. Ker pa je za statistično analizo potrebna čim večja populacija analizirane veličine, je bil cilj naloge razviti tudi avtomatizirano metodo analize strukture realnih odprto-celičnih gradiv.

Strukturo celičnega gradiva je mogoče določiti na več različnih načinov, vendar le rešetkast sorazmeren računalniški model omogoča avtomatizirano analizo njegove strukture. Računalniški model celičnega gradiva je bil pripravljen na podlagi 3D slik zajetih z računalniško tomografijo, pri čemer je bila predpostavljena teza, da je takšen model mogoče pretvoriti v rešetkast model odprto-celičnega gradiva s pomočjo tehnike analize 3D slik.

Na tak način bi bilo torej mogoče pripraviti modele, ki bi bili po svoji strukturi zelo podobni realnim odprto-celičnim gradivom, zaradi tega je bila postavljena tudi teza, da modeli osnovani na Weaire-Phelanovi strukturi skupaj s statistično analizo posnete realne strukture odprto-celičnih gradiv omogočajo simuliranje realnega obnašanja odprto-celičnih gradiv tako pod kvazi-statičnimi kot tudi pod udarnimi obremenitvami.

## 1.2 Pregled vsebine

Doktorska dispozicija je razdeljena na uvod in šest poglavij. Po uvodu v prvem poglavju so v drugem poglavju podane osnove kovinskih celičnih gradiv. In sicer so najprej opisane njihove najpomembnejše lastnosti, kot so relativna gostota in oblika celic, na podlagi katerih je predvidena tudi njihova uporaba. Zaradi izjemnega pomena proizvodnje celičnih gradiv na njihovo strukturo, so opisane različne metode proizvodnje zaprto in odprto-celičnih gradiv. V nadaljevanju so podane mehanske lastnosti celičnih gradiv in za njih značilen potek napetosti in deformacij. Opisani so tudi vplivi relativne gostote, geometrije celične strukture, deformacijske hitrosti in polnil na mehanske lastnosti odprto-celičnih gradiv.

Tretje poglavje podaja metode uporabljene za rekonstrukcijo strukture realnih aluminijevih odprto-celičnih pen. Najprej so podrobno opisani za rekonstrukcijo uporabljeni vzorci aluminijeve pene. Nato so predstavljene obstoječe metode za določanje geometrijskih in topoloških lastnosti celičnih gradiv in sledi podroben opis uporabljene metode, ki temelji na 3D slikah zajetih z računalniško tomografijo. Pri tem so opisani vsi potrebni koraki za rekonstrukcijo in avtomatizirano analizo strukture rekonstruiranih rešetkastih modelov. Analizirane so bile dolžine robov celic, notranji koti med robovi celic, površina oken celic, prostornina celic, število robov v oknu in število oken v celici. Na koncu poglavja so

predstavljeni rezultati statistične analize geometrijskih in topoloških lastnosti analiziranih vzorcev aluminijevih pen.

Modeliranje neurejenih odprto-celičnih struktur opisuje četrto poglavje. V uvodu je predstavljena teorija Voronojeve delitve prostora, ki predstavlja osnovo za vse neurejene modele celičnih gradiv. Nato je opisanih več metod izbire začetnih točk Voronojeve delitve in predstavljena izbrana metoda na osnovi ravnotežnega modela pene. V sklopu ravnotežne strukture sta obravnavani Kelvinova in Weaire-Phelanova struktura, ki sta kasneje uporabljeni za pripravo Voronojevih modelov neurejenih struktur z uvedbo stopnje neurejenosti. Struktura Voronojevih modelov je nato analizirana, podobno kot je bila analizirana struktura rekonstruiranih vzorcev, da je omogočena neposredna primerjava med modeli in vzorci. S pomočjo primerjave sta na koncu poglavja izbrana model in stopnja neurejenosti, ki se najbolj približata lastnostim realnih vzorcev.

Sledi peto poglavje, v katerem so predstavljeni izvedeni eksperimentalni preizkusi. Najprej je predstavljen preizkuševalni stroj, način in režim preizkušanja ter uporabljene hitrosti za kvazi-statično in dinamično preizkušanje. Nato so opisani dodatni preizkušanci uporabljeni za dinamično preizkušanje, medtem ko so bili predhodno rekonstruirani vzorci preizkušeni kvazi-statično. Sledijo rezultati kvazi-statičnega preizkušanja in nato še rezultati dinamičnega preizkušanja v obliki mehanskih lastnosti preizkušenih vzorcev in v obliki odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij. Za tem je predstavljena primerjava med opravljenimi preizkusi in zaključki.

Predzadnje, šesto, poglavje podaja uporabo opisanih modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv v računalniških simulacijah. V uvodu poglavja so podani razlogi za uporabo eksplisitnih dinamičnih simulacij, nato pa sledi podrobnejši pregled njihovih teoretičnih osnov. In sicer stabilnost eksplicitne časovne integracije, določitev stabilnega časovnega koraka ter način upoštevanja vpliva deformacijske hitrosti na trdnostne lastnosti gradiv. Opisani so tudi kontakti, uporabljeni v modelu odprto-celičnega gradiva, ki omogočajo simuliranje velikih deformacij modela. Nato je predstavljen razvit numerični model neurejenega odprto-celičnega gradiva, ki temelji na rešetkastih modelih. Sledi predstavitev parametričnih simulacij, uporabljenih za določitev potrebnih parametrov razvitega numeričnega modela, nato je izvedena njegova validacija s pomočjo primerjave rezultatov preizkusov z rezultati simulacij rekonstruiranih vzorcev. Nato je predstavljena še validacija Weaire-Phelanovih modelov odprto-celičnih gradiv. Na koncu poglavja je razvit numerični model na osnovi Weaire-Phelanove strukture uporabljen za parametrične simulacije vpliva stopnje neurejenosti in velike deformacijske hitrosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv.

V zadnjem, sedmem poglavju, so povzeti pomembni rezultati, spoznanja in izvirni znanstveni prispevki doktorske disertacije. Prikazane so tudi smernice in opisani predlogi za nadaljnje delo.

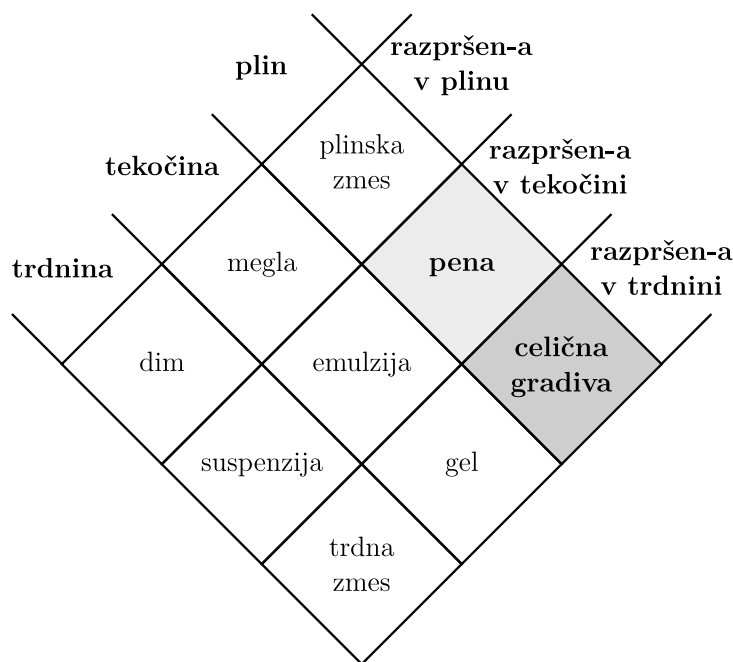
## 2 KOVINSKA CELIČNA GRADIVA

Gradiva z visoko stopnjo poroznosti imajo privlačno kombinacijo fizikalnih in mehanskih lastnosti, kot so nizka gostota, visoka togost glede na nizko specifično težo ali velika površina glede na volumen v kombinaciji z visoko termično prevodnostjo [8], [9]. Med porozna gradiva spadajo tudi celična gradiva (slika 2.1), katerih strukturo sestavlja povezana mreža volumskih opornikov ali plošč, ki oblikujejo robove oziroma ploskve celic. Tri glavne oblike celičnih gradiv so prikazane na sliki 2.2: (a) satovja, (b) odprto-celična gradiva in (c) zaprto-celična gradiva [1]. Najpomembnejši parameter poroznih gradiv je njihova relativna gostota  $\rho_r$ , ki je definirana kot razmerje med gostoto celičnega gradiva  $\rho^*$  in gostoto osnovnega materiala  $\rho_s$ :

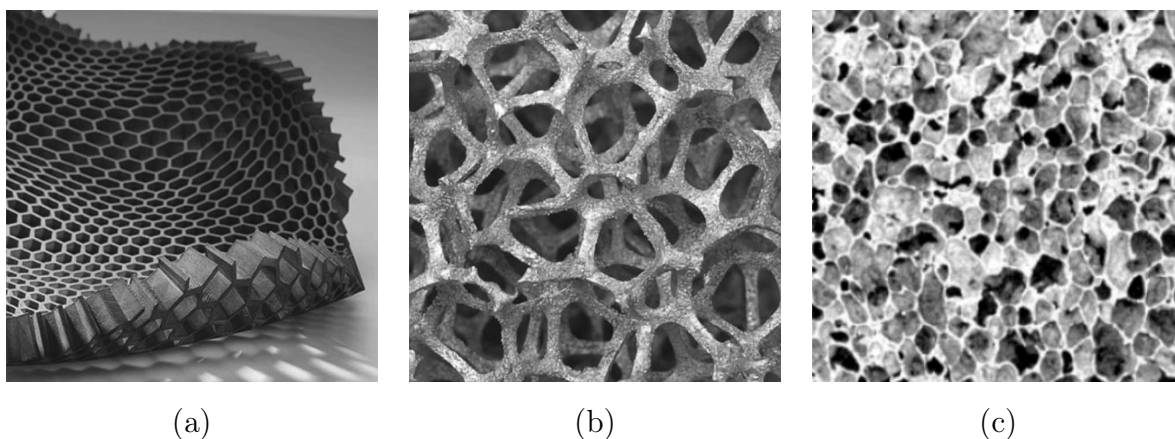
$$\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_s}. \quad (2.1)$$

Relativne gostote celičnih gradiv segajo od 0,001 do 0,3. Nad to mejo postane debelina celičnih sten že tako velika, da je takšen material bolje obravnavati kot material s posameznimi, izoliranimi porami [1].

Stanje na področju razvoja proizvodnje, značilnosti in uporabnosti kovinskih pen je podrobno opisal Banhart [8]. Mehanske lastnosti celičnih gradiv so obravnavane v [10, 11, 12], njihova uporaba in postopki njihove izdelave pa v [13, 14, 15]. Kako ustrezno uporabiti



**Slika 2.1:** Delitev zmesi različnih snovi glede na agregatno stanje



**Slika 2.2:** Tri glavne oblike celičnih gradiv so: (a) satovja, (b) odprto-celična gradiva in (c) zaprto-celična gradiva [1]

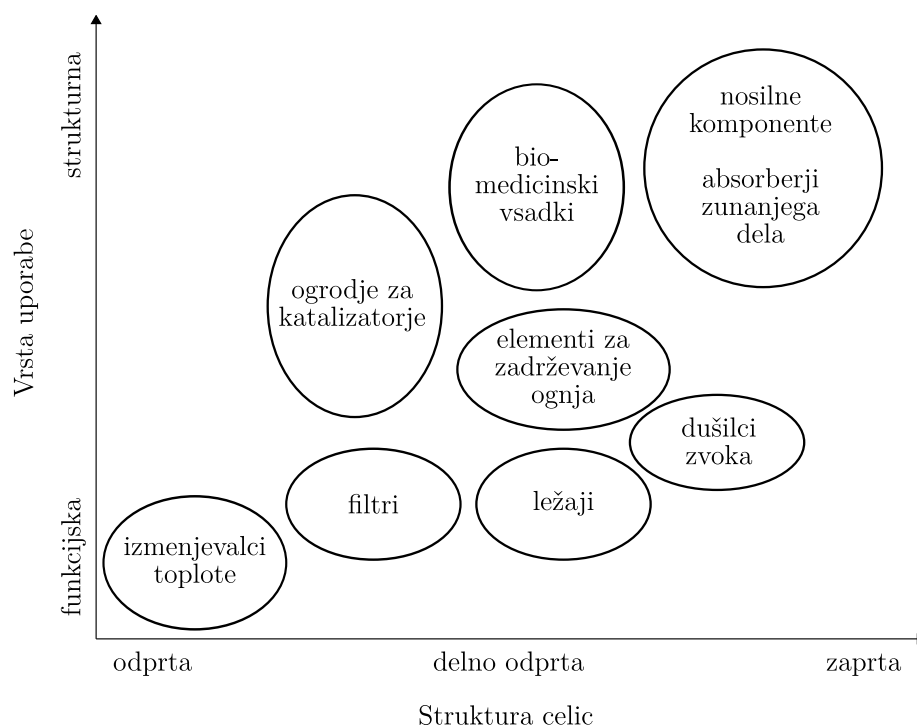
kovinske pene je opisano v [2], internetna stran [16] pa posreduje posodobljene informacije o izdelavi celičnih gradiv, največ o kovinskih penah.

Zelo pomemben je razvoj kovinskih celičnih gradiv, posebej kovinskih pen, saj imajo kovine in zlitine kovin še dodatne prednosti pred drugimi gradivi, npr. polimeri. Tako se z zamenjavo osnovnega materiala lastnostim polimernih pen, ki so: nizka gostota (zelo lahke strukture), visoka akustična izolacija in dušenje, hidrofobnost (nizka absorpcija vode), velika stopnja deformacije, visoka sposobnost absorpcije mehanskega dela z deformacijo, vzdržljivost pri dinamičnih obremenitvah, velika odpornost na utrujanje, nevnetljivost, možnost recikliranja in vedno dostopnejše cene [17, 18], dodajo še dobre lastnosti kovin, kot so: električna in toplotna prevodnost, visoka trdnost ter visoka toplotna obstojnost [8].

Velik vpliv na lastnosti kovinskih celičnih gradiv ima izbira osnovnega materiala, iz katerega je celično gradivo izdelano. Kovine in zlitine morajo biti lahke, da ohranijo prednost nizke specifične gostote v nasprotju z konvencionalnim masivnim gradivom. Zaradi tega so najpogosteje uporabljene kovine aluminij, magnezij in titan. Za uporabo v medicinske namene se največkrat uporablja titan, saj je biološko najbolj kompatibilen in se najlaže veže z organskim tkivom. V primeru izpostavljenosti celičnih gradiv zelo agresivnim medijem ali visokim temperaturam pa se kot osnovni material uporablja tudi nerjaveče jeklo ali titan [8].

Vse našteje lastnosti kovinskih celičnih gradiv omogočajo njihovo uporabo v številnih industrijskih disciplinah, kot so vesoljska, letalska, ladjedelniška, železniška in avtomobilska industrija. Celična gradiva se uporabljajo kot izmenjevalci toplote, filtri, ležaji, dušilci zvoka, bio-medicinski vsadki, kot elementi za zadrževanje ognja, kot ogrodja katalizatorjem in kot elementi za absorpcijo zunanjega mehanskega dela (slika 2.3). Elementi za absorpcijo dela se uporabljajo predvsem v vozilih, in sicer na mestih deformacijskih con za





**Slika 2.3:** Področja uporabe celičnih kovin glede na strukturo njihovih celic

izboljšanje pasivne varnosti v prometu. Togost elementov za izboljšanje pasivne varnosti je potrebno zelo previdno povečevati, da takšen element ohrani svojo varovalno funkcijo, in ravno to omogočajo celična gradiva. Porušitev celičnega gradiva v tlačnem območju je namreč mogoče zelo dobro kontrolirati z izbiro osnovnih lastnosti celičnega gradiva, kot so vrsta osnovnega materiala, relativna gostota in velikost celic.

Zaradi naraščajoče uporabe celičnih gradiv v industriji so le ta deležna tudi velike pozornosti v znanstvenih krogih. Za namene računalniškega modeliranja neurejenih celičnih gradiv pod vplivom mehanskih obremenitev so zanimiva predvsem področja, ki se ukvarjajo z določevanjem vpliva deformacijskih hitrosti, polnil in oblikovnih parametrov neurejene strukture na obnašanje celičnih gradiv med obremenitvijo.

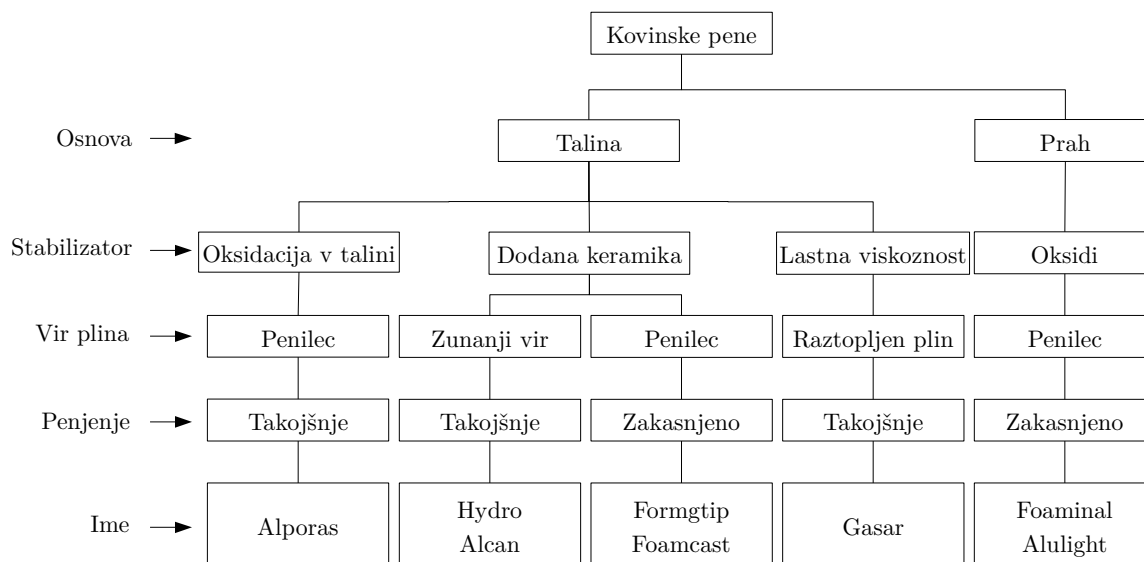
## 2.1 Proizvodnja kovinskih celičnih gradiv

Med proizvodnjo kovinskih odprto- in zaprto-celičnih gradiv obstaja velika razlika. Kovinska odprto-celična gradiva se namreč proizvajajo na osnovi metod, ki ne vključujejo samega procesa penjenja kovinske osnove. Ponavadi se za proizvodnjo kovinskega odprto-celičnega gradiva uporabi eden od postopkov repliciranja strukture polimerne pene, katere celice so predhodno odprte z obdelavo po posebnem postopku. Končni produkt je tako celična kovina, katere struktura je enaka strukturi uporabljene polimerne pene. Pri proizvodnji takšnih celičnih kovin sama fizika penjenja kovinske osnove nima vpliva na končno

obliko celične kovine. Nasprotno pa pri proizvodnji zaprto-celičnih kovinskih gradiv ni potrebe po uporabi osnove, saj se izrabi proces penjenja same tekoče kovinske faze.

### 2.1.1 Proizvodnja zaprto-celičnih kovinskih gradiv

Pregled metod za proizvodnjo zaprto-celičnih gradiv je podan na sliki 2.4. Največja razlika med metodami je izbira kovinske taline ali kovinskega prahu kot osnove za proizvodnjo (ne glede na izbrano osnovo pa se proces penjenja vrši v tekoči fazi). Druga razlika je izbira vira plina. Lahko je uporabljen zunanji vir plina, lahko penilec (blowing agent) nastane ob razgradnji v talini, lahko pa je uporabljen raztopljen plin. Tretja razlika je čas, kdaj se sproži proces penjenja. Penjenje je lahko takojšnje, lahko pa se proizvede stabilen vmesni produkt in je proces penjenja izvršen kasneje (zakasnjeno penjenje).

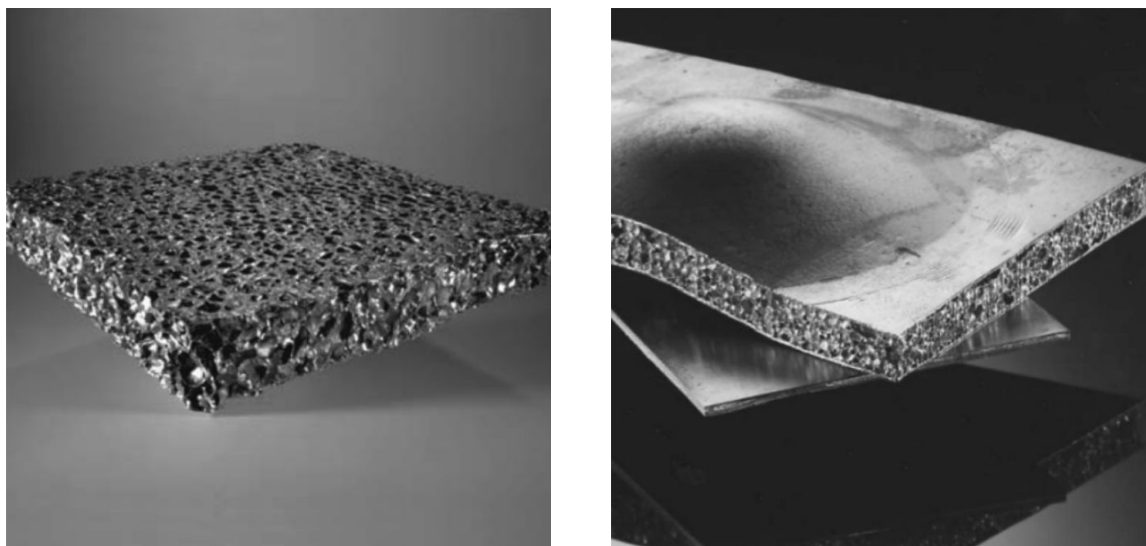


**Slika 2.4:** Družinsko drevo zaprto-celičnih pen [19]

Pod določenimi pogoji je lahko kovinska talina spenjena s pomočjo plinskih mehurčkov v tekočini. Ponavadi se plinski mehurčki hitro dvignejo na površino taline zaradi velikih vzgonskih sil (razlika gostote), intenzivnost dvigovanja pa se lahko zmanjša s povečanjem viskoznosti taline. Viskoznost poveča dodatek finega keramičnega prahu ali dodatek legirnih elementov, ki tvorijo stabilizacijske delce v talini. Proces penjenja kovinske taline se lahko izvrši na tri načine: z vpihovanjem plina iz zunanjega vira, z neposredno tvorbo plina v talini s pomočjo penilcev ter z izločanjem v talini raztopljenega plina.

#### Penjenje kovinskih talin z vpihovanjem plina - Cymat/Alcan

Metoda se uporablja za proizvodnjo kovinskih pen iz aluminija in aluminijevih zlitin [20]. Za povečanje viskoznosti taline se uporabljajo naslednje keramike v obliki finega prahu: silicijev karbid (SiC), aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in magnezijev oksid (MgO) [21]. Prvi korak



**Slika 2.5:** Kovinska pena proizvedena z vpihovanjem plina v aluminijevo talino (levo: Cymat [24]) in pena proizvedena s penjenjem aluminijevega prahu med dvema jeklenima ploščama (desno: Alulight)

pri tej metodi predstavlja pripravo aluminijeve taline, ki vsebuje eno od naštetih keramik [22]. Drug korak te metode predstavlja penjenje taline z vpihovanjem plina preko propelerja ali vibracijskih šob, le tako je namreč zagotovljen nastanek finih plinskih mehurčkov in njihova enakomerna porazdelitev po talini. Nastala viskozna mešanica mehurčkov in taline izplava proti površini taline, kjer se spremeni v tekočo peno, ko odvečna kovina izteče (drenaža). Zaradi keramičnih vključkov je pena dovolj stabilna, da jo je mogoče potegniti iz površine taline ter jo nato ohladiti, da se strdi (slika 2.5 levo). Takšne pene se iz taline ponavadi vlečejo na tekoči trak, kar ima za posledico diagonalno deformirane celice z anizotropnimi lastnostmi [23].

### Penjenje kovinskih talin s penilci - Alporas

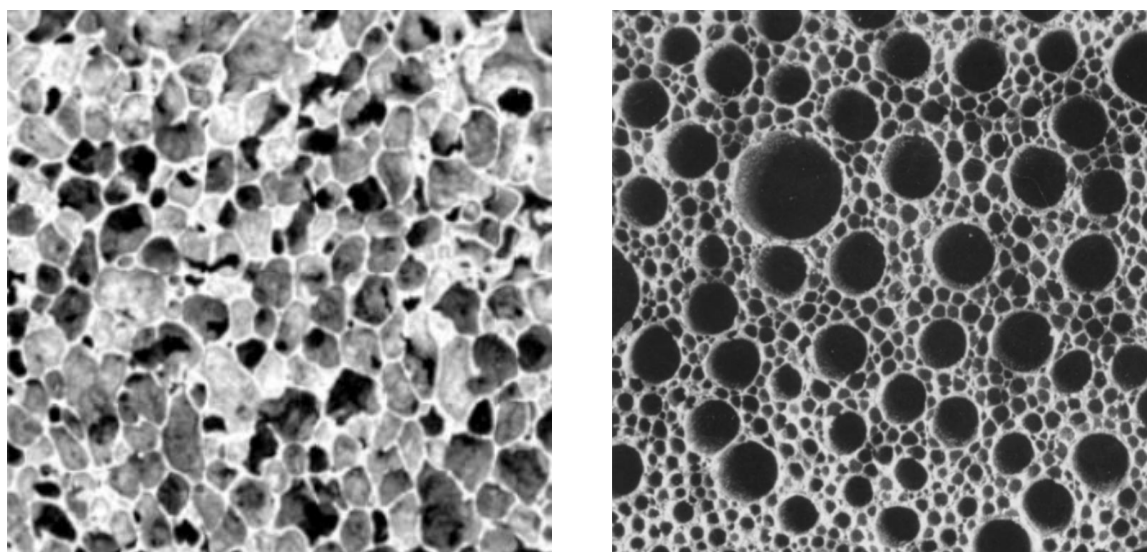
Drug način penjenja kovinske taline je uporaba penilca namesto vpihovanja plina [25]. Visoka temperatura taline povzroči kemični razpad penilca in nastanek plina potrebnega za penjenje neposredno v talini [26]. V prvem koraku se v talino pri temperaturi  $680^{\circ}\text{C}$  doda okrog 1,5 masnega procenta kalcijeve kovine. Po nekajminutnem mešanju taline se poveča njena viskoznost tudi do 5 krat, zaradi tvorbe oksidov in kalcitov [27]. Pri želeni viskoznosti se talina prelije v kalup za penjenje, kjer se v talino doda penilec titanijev hidrid ( $\text{TiH}_2$ ). Talina se začne zaradi v njej nastajajočega plina širiti pri konstantnem tlaku, dokler v celoti ne napolni kalupa. Nato sledi hlajenje kalupa na temperaturo nižjo od tališča aluminijeve zlitine, med katerim se tekoča pena v kalupu strdi.

## Penjenje kovinskega prahu - Foaminal/Alulight

Celične kovine lahko nastanejo tudi iz kovinskega prahu [28, 29]. Prvi korak te metode zahteva pripravo mešanice kovinskega prahu (prah elementarnih kovin, prah kovinskih zlitin, prah različnih kovinskih mešanic) in penilca. Mešanica prahu se nato obdelava v trden polizdelek z enoosnim ali hidrostatičnim stiskanjem, stiskanjem v palico ali valjanjem. Naslednji korak je temperaturna obdelava pri temperaturi blizu tališča kovinske osnove. Penilec se pri tem razgradi in nastali plin povzroči napihovanje nastajajoče taline, kar tvori končno strukturo celične kovine. S pomočjo lepil je lahko takšna celična kovina spojena z dvema kovinskima ploščama v sendvič strukturo tako, da sta plošči na vsaki strani jedra iz celične kovine (slika 2.5 desno). Metoda je uporabna za številne kovine in zlitine, kot so aluminij in njegove zlitine, cink, kositer, zlitine bakra in cinka, zlato.

## Penjenje ingotov, ki vsebujejo penilce - Formgrip/Foamcast

Metoda je osnovana na prej opisani metodi penjenja kovinskega prahu. Nadgrajena je bila z vključitvijo delcev titanovega hidrida ( $TiH_2$ ) neposredno v aluminijevo talino, tako ni potrebna predhodna priprava prahu za osnovo celične kovine. Za preprečitev prezgodnjega nastanka vodika v talini po vključitvi titanovega hidrida mora slediti hitra ohladitev taline pod temperaturo tališča ali pa mora biti penilec predhodno tako obdelan, da se ne razgradi pred strditvijo taline. Metoda s hitim ohlajanjem taline se imenuje Foamcast in se izvaja na pripravah za tlačno litje, metoda s predhodno obdelanim penilcem pa se imenuje Formgrip (slika 2.6 levo).



**Slika 2.6:** Kovinska pena proizvedena s penjenjem ingota, ki vsebuje predhodno obdelan penilec (levo: Formgrip) in pena proizvedena z eutektničnim strjevanjem kovinske taline (desno: Gasar)

## Eutektično strjevanje v trdno in plinasto fazo - Gasar

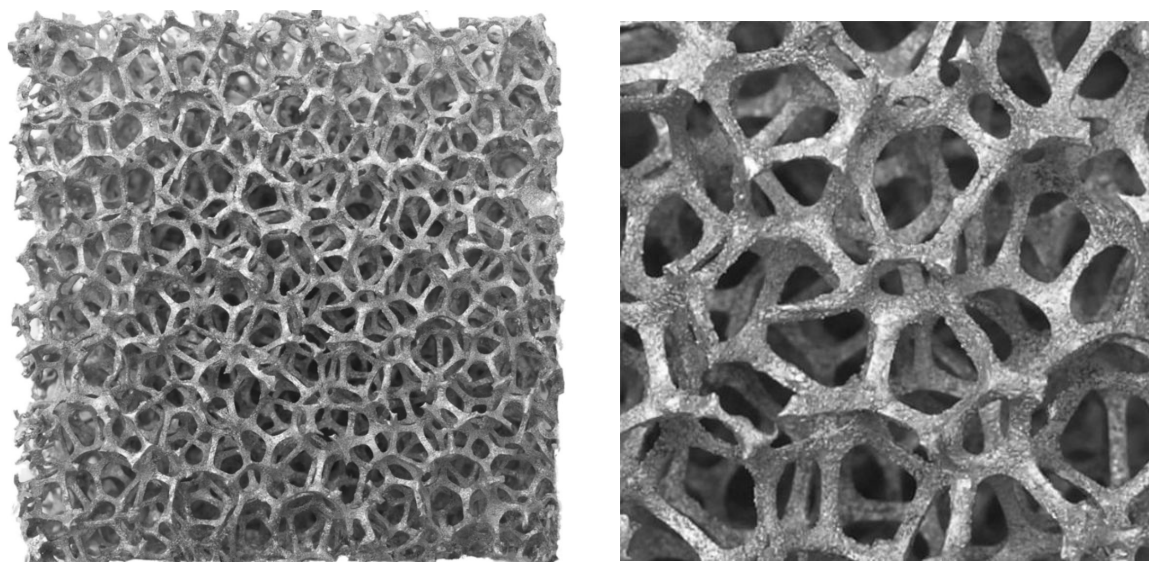
Metoda izkorišča eutektičen sistem, ki ga tvorijo nekatere kovine v tekoči fazi z vodikom v plinasti fazi [30]. Če je ena od takšnih kovin raztaljena v vodikovi atmosferi pri visokem tlaku ( $5 \times 10^6$  Pa), nastane homogena talina, ki vsebuje raztopljen vodik. Med ohlajanjem takšne taline pride do eutektičnega prehoda tekoče faze v dvofazni sistem trdo - plinasto. V primeru, da je razmerje kovine in plina v talini dovolj blizu eutektični koncentraciji, pride pri določeni temperaturi ohlajevanja do ločevanja taline na trdno in plinasto fazo. Med strjevanjem taline se začne izločati vodik v obliki mehurčkov (por) ujetih v kovino. Tvorijo se močno raztegnjene pore v smeri strjevanja taline, ki lahko predstavljajo od 5 do 75 % volumna nastale celične kovine. Premeri por se gibljejo od 1 do 10 mm (slika 2.6 desno), njihove dolžine od 100 do 300 mm (*gasar - rusko: ojačan s plinom*).

### 2.1.2 Proizvodnja odprto-celičnih kovinskih gradiv

Kovinska odprto-celična gradiva se proizvajajo s pomočjo enega od postopkov repliciranja strukture polimerne pene, katere celice so predhodno odprte z obdelavo po posebnem postopku. Postopek replikacije 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 (investment casting). Končni produkt je tako celična kovina, katere struktura je enaka strukturi uporabljene polimerne pene. Namesto odprte polimerne pene pa se uporabljajo tudi osnove iz razsutih ali sintranih neorganskih ali organskih granulato, votlih krogel ali celo osnove iz urejenih polimernih struktur. Prednost teh metod je, da je mogoče izdelati strukture kompleksnih oblik s predhodnim preoblikovanjem polimerne pene oziroma druge uporabljene osnove.

### Litje z iztaljenim jedrom - Duocel

Metoda temelji na polimernih penah, ki so uporabljene kot prvi kalup za pripravo odprto-celične kovine. V primeru zaprto-celične polimerne pene je najprej potrebno celice pene odpreti po posebnem postopku (celice se napolnilo z eksplozivnim plinom, sledi kontrolirana eksplozija, ki odstrani stene celic; *angl.: gas reticulation treatment*). Nastala odprto-celična polimerna pena se napolni z gosto suspenzijo temperaturno dovolj obstojnega materiala, kot je mešanica mulita (mineral gline:  $\text{Al}_2(\text{Al}_{2+2}\text{Si}_{2-2x})\text{O}_{13} \cdot \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ), fenolne smole in kalcijevega karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) [8] ali običajen mavec [31]. Po strjevanju se polimerna pena odstrani s termično obdelavo. Tako nastanejo praznine, ki predstavljajo strukturo osnovne polimerne pene. Na njihovo mesto se vlije staljena kovina z uporabo tlaka in ogrevanja kalupa, če gravitacijska sila ne zadostuje za popolno zapolnitev kalupa. Po ohlادitvi in strditvi kovine se odstrani material kalupa (s pomočjo vode pod visokim pritiskom) in ostane le kovinska pena, katere struktura je enaka izvorni strukturi poli-

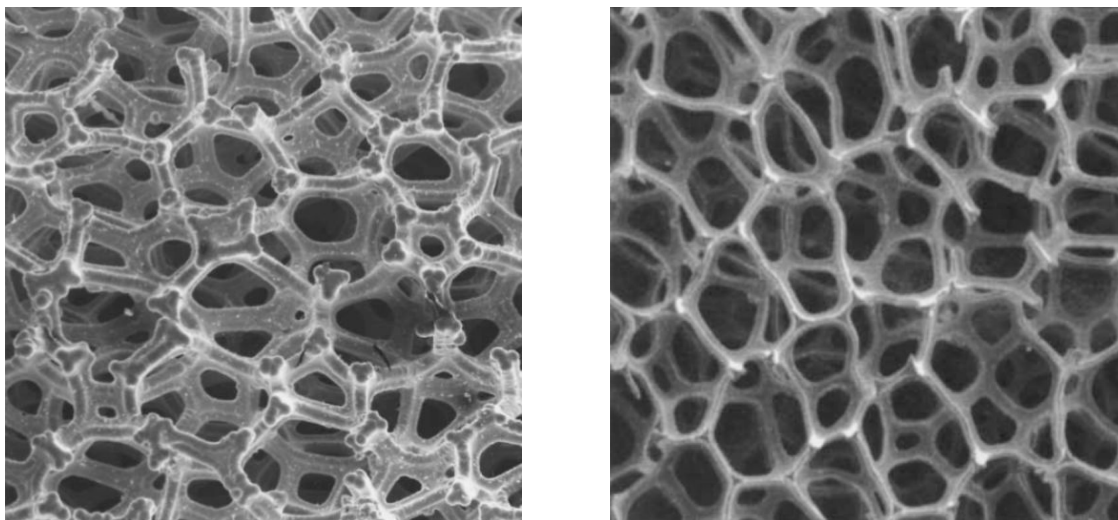


**Slika 2.7:** Kovinska pena proizvedena z metodo litja z izgubljenim jedrom; na levi je kocka velikosti 4 cm, na desni je podrobneje prikazana njena struktura, kjer je lepo razvidna trikotna oblika robov celic

merne pene (slika 2.7). Ponavadi se pri tej metodi uporabljajo aluminijeve zlitine kot so zlitina 6101 ali (AlSi7Mg) [32], lahko pa se uporabi tudi magnezij [31]. Dosegajo se povprečne velikosti celic od 0,6 do 5 mm z relativnimi gostotami od 3 do 20 %. Težave pri tej metodi predstavlja doseganje popolne zapolnitve kalupa z raztaljeno kovino, kontroliranje usmerjenega ohlajevanja kovine in odstranjevanje materiala kalupa na način, ki preveč ne poškoduje strukture pene ter visoka cena, kjer pa razvoj novih tehnik litja napoveduje drastično znižanje cen [33].

### **Metalizacija z uporabo galvanotehnike - Retimet/Celmet/Recemat**

Metoda bazira na kovinah v ionski obliki, kot je na primer raztopina kovinskih ionov v elektrolitu. Kovina je s pomočjo elektrolize nanešena na odprto-celično polimerno peno, ki je na koncu postopka odstranjena. Za elektrolizo je potrebno, da je polimerna pena vsaj delno prevodna, zato jo je potrebno predhodno obdelati. Prevodnost se doseže z namakanjem polimerne pene v električno prevodno suspenzijo na osnovi grafita ali ogljikovih saj ali z oplastitvijo polimerne pene s prevodnim slojem z uporabo katodnega pršenja [34]. Po metalizaciji tako pripravljene pene s postopkom galvanotehnike se polimerno osnovo odstrani s temperaturno obdelavo. Tako nastane odprto-celična kovinska pena z votlimi robovi celic (slika 2.8). Na ta način pridobljene celične kovine imajo velikosti celic med 0,5 in 3,2 mm ter izjemno razmerje med ploščino in prostornino, ki se giblje med 500 in 7500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> [35]. Kovine, ki se lahko uporabljajo pri tej metodi, so nikelj, zlitine niklja in kroma ter baker. Največ se proizvede nikljevih in nikelj kromovih pen, podjetje Sumitomo Electric iz Japonske namreč proizvede nekaj 100 ton takšnih pen na leto. Peno proizvajajo v obliki plošč velikosti 450×600 ali 400×500 mm z debelino od 2 do 20 mm



**Slika 2.8:** Nikljeva pena proizvedena po metodi metalizacije z galvanotehniko (levo) in pena Incofoam [37] proizvedena po postopku metalizacije z uporabo plina nikljevega karbonila (desno)

in relativno gostoto med 4,5 in 7,3 %. Zanimivo je, da je relativna gostota takšnih pen neodvisna od povprečne velikosti celic uporabljene polimerne pene [36].

### **Metalizacija z uporabo pare - Incofoam**

Odprto-celične kovine je mogoče narediti tudi s pomočjo uplinjenih kovin ali uplinjenih kovinskih spojin. Metoda metalizacije s paro uporablja odprto-celično strukturo kot osnovo za kovinsko peno. Ta osnova definira končno obliko kovinske pene in je lahko odprto-celična polimerna pena ali kaj podobnega. Metalizacija osnovne strukture poteka v vakuumu, kamor se vpihuje kovinska para, ki se kondenzira na ohlajeni polimerni peni. Kondenzirana kovina prekrije površino osnovne pene in na njej tvori kovinski sloj določene debeline, ki jo določa gostota kovinske pare in čas izpostavljenosti polimerne pene. Pri metalizaciji z nikljem se je možno izogniti potrebnim visokim temperaturam za uparjanje kovine z uporabo nikljevega karbonila ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ). Nikljev karbonil je plin, ki pri ohladitvi na temperaturo nižjo od  $120^\circ\text{C}$  razpade na nikelj in ogljikov monoksid ( $\text{Ni}(\text{CO})_4 \rightarrow \text{Ni} + 4\text{CO}$ ). Tako se lahko metalizacija polimerne pene izvrši z usmeritvijo toka plina nikljevega karbonila skozi odprto-celično polimerno peno z ustrešno temperaturo. Med tem pride do razpada nikljevega karbonila in odlaganja nastalega niklja na polimerno peno, kar na peni tvori sloj niklja. Polimer se ohranja pri temperaturi razpada plina s pomočjo infrardečega ogrevanja [38, 39]. Po končani metalizaciji se polimerna osnova odstrani s temperaturno ali kemično obdelavo, nastala celična kovina pa je zelo podobna kot pri metodi z galvanotehniko. Opisani postopek uporablja podjetje Inco za proizvodnjo nikljeve pene Incofoam (slika 2.8). Dosegajo se relativne gostote od 2,2 do 6,7% pri izredni čistosti niklja (99,97 %). Natezna trdnost takšnega materiala srednje gostote znaša 1,7 MPa [37].

## 2.2 Mehanske lastnosti celičnih gradiv

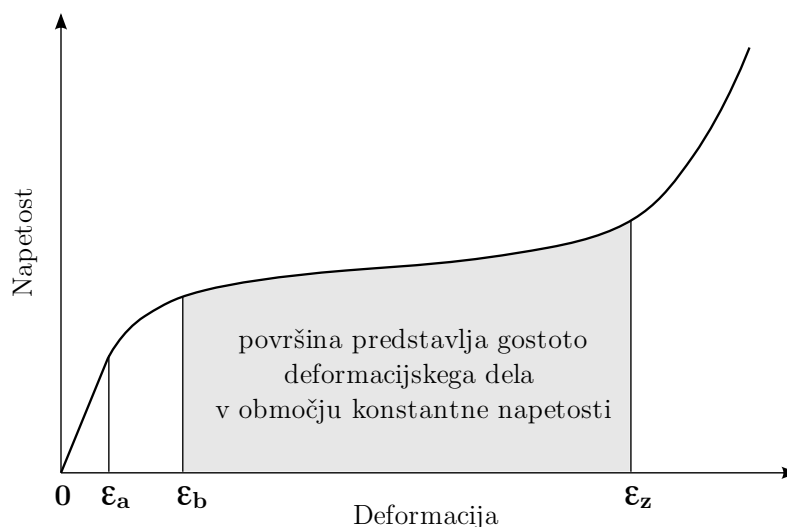
Na mehanske lastnosti celičnega gradiva v prvi vrsti vpliva izbira osnovnega materiala. Da se zadrži prednost v masi celičnih gradiv v primerjavi s konvencionalnimi gradivi se uporabljajo predvsem lahke kovine in zlitine, kot je omenjeno v uvodu tega poglavja. Pregled mehanskih lastnosti nekaterih najbolj pogostih celičnih gradiv, katerih proizvodnja je bila opisana, podaja preglednica 2.1. Mehanske lastnosti, kot so modul elastičnosti, meja plastičnosti, trdnost in količina absorbiranega dela, pa so odvisne tudi od relativne gostote, deformacijske hitrosti, uporabljenega polnila ter od oblikovnih parametrov same celične strukture.

Pene in celična gradiva imajo značilno napetostno-deformacijsko krivuljo pri tlačnih obremenitvah, katere potek je možno razdeliti na štiri glavna območja: elastični del, prehodni del, konstantni del in ponovna rast togosti (slika 2.9). V elastičnem delu ( $0 - \varepsilon_a$ ) se osnovni material celičnega gradiva deformira elastično ter se po koncu obremenjevanja vrne v začetno, nedeformirano obliko. Prehodni del ( $\varepsilon_a - \varepsilon_b$ ) predstavlja prehod v območje plastičnih deformacij, kjer napetost v določenih točkah osnovnega materiala celičnega gradiva doseže mejo plastičnosti. Tako se na medceličnih stenah oziroma povezavah pojavijo lokalna območja tečenja oziroma prehod v plastično deformacijo. Po prehodnem delu sledi območje približno konstantne napetosti v plastičnem območju ( $\varepsilon_b - \varepsilon_z$ ), ko osnovni celični material doseže nivo napetosti, ki je v zelo širokem pasu deformacije celičnega gradiva skoraj konstantna. V tem območju pride do uklona oziroma izrazite plastifikacije medceličnih sten in povezav. Celični prostori se zmanjšujejo, relativna gostota raste. Po

**Preglednica 2.1:** Mehanske lastnosti kovinskih celičnih gradiv [2]

Mehanska lastnost	Enota	Tržno ime celičnega gradiva				
		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
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 – 0,34	0,31 – 0,34
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 – 1,1
Natezna trdnost	[MPa]	0,05 – 8,5	2,2 – 30,0	1,6 – 1,9	1,9 – 3,5	1,0 – 2,4
Def. zgostitve $\varepsilon_z$	[/]	0,6 – 0,9	0,4 – 0,8	0,7 – 0,82	0,8 – 0,9	0,9 – 0,94





**Slika 2.9:** Značilen potek napetosti celičnih gradiv v odvisnosti od deformacije pri tlačnih obremenitvah ima štiri značilna območja: elastičen del ( $0 - \epsilon_a$ ), prehoden del ( $\epsilon_a - \epsilon_b$ ), konstanten del ( $\epsilon_b - \epsilon_z$ ) in ponovno rast togosti ( $\epsilon_z \rightarrow$ )

določeni stopnji deformacije (deformacija zgostitve  $\epsilon_z$ ), ko se medcelične stene in povezave popolnoma sesedejo, pride do ponovnega povečanja togosti celičnega gradiva ( $\epsilon_z \rightarrow$ ) oziroma do zgostitve. Togost oziroma napetost v tem območju zelo hitro narašča, dokler deformirano celično gradivo ne doseže togosti osnovnega materiala.

Med opisanim procesom je osnovni celični material sposoben sprejeti s svojo deformacijo veliko količino zunanjega mehanskega dela. V elastičnem območju deformacije material mehansko delo akumulira in ga po prenehanju delovanja obremenitve odda nazaj v sistem. Večinski del mehanskega dela pa material absorbira s plastično, nepovratno deformacijo. Večja je torej stopnja plastične deformacije celičnega gradiva, večja je količina absorbiranega dela.

Gostota dela, ki ga je gradivo sposobno absorbirati s svojo deformacijo, predstavlja površina pod krivuljo v diagramu napetost - deformacija. Večja kot je površina pod krivuljo, več dela gradivo akumulira s svojo deformacijo. Delo, akumulirano z elastično deformacijo, konstrukcija po prenehanju obremenitve odda nazaj v sistem. Preostalo delo pa je delo, ki ga je gradivo absorbiralo s plastično nepovratno deformacijo. Absorbirano delo gradivo delno odda v obliki toplotne energije, večji del pa se ga porabi za samo plastično deformacijo gradiva. Za absorpcijo mehanskega dela je tako najpomembnejša plastična, nepovratna deformacija gradiva, ki je pri kovinskih celičnih gradivih ugodnejša kot pri celičnih gradivih iz polimerov. Kovinska celična gradiva imajo namreč zelo visok modul elastičnosti v primerjavi s polimernimi celičnimi gradivi, zaradi tega je delež elastične deformacije v primerjavi s plastično pri njih dosti manjši. Elastičnost poliuretanskih pen je za 12 % večja kot pri aluminijevih penah [8].

Z deformacijo absorbirano mehansko delo je odvisno tudi od hitrosti deformiranja konstrukcije. Višja kot je hitrost deformiranja konstrukcije, večja je sposobnost absorpcije mehanskega dela z deformacijo. S povečanjem togosti celičnega gradiva je količino absorbiranega mehanskega dela možno še povečati, vendar se z višanjem togosti višajo tudi pojemki pri udarnih obremenitvah.

Kakor je bilo že omenjeno, se celična gradiva pogosto uporabljajo kot polnila votlih konstrukcijskih delov in sestavnih oziroma nosilnih elementov. Pri deformaciji takšnih delov pride do medsebojnega vpliva komponent, ki ga sestavljajo, torej votlega nosilca in celičnega gradiva. Posledica tega je nosilnost oziroma z deformacijo absorbirano mehansko delo, ki je višje od matematične vsote nosilnosti oziroma absorbiranega mehanskega dela posamezne komponente strojnega elementa. Celično gradivo v votlem nosilcu namreč služi kot dodatna podpora steni nosilca. Tako skrajša uklonsko dolžino nosilca in povzroči pogostejše zlaganje stene glede na njegovo dolžino [2].

### 2.2.1 Vpliv relativne gostote

Za konstruiranje je velikega pomena razmerje mehanskih lastnosti celičnega gradiva v primerjavi z mehanskimi lastnostmi osnovnega materiala celičnega gradiva. Po vzgledu študij materialnih lastnosti polimernih pen in iz analize eksperimentalnih meritev kovinskih celičnih gradiv je bilo ugotovljeno, da za primerjavo lastnosti najbolj ustreza zapis naslednje oblike [2]:

$$\frac{P^*}{P_s} = \alpha \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^n, \quad (2.2)$$

kjer je  $P$  primerjana mehanska lastnost,  $\alpha$  korekcijski koeficient in  $n$  konstanten eksponent.  $Z$  (\*) so označene materialne lastnosti celičnega gradiva, medtem ko ( $_s$ ) označuje lastnosti osnovnega materiala. Razvidno je, da so lastnosti celičnega gradiva opisane s pomočjo potenčne funkcije razmerja gostot. Vrednosti korekcijskega parametra  $\alpha$  in eksponenta  $n$  so bile določene na osnovi eksperimentalnih testiranj za modul elastičnosti, natezno in tlačno trdnost ter deformacijo zgostitve in so podane v preglednici 2.2. V vseh zapisanih enačbah je eksponent  $n > 1$ , kar predstavlja premosorazmerno odvisnost mehanskih lastnosti od relativne gostote. Večja kot je relativna gostota celičnega gradiva, višje so njegove mehanske lastnosti.

Odvisnost relativnega modula elastičnosti  $E^*/E_s$  od relativne gostote celičnega gradiva, ki je zapisana v preglednici 2.2 v obliki enačbe, je grafično ponazorjena na sliki 2.10. Potek mej prikazanih področij kaže ugotovljeno premosorazmerno odvisnost relativnega modula

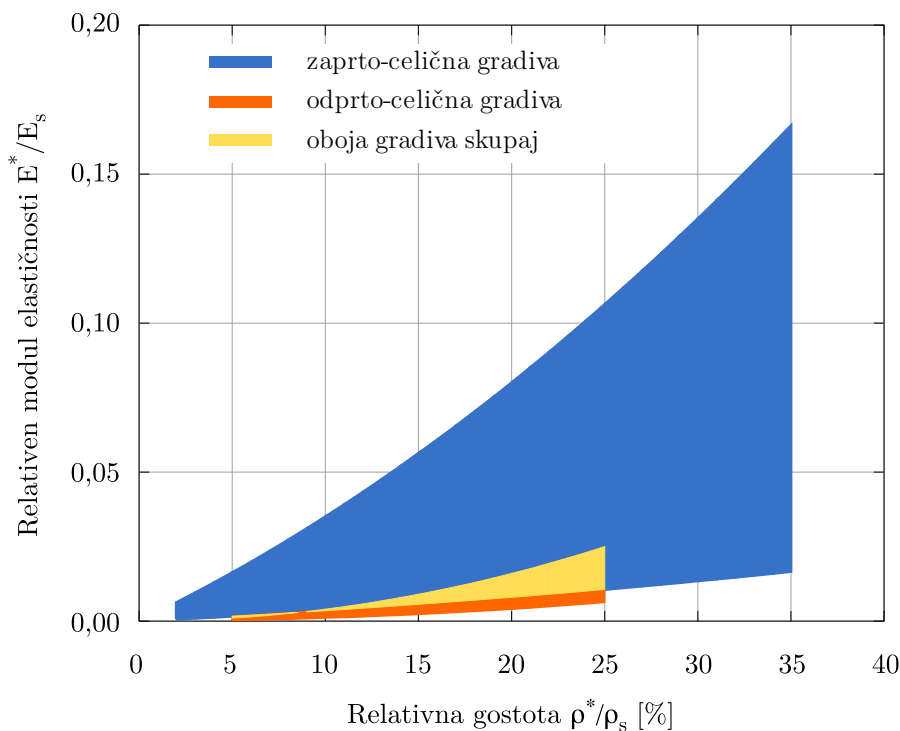
**Preglednica 2.2:** Primerjava mehanskih lastnosti kovinskih zaprto- in odprto-celičnih gradiv z lastnostmi njihovega osnovnega materiala [2]

Mehanska lastnost		zaprto-celično gradivo	odprto-celično gradivo
Modul elastičnosti	$E^*$	$E_s(0,1 - 1,0) \left[ 0,5 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0,3 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \right]$	$E_s(0,1 - 4,0) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2$
Strižni modul	$G^*$	$\frac{3}{8} E^*$	←
Modul stisljivosti	$K^*$	$1,1 E^*$	←
Poissonovo število	$\nu$	$0,32 - 0,34$	←
Tlačna trdnost	$\sigma_c^*$	$\sigma_{c,s}(0,1 - 1,0) \left[ 0,5 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{2/3} + 0,3 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \right]$	$\sigma_{c,s}(0,1 - 1,0) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2}$
Natezna trdnost	$\sigma_t^*$	$(1,1 - 1,4) \sigma_c^*$	←
Def. zgostitve	$\varepsilon_z^*$	$(0,9 - 1,0) \left[ 0,4 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^3 + 1,4 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) + 1 \right]$	←

elastičnosti od relativne gostote. Z večanjem relativne gostote se večja tudi vrednost relativnega modula elastičnosti. Iz slike je opazno tudi dosti večje področje, ki ga pokrivajo gradiva z zaprto-celično strukturo v primerjavi z odprto-celičnimi gradivi. Dosegajo višje relativne module elastičnosti in višje ter nižje relativne gostote. To je seveda vzrok za večjo pozornost, ki so jo kovinska zaprto-celična gradiva deležna na raziskovalni ravni in posledično vzrok za njihovo večjo razširjenost v industriji.

### 2.2.2 Vpliv geometrije celične strukture

Vpliv oblikovnih parametrov odprto-celičnega gradiva na absorpcijo mehanskega dela z deformacijo gradiva je proučevalo mnogo avtorjev, predvsem s pomočjo numeričnih simulacij po metodi končnih elementov, saj le takšen pristop omogoča tudi podrobno analizo obnašanja odprto-celičnega gradiva med deformacijo. V teh numeričnih simulacijah so bila odprto-celična gradiva modelirana z uporabo rešetkastih modelov, kjer je struktura odprto-celičnega gradiva diskretizirana tako, da robove med sosednjimi celicami predstavljajo linijski končni elementi. S pomočjo rešetkastega modela sta Zhu in Windle [4] analizirala vpliv stopnje neurejenosti oblike celic v odprto-celičnih penah na potek napetosti v odvisnosti od deformacije. Ugotovila sta, da dosežejo pene z višjo stopnjo oblikovne nepravilnosti celic nižje napetosti pri enaki deformaciji, kot pene z bolj oblikovno urejenimi oziroma idealnimi celicami, torej lahko s svojo deformacijo absorbirajo manjšo količino mehanskega dela. Te ugotovitve so podprli Li et al. [5], ki so dodatno proučevali še vpliv neenakomernosti v velikosti presekov robov celic na elastične lastnosti odprto-celičnih pen. S pomočjo metode končnih elementov in rešetkastih modelov so pokazali, da večanje neenakomernosti v velikosti presekov povzroči padanje modula elastičnosti pene. Neenakomernost velikosti presekov robov ima namreč za posledico tudi robove z zmanjšanim presekom, ki predstavljajo lokalne oslabitve strukture. Za razliko



**Slika 2.10:** Vrednosti relativnega modula elastičnosti, ki ga dosegajo samo zaprto-celična gradiva, samo odprto-celična gradiva in oboja gradiva skupaj

od prejšnjih avtorjev sta Simone in Gibson [6] uporabila volumski model odprto-celičnega gradiva za določevanje vpliva razporeditve osnovnega materiala po dolžini roba celice na njegovo nosilnost. Ugotovila sta, da presežki materiala na stičiščih robov ali na sredini robov povzročijo padec nosilnosti odprto-celičnega materiala. Eksperimentalno so vpliv oblikovnih parametrov na absorpcijo mehanskega dela proučevali Miyoshi et al. [40]. Pri obremenjevanju z deformacijsko hitrostjo  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  so uspeli povečati količino absorbiranega dela za 40 % s tem, da so zmanjšali povprečno dolžino roba odprto-celičnega materiala iz 2,68 mm na 1,91 mm.

### 2.2.3 Vpliv deformacijske hitrosti

Opravljene so bile številne eksperimentalne raziskave določevanja vpliva deformacijske hitrosti na obnašanje celičnega gradiva. Rinde in Hoge [41] sta analizirala tlačno trdnost stiropora (polystyrene) pri sobni temperaturi v odvisnosti od deformacijske hitrosti. Ugotovila sta, da se trdnost stiropora le malo poveča z višanjem deformacijske hitrosti. Mukai et al. [42] so primerjali odvisnost trdnosti stiropora in zaprto-celične aluminijeve pene (ALPORAS) enake relativne gostote in ugotovili, da ima višanje deformacijske hitrosti večji vpliv na nivo konstantne napetosti v plastičnem območju pri aluminijevi peni kot pa pri stiroporu. Odvisnost materialnih lastnosti odprto celične magnezijeve pene (AZ91)

od deformacijske hitrosti (do  $1000 \text{ s}^{-1}$ ) pri tlačnem obremenjevanju so proučili Mukai et al. [43] in dokazali, da je količina absorbiranega dela močno odvisna od deformacijske hitrosti, saj je absorpcija pri deformacijski hitrosti  $1400 \text{ s}^{-1}$  kar za 100 % večja kot pri kvazi-statični obremenitvi. Christ s soavtorji je proučil mehanske lastnosti zaprtih celičnih gradiv pri različnih deformacijskih hitrostih [44]. Izvedeni so bili tlačni (deformacija do 80 %) preizkusi zaprtih celičnih gradiv pri različnih hitrostih deformiranja, od  $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  do  $2 \text{ s}^{-1}$ . Avtorji ugotavljajo, da s povečanjem deformacijske hitrosti celično gradivo izgublja svoj značilen potek v diagramu napetost - deformacija. Napetostna ravnina se z višanjem deformacijske hitrosti vzpenja hitreje (viša se z deformacijo absorbirano mehansko delo).

#### 2.2.4 Vpliv polnil

Sposobnost absorpcije mehanskega dela z deformacijo je možno povečati tudi z uporabo polnil. Vpliv zraka v celičnem gradivu v obliki satovja in posledični odziv napetosti v gradivu je opisal Shkolnikov [45]. Rezultati eksperimentov kažejo, da se napetosti ob upoštevanju plina povečajo za 10 %. Vpliv plina na trdnostne lastnosti celičnih gradiv v obliki satovja pa se pojavi le pri visoko dinamičnih obremenitvah, saj v takšnem primeru zrak zaradi velike hitrosti deformiranja ne more dovolj hitro zapustiti satovja in se tako večina plina stisne. Dannemann in Lankford [46] opisujeta vpliv deformacijskih hitrosti na odprto-celična gradiva. Ugotavljata, da ločimo dva bistvena dejavnika, ki prispevata k različnemu obnašanju celičnega gradiva pri različnih deformacijskih hitrostih: (a) elasto-plastični odpor osnovnega celičnega materiala in (b) tlak plina, ki se pojavi kot posledica toka le-tega skozi odprta celična gradiva. Izvedeni so bili eksperimenti z deformacijskimi hitrostmi od  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  do  $1200 \text{ s}^{-1}$ . Avtorja sta ugotovila, da se sposobnost absorpcije mehanskega dela pri višjih deformacijskih hitrostih znatno zviša, kar sta pripisala posledicam pretoka plina skozi pore. Ugotovila sta tudi, da ima deformacijska hitrost večji vpliv na celična gradiva z večjo relativno gostoto.

Dokazano pa je bilo, da pritisk, ki nastaja v zaprto-celičnih gradivih zviša mejo tečenja gradiva pri tlačnih obremenitvah. Z uporabo računalniških simulacij po metodi končnih elementov je vplive polnil na celična gradiva proučil tudi Vesenjsek [47]. Ugotovil je, da se z večanjem števila celic celičnega gradiva napolnjenega s polnilom povečuje njegova togost. Prav tako je pokazal, da ima polnilo večji vpliv na zvišanje togosti pri celičnih gradivih z višjo relativno gostoto, kjer so prehodi med posameznimi celicami manjši, in da višanje viskoznosti polnila prav tako poveča togost celičnega gradiva.



### 3 REKONSTRUKCIJA STRUKTURE CELIČNIH GRADIV

Mehanske lastnosti kovinskih odprto-celičnih gradiv so odvisne predvsem od uporabljenega osnovnega materiala celične strukture ter od morfologije celic. Vpliv osnovnega materiala je dobro raziskan in obstaja veliko število empirično določenih relacij, ki povezujejo lastnosti osnovnega materiala z lastnostmi celičnega gradiva [1, 2, 48].

Vpliv morfologije celic na mehanske lastnosti celičnih gradiv je proučevalo veliko avtorjev, predvsem s pomočjo uporabe reprezentativne enotske celice. Pri tem je bila uporabljena predpostavka, da je mogoče obnašanje celičnega gradiva dovolj dobro opisati z raziskavami ene geometrijsko pravilne celice. Ker celice realnih pen močno odstopajo od geometrijske pravilnosti, so proučevali tudi morfologijo celic realnih pen. Osnovo za določanje morfologije odprto-celičnih gradiv predstavljajo raziskave pene milnice, s katerimi je začel Plateau leta 1873 [49]. Vendar pa se trdne pene močno razlikujejo od tekočih pen, saj imajo njihovi osnovni materiali popolnoma druge materialne lastnosti. V odvisnosti od sestave osnovnega materiala in uporabljene temperature pri proizvodnji polimernih in kovinskih odprto-celičnih gradiv ta gradiva nastajajo iz veliko bolj viskoznih materialov, kot je voda. Tako med formacijo pene pride do pojavov prenosa toplote, faznih sprememb in viskoelastičnih pojavov. Zaradi narave osnovnega materiala, ohlajevanja ter učinkov fazne spremembe se tvorba jeder celic v teh penah in njihova rast močno razlikuje od tekočih pen. Še bolj pomembno pa je dejstvo, da trdne pene niso ravnotežne strukture zaradi samega načina proizvodnje. Predvsem zaradi visoke viskoznosti in nizkega tališča osnovnega materiala pride do ohlajevanja (gašenja) procesa penjenja, preden je doseženo ravnotežno stanje v tekoči fazi. To dejstvo delno ovrže uporabo zakonov o strukturi trdne pene, ki jih je na podlagi raziskav in opažanj v milni peni postavil Plateau [49]. Za podrobnejšo analizo odvisnosti lastnosti trdnih pen od njihovih morfoloških lastnosti je tako potrebno izboljšati obstoječa opazovanja.

Meritve geometrije pen so ponavadi narejene s pomočjo optičnega pregleda, fotografiranja ali optične mikroskopije. Tehnike optične mikroskopije so posebej primerne za izvajanje meritev geometrije pen. Merijo se lahko geometrijske lastnosti, kot so debelina stene med celicami, premer celic in dolžine robov celic [50, 51]. Zelo primerna je tudi konfokalna mikroskopija [52]. Vendar pa je zaradi kompleksne 3D strukture pen ročno merjenje njihovih lastnosti utrudljivo, zahteva veliko časa in v veliki večini primerov zahteva tudi uničenje opazovanega vzorca. Poleg tega je nekatere značilne lastnosti pen, kot je prostornina njihovih celic, izredno težko izmeriti oziroma določiti s pomočjo takšnih tehnik. Zaradi tega obstaja zelo malo eksperimentalnih raziskav, ki bi povezale morfološke lastnosti pen z njihovimi makroskopskimi fizikalnimi lastnostmi. Znano je, da velikost celic in njihova

geometrijska nepravilnost vplivajo na makroskopske lastnosti pen [42, 34], vendar pa je pravilno modeliranje realnih pen nemogoče zaradi pomanjkanja podatkov o njihovi realni morfologiji.

Boljše rezultate kot ročno merjenje dajejo avtomatizirane računalniške metode analize dvodimenzionalnih (2D) slik. S pomočjo takšnih metod se čas meritev geometrijskih značilnosti pen zmanjša na zanemarljivo vrednost v primerjavi s časom, ki je potreben za ročne analize. Vendar so prvotne raziskave z računalniško analizo slik vključevale le meritve ene geometrijske lastnosti pene naenkrat. Dodaten problem se pojavi pri primerjavi spoznanj opravljenih raziskav, predvsem zaradi različnih metod in postopkov, ki so bili uporabljeni za merjenje tudi najosnovnejših geometrijskih značilnosti pene, kot je na primer premer celice. Rezultatov teh raziskav ni mogoče enostavno združiti v enoten model, da bi dobili celosten vpogled v strukturo realnih pen, zato je potrebno uporabiti metodo za bolj kompletno karakterizacijo pen.

Kompletno karakterizacijo geometrijskih značilnosti pene omogoča natančen in sorazmerno 3D računalniški model realne pene. Številne meritve, kot so recimo dolžine robov celic, število robov oken celic ali premer celic se lahko nato izvedejo na takšnem sorazmernem modelu namesto na realnem vzorcu pene. Namesto merjenja vzorca realne pene pa se lahko izvedejo meritve na sorazmernem računalniškem modelu le v primeru, da je vzorec dovolj velik (zajema zadostno število merjenih geometrijskih značilnosti) in zanesljiv. Takšne modele je mogoče dobiti s pomočjo tridimenzionalnih (3D) tehnik zajemanja slike, kot je magnetna resonanca [53] ali računalniška tomografija z X-žarki [54] ter z naknadno analizo tako dobljenih 3D slik. Vendar so težave pri analizi 3D slik, kot so prisotnost šuma na zajetih slikah, omejitve s strani računalniškega pomnilnika in procesorske moči, preprečile, da bi prvi poskusi uspeli zajeti dovolj velike vzorce pene in tako postali široko razširjeno orodje za analizo pen. Kose [55] je s pomočjo nuklearne magnetne resonance zajel sliko poliuretanske pene ter s pomočjo analize dobljenih 3D slik zaznal 8 poliedričnih celic. Monnereau in Vignes-Adler [56] sta na podlagi slik optične tomografije tekoče pene rekonstruirala 9 celic (mehurčkov) pene milnice. Cenens et al. [57] niso neposredno iskali posameznih celic, ampak so ocenili gostoto celic s pomočjo analize statistike robov celic in oblike ter položaja oken celic. Pri tem so predpostavili, da se okna celic nahajajo natančno na sredini med centri sosednjih celic, kar pa v realni peni, posebej takšni z močno različno velikimi celicami (polidisperzna pena), ne drži. Montminy et al. [54] so z računalniško tomografijo z X-žarki zajeli 3D slike polidisperzne poliuretanske pene ter zgradili sorazmerno računalniški model pene s pomočjo tehnike obdelave 3D slik, imenovane tanjšanje volumna. S tem načinom so v šestih vzorcih pene rekonstruirali skupno 376 celic pene, kar zadostuje za opravljanje meritev geometrijskih značilnosti pene na sorazmernem računalniškem modelu. Podoben postopek je bil uporabljen tudi v predstavljeni raziskavi strukture kovinskih pen.



### 3.1 Opis analiziranih vzorcev odprto-celične pene

Za rekonstrukcijo strukture odprto-celičnih pen so bili izbrani preizkušanci aluminijeve odprto-celične pene podjetja m-pore GmbH [58] (slike 3.1, 3.2, 3.3). Podjetje izdeluje odprto-celične pene po metodi litja z iztaljenim jedrom v obliki plošč s štirimi različnimi povprečnimi velikostmi celic 10, 20, 30 in 40 ppi in dvema različnima relativnima gostotama, ki ju označujejo kot nizko (*low*) in normalno (*normal*) gostoto. Za litje uporabljenih vzorcev odprto-celične pene je bil uporabljen industrijsko čist aluminij z oznako EN AW-1070 (DIN Al99.7), katerega kemično sestavo podaja preglednica 3.1.

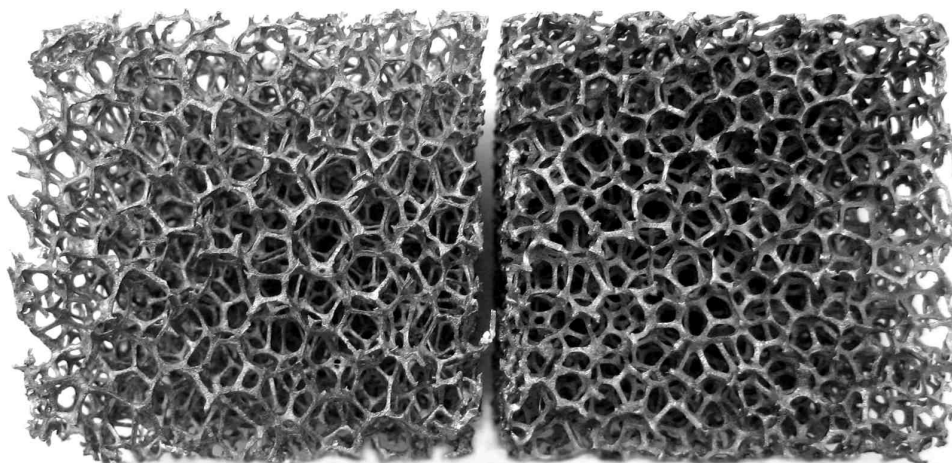
**Preglednica 3.1:** Sestava osnovnega materiala preizkušancev

Element	Al	Fe	Si	Mn	Mg	Ti
Masni delež [%]	99,67	0,20	0,10	0,01	0,01	0,01

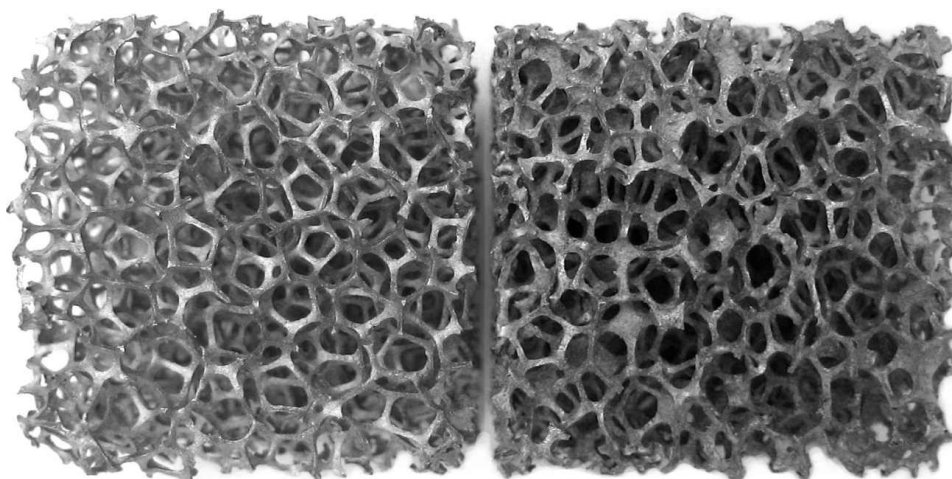
Lastnosti testnih vzorcev so bile izbrane tako, da so se razlikovali v povprečni velikosti celic in v relativni gostoti. Izbrani so bili vzorci dveh različnih relativnih gostot in dveh različnih povprečnih velikosti celic, in sicer vzorci pen z večjimi celicami velikosti okrog 4,5 mm (10 ppi) ter vzorci pen z manjšimi celicami velikosti okrog 2,3 mm (20 ppi). Zaradi načina izdelave so se vzorci z različnimi velikostmi celic razlikovali tudi v zunanjih dimenzijah,



**Slika 3.1:** Vzorci aluminijeve odprto-celične pene proizvajalca m-pore v obliki kock velikosti 40 × 40 × 40 mm z velikostjo celic 10 ppi in v velikosti kock 20 × 20 × 20 mm z velikostjo celic 20 ppi



**Slika 3.2:** Vzorca aluminijeve odprto-celične pene iz skupine  $S_1$  (levo) in  $S_2$  (desno) v obliki kock velikosti  $40 \times 40 \times 40$  mm s povprečno velikostjo celic 10 ppi in relativno gostoto  $\rho_r = 5,03$  % oziroma 6,10 %



**Slika 3.3:** Vzorca aluminijeve odprto-celične pene iz skupine  $S_3$  (levo) in  $S_4$  (desno) v obliki kock velikosti  $20 \times 20 \times 20$  mm s povprečno velikostjo celic 20 ppi in relativno gostoto  $\rho_r = 5,43$  % oziroma 12,01 %

saj proizvajalec izdeluje celično gradivo v ploščah debeline 40 mm pri povprečni velikosti celic 10 ppi in v ploščah debeline 20 mm pri velikosti celic 10 ppi. Vzorci z večjimi celicami so tako imeli okvirne zunanje dimenzije  $40 \times 40 \times 40$  mm, vzorci z manjšimi celicami pa  $20 \times 20 \times 20$  mm. Iz podane velikosti vzorcev in povprečne velikosti njihovih celic je bilo izračunano okvirno število celic po višini vzorcev, ki za podane podatke znaša 15,7 celic.

Na podlagi različnih lastnosti so bili vzorci razvrščeni v štiri skupine, označene z oznakami od  $S_1$  do  $S_4$ . Skupina  $S_1$  predstavlja vzorce s celicami velikosti 10 ppi in nizko relativno gostoto, skupina  $S_2$  prav tako predstavlja vzorce s celicami velikosti 10 ppi, vendar z normalno relativno gostoto. Podobno skupina  $S_3$  predstavlja vzorce s celicami velikosti 20 ppi in nizko relativno gostoto, medtem ko skupina  $S_4$  predstavlja vzorce s celicami velikosti 20 ppi in normalno relativno gostoto.

**Preglednica 3.2:** Izmerjene lastnosti vzorcev odprto-celične pene

Skupina	Vzorec	Velikost celic [ppi]	Dolžina [mm]	Širina [mm]	Višina [mm]	Masa [g]	$\rho_r$ [%]
$S_1$	$V_1$	10	41,35	40,10	40,00	9,00	5,03
	$V_2$		41,50	41,30	39,20	9,18	5,06
	$V_3$		41,10	40,60	40,40	8,87	4,87
	$V_4$		41,70	41,20	39,80	9,20	4,98
	$V_5$		41,10	40,10	40,00	9,26	5,20
	<b>Povprečje</b>		<b>41,10</b>	<b>40,91</b>	<b>39,88</b>	<b>9,10</b>	<b>5,03</b>
$S_2$	$V_1$	10	40,50	40,40	40,05	11,07	6,26
	$V_2$		40,30	40,75	39,70	10,68	6,07
	$V_3$		40,45	40,30	40,00	10,70	6,08
	$V_4$		40,35	40,30	40,05	10,59	6,02
	$V_5$		40,50	40,20	40,05	10,66	6,06
	<b>Povprečje</b>		<b>40,41</b>	<b>40,40</b>	<b>39,97</b>	<b>10,74</b>	<b>6,10</b>
$S_3$	$V_1$	20	18,70	18,60	18,55	0,91	5,24
	$V_2$		19,00	18,80	18,45	0,99	5,58
	$V_3$		19,00	19,00	18,45	1,04	5,76
	$V_4$		18,90	18,85	18,50	0,93	5,25
	$V_5$		19,00	18,90	18,60	0,96	5,31
	<b>Povprečje</b>		<b>18,85</b>	<b>18,90</b>	<b>18,51</b>	<b>0,97</b>	<b>5,43</b>
$S_4$	$V_1$	20	19,10	18,90	18,15	2,05	11,57
	$V_2$		19,00	18,90	18,10	2,11	12,02
	$V_3$		18,75	18,35	18,20	2,10	12,41
	$V_4$		18,75	18,65	18,20	2,07	12,04
	$V_5$		18,90	18,65	18,15	2,08	12,04
	<b>Povprečje</b>		<b>18,71</b>	<b>18,88</b>	<b>18,16</b>	<b>2,08</b>	<b>12,01</b>

Zaradi neurejene strukture preizkušanih odprto-celičnih pen se njihova struktura med posameznimi vzorci razlikuje, kar nakazuje pričakovane razlike v rezultatih eksperimentalnih preizkusov. Da bi se zmanjšal vpliv neurejenosti na rezultate eksperimentalnih preizkusov, je bilo za vsako skupino preizkušancev uporabljenih pet vzorcev aluminijeve odprto-celične pene, kar skupaj v štirih skupinah predstavlja dvajset vzorcev. Podrobnejše geometrijske in masne lastnosti teh vzorcev podaja preglednica 3.2.

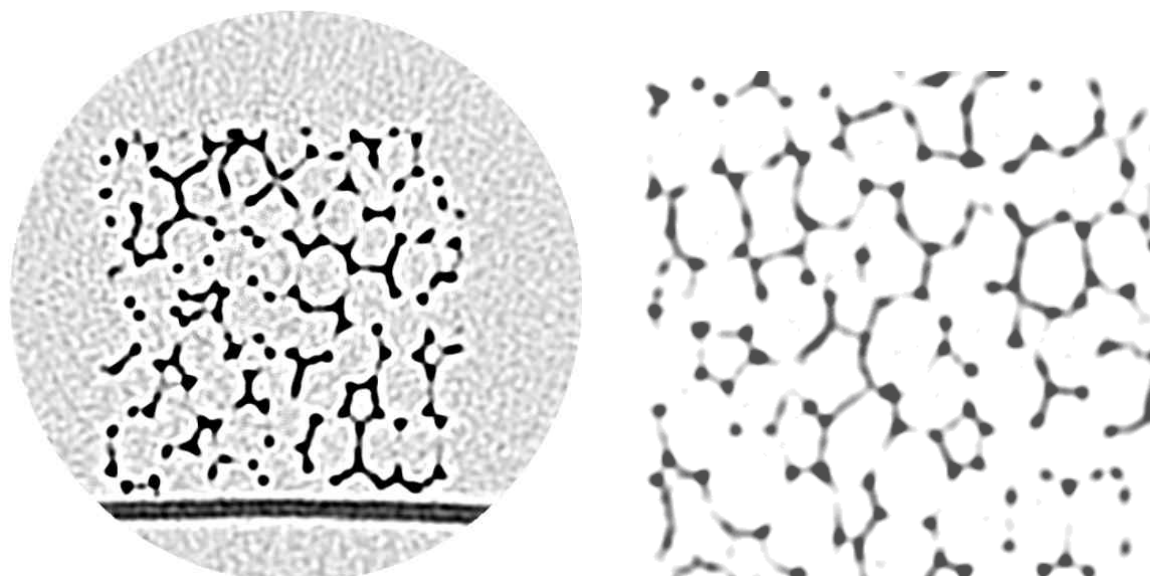
Vsi vzorci ene skupine so bili izrezani iz iste plošče odprto-celične pene m-pore z izbrano relativno gostoto in povprečno velikostjo celic. Za vse nadaljnje analize so bili vzorci orientirani tako, da je njihova višina sovpadala z višino plošč, iz katerih so bili izrezani. S tem namenom je bila na vsakem izmed vzorcev označena tista površina, ki predstavlja zgornjo površino plošče (slika 3.1). Iz primerjave dolžine, širine in višine posameznih vzorcev znotraj skupine (preglednica 3.2) je razvidno njihovo odstopanje, ki je posledica načina priprave vzorcev s strani proizvajalca (kot dolžina je izbrana daljša izmed obeh dimenzij vzorca v prečni ravnini plošče). Največja odstopanja v dolžini se pojavijo pri vzorcu  $V_1$  iz skupine  $S_3$ , ki od povprečne vrednosti odstopa za 1,16 %. V širini največje odstopanje znaša 1,82 % pri vzorcu  $V_3$  iz skupine  $S_4$ , v višini je največje odstopanje enako 1,710 % pri vzorcu  $V_2$  iz skupine  $S_1$ .

Neposredna primerjava oblike, velikosti in strukture celic vzorcev enakih zunanjih dimenzij in različnih relativnih gostot je prikazana na slikah 3.2 in 3.3, ki prikazujeta vzorce s povprečno velikostjo celic 10 ppi ( $S_1$  in  $S_2$ ) oziroma 20 ppi ( $S_3$  in  $S_4$ ) ter z nizko relativno gostoto na levi in normalno relativno gostoto na desni strani slike. Iz slike 3.2 je razvidno, da ima vzorec iz skupine  $S_2$  nekoliko manjše celice z debelejšimi robovi. Zaradi manjših celic je skupna dolžina vseh robov celic v vzorcu večja, kar skupaj z debelejšimi robovi pomeni večji delež osnovnega materiala v vzorcu in posledično višjo relativno gostoto vzorca iz skupine  $S_2$ . Ta opazovanja potrjujejo tudi rezultati rekonstrukcije v nadaljevanju.

Medtem ko znaša razlika v povprečni gostoti med vzorci iz skupin  $S_1$  in  $S_2$  okrog 1 %, je razlika pri vzorcih iz skupin  $S_3$  in  $S_4$  dosti večja in znaša približno 6,5 %. Iz slike 3.3 je razvidno, da so velikosti celic obeh vzorcev skoraj enake, medtem ko so debeline robov celic vzorca iz skupine  $S_4$  nekoliko večje. Posebej opazne pa so odebelitve na mestih stičišč robov celic pri vzorcu iz skupine  $S_4$ . Te odebelitve pri najmanjših oknih celic povzročijo, da so okna v celoti zaprta in postanejo del odebelitve. Ta dodaten material na stičiščih robov celic je razlog za visoko razliko v relativni gostoti med vzorci iz skupin  $S_3$  in  $S_4$ .

## 3.2 Uporabljene metode

Opravljena je bila analiza zgradbe dvajsetih vzorcev aluminijeve odprto-celične pene, opisanih v prejšnjem poglavju. Vsi vzorci so bili analizirani s pomočjo računalniške tomografije z X-žarki, kjer je 3D slika zgrajena s pomočjo matematične rekonstrukcije seta 2D slik. Uporabljen je bil večvrstni računalniški tomograf (VRT) Toshiba-Aquillion 64 Radiološkega oddelka Univerzitetnega kliničnega centra v Mariboru. Uporabljena je bila najvišja ločljivost tomografa, in sicer je le-ta znašala v presečni ravnini 0,12 mm, v vzdolžni smeri pa 0,30 mm (razdalja med posameznimi prerezi). Za natančnejše meritve bi bilo potrebno uporabiti računalniški mikro-tomograf, kateri dosegajo ločljivosti do 1  $\mu\text{m}$ .



**Slika 3.4:** Prerez vzorca kovinske pene dobljen z metodo računalniške tomografije (levo) ter obdelana slika za nadaljnjo obdelavo (desno); temnejša barva predstavlja območja večje absorpcije X-žarkov

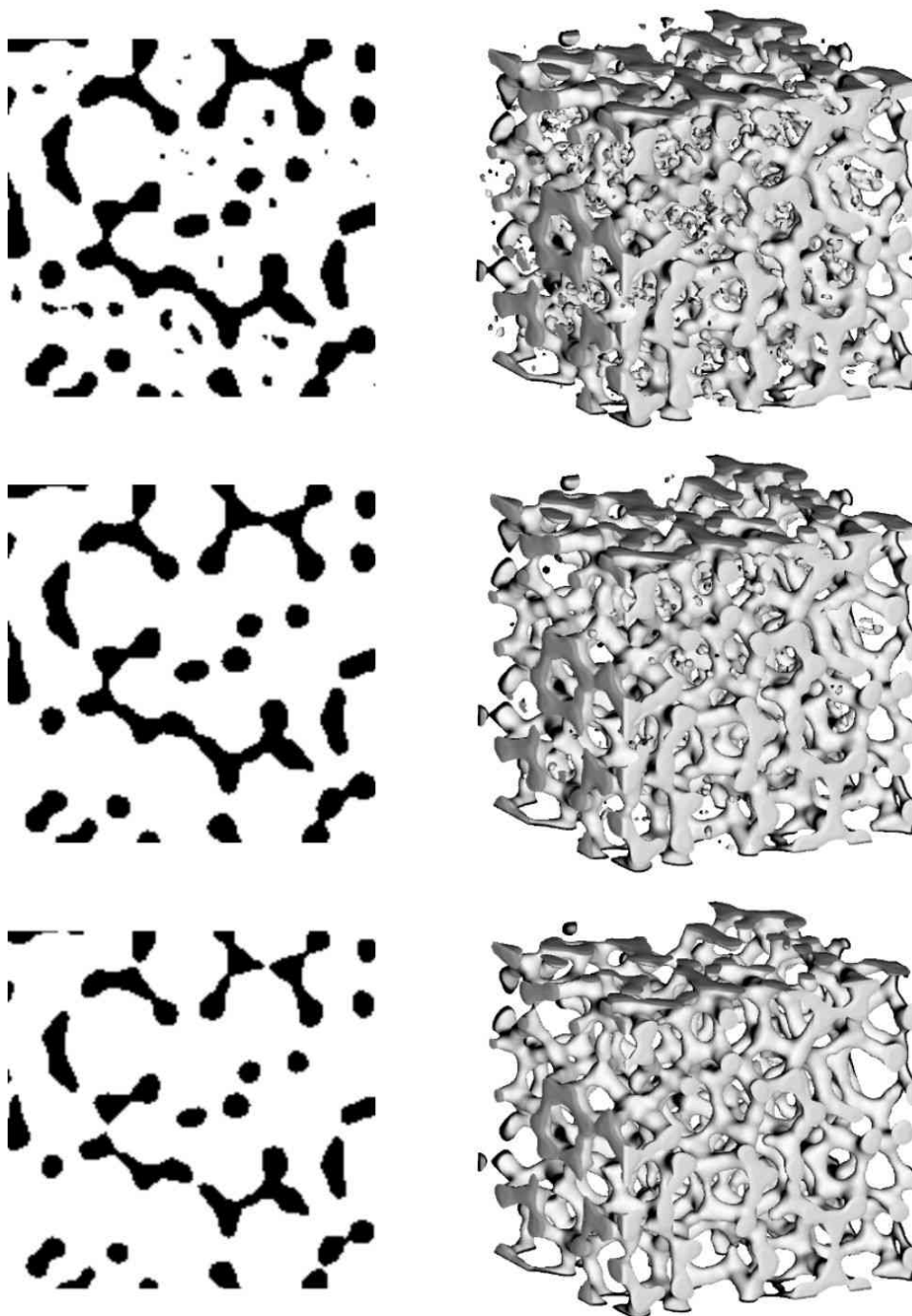
Eden izmed prerezov vzorca aluminijeve pene je prikazan na sliki 3.4. Pri prehodu X-žarkov skozi gradivo le-to absorbira X-žarke v odvisnosti od lokalne gostote gradiva, in sicer višja kot je gostota gradiva, večja je absorpcija X-žarkov. Na sliki je stopnja absorpcije X-žarkov, ponazorjena z 8-bitno sivinsko barvno lestvico (256 barv). Več žarkov kot je gradivo na določenem mestu absorbiralo, temnejša je slika na tistem mestu in obratno.

Tridimenzionalna slika analiziranega objekta nastane z zaporedno razporeditvijo posnetih prerezov, pri čemer je potrebno najprej izenačiti ločljivosti uporabljene v presečni ravnini in v vzdolžni smeri ter prerezom dodati še tretjo dimenzijo. Pri opravljenih meritvah je bila ločljivost v presečni ravnini v obeh smereh enaka, v vzdolžni smeri pa 2,5 večja. Zaradi tega so bili s pomočjo linearne interpolacije zgrajeni dodatni prerezi v vzdolžni smeri tako, da je bila ločljivost v vseh smereh enaka. Prerezom je bila nato dodana še tretja dimenzija tako, da je bila vsaka točka slike spremenjena v kocko (voksel) velikosti  $0,12 \times 0,12 \times 0,12$  mm.

Tridimenzionalne slike, dobljene z računalniško tomografijo ali z magnetno resonanco vsebujejo veliko količino informacij o geometrijskih značilnostih pene, a postopek pridobitve teh informacij je zahteven. Za ta namen je bil zasnovan računalniški program za prikaz in analizo geometrijske strukture odprto-celičnih pen iz 3D slik.

### 3.2.1 Segmentacija zajetih 2D slik

Prvi korak analize geometrije pene predstavlja odločitev, kateri vokseli 3D slike predstavljajo osnovni material pene in kateri predstavljajo praznine. Ta korak se v analizi slik



**Slika 3.5:** Vpliv izbranega barvnega praga na binarno sliko prereza (levi stolpec) in na pripadajoč 3D model opazovanega objekta (desni stolpec); barvni prag se zvišuje od zgornje vrstice proti spodnji

imenuje segmentacija. Zajeta 3D slika je namreč sestavljena iz slik z 8-bitno barvno globino, za predstavitev volumna pa je potrebno sestaviti binarno sliko. Ta binarna slika oziroma volumski model je slika, na kateri vokslji z vrednostjo 1 (črna) predstavljajo osnovni material celičnega gradiva, vokslji z vrednostjo 0 (bela) pa predstavljajo prazen prostor. Potrebno je torej določiti barvni prag, ki loči osnovni material od praznin.

Na začetku se izbere dovolj nizek barvni prag, da so v 3D sliki zajete vse podrobnosti opazovanega objekta. Posledica tega je, da so v takšni sliki zajeti tudi šum in napake zaradi rekonstrukcije prereza. Nato se barvni prag postopno povečuje tako dolgo, da se iz slike odpravijo nezaželene motnje. Končno vrednost barvnega pragu je mogoče določiti na osnovi opazovanja posameznih prerezov ali s pomočjo opazovanja nastalega 3D modela po segmentaciji.

Prvi pristop je enostavnejši, saj omogoča določitev barvnega pragu na podlagi slike enega prereza, a ima tudi pomanjkljivost. Barvni prag, določen na podlagi slike enega prereza, namreč ne zagotavlja, da je izbran prag ustrezen tudi za vse ostale prereze. Takšen pojav prikazuje slika 3.5, ki predstavlja vpliv višanja barvnega pragu na sliko enega prereza. Levi stolpec na sliki predstavlja prereze pene, desni stolpec pripadajoč 3D model pene. Izbira neustreznega barvnega pragu je prikazana v drugi vrsti slike 3.5. Prag je v tej vrsti izbran tako, da so motnje na opazovani binarni sliki odpravljene in šele pripadajoč 3D model pene pokaže, da so motnje na nekaterih drugih prerezih ostale. Metoda neposrednega opazovanja 3D modela daje torej celovitejši vpogled na vpliv izbranega barvnega praga na 3D sliko opazovanega objekta. Vendar je prikaz 3D modela dosti bolj zahtevna in časovno potratna operacija.

Problem časovne zahtevnosti priprave slike 3D modela je bil rešen z uporabo metode sledenja žarkov (*angl.: ray tracing*). Metoda dosega eno najbolj realističnih upodobitev objektov, saj lahko simulira večkratne odboje žarkov med objekti, transparentnost površin in sence ter tako reši problem globalne osvetlitve (*angl.: global illumination*) [59]. Največkrat metoda temelji na geometrijskem modelu, kjer je osnova žarek, ki potuje po prostoru in se odbija od površin.

Za izračun slike 3D modela je bila uporabljena poenostavljena metoda sledenja žarku nazaj, kjer se skozi vsako točko nastajajoče slike 3D modela pošlje žarek. Barva točke se nato izračuna na podlagi barve, osvetljenosti in transparentnosti objektov, ki jih žarek na svoji poti zadane. V splošnem je takšen izračun časovno zelo zahteven, zato je bil močno poenostavljen. V izračunu je bil upoštevan le difuzni odboj od opazovanega objekta, medtem ko so bili zrcalni odboj, transparentnost in sence zanemarjeni. Difuzen odboj svetlobe od opazovanega objekta določa enačba:

$$I_d = k_d \sum_n \left( \vec{L}_n \cdot \vec{N} \right), \quad (3.1)$$

kjer  $I_d$  predstavlja jakost svetlobe difuznega odboja,  $k_d$  difuzno konstanto materiala in  $n$  število luči. Vektor  $\vec{L}_n$  predstavlja smer  $n$ -te luči, vektor  $\vec{N}$  pa normalo površine. Oba vektorja morata biti normirana, tako da izraz v oklepaju predstavlja kosinus kota med

njima. Razen normalnega vektorja  $\vec{N}$  so vsi členi enačbe konstantni in neodvisni od izbranega barvnega pragu.

Za izračun difuznega odboja je torej potrebno poznati normalo površine v vsaki točki opazovanega objekta, ki ga predstavlja 3D slika, sestavljena iz vokslov različnih barv. V bistvu je takšna 3D slika diskretno skalarno polje, kjer je vrednost skalarja podana z barvo voksla, ki se nahaja na izbranem mestu v prostoru. Površino opazovanega objekta tvorijo površine s konstantno vrednostjo skalarja (barvni prag) oziroma izo-površine skalarne polja, katerih normala je enaka gradientu skalarne polja  $\vec{\nabla}f$ , ki ga podaja enačba:

$$\vec{\nabla}f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k}. \quad (3.2)$$

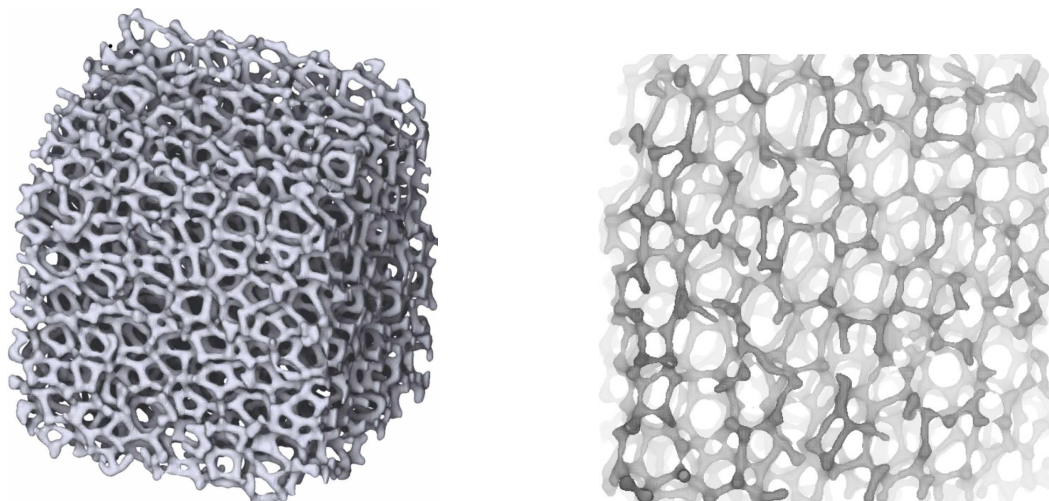
Poleg opisanih poenostavitvev je bil celoten izračun slike 3D modela opravljen na grafični kartici. To je mogoče z uporabo arhitekture NVIDIA CUDA, ki omogoča uporabo procesorjev grafične kartice za reševanje splošnih problemov [60]. Uporabljena je bila grafična kartica Nvidia Geforce 8600M GT, ki uporablja štiri procesorje z osmimi jedri. Takšna grafična kartica lahko hkrati obdela 32 točk slike 3D modela, s čimer je dosežena dovolj visoka hitrost izračuna slike za interaktivno delo. Razvita programska oprema omogoča prostorske premike in rotacije telesa ter opazovanje vpliva spremembe barvnega pragu v realnem času. Rezultat poenostavljene metode sledenja žarku je prikazan v desnem stolpcu slike 3.5.

S pomočjo uporabe opisane metode prikaza slike 3D modela se močno izboljša kvaliteta binarne slike, kar je zelo pomembno, saj se s segmentacijo 3D slike določi, kje v prostoru se nahaja material celičnega gradiva in kje se nahajajo praznine. S segmentacijo nastane mejna površina, ki je zelo pomembna za prepoznavanje in analizo geometrije zajete 3D slike. Dobljena meja predstavlja osnovo tudi za površinski model pene (slika 3.6). Narejen je bil s pomočjo algoritma potujočih kock (*angl.: marching cubes*) iz zajete 3D slike z namenom optične verifikacije zajete slike in možnosti primerjave s topološkim in rešetkastim modelom, ki sta opisana v nadaljevanju.

### 3.2.2 Izgradnja topološkega modela

V naslednjem koraku analize pene iz volumskega modela (bitna slika) nastane topološki model. Ta služi za pridobitev večine geometrijskih značilnosti, ki so zajete v volumskem modelu, zajema pa položaje robov, oken in celic, ki sestavljajo celično strukturo pene. Topološki model nastane iz volumskega modela s pomočjo metode obdelave slik, imenovane tanjšanje volumna. To je metoda, pri kateri se postopno odstranjujejo voksli zunanje plasti volumskega modela, dokler struktura ne doseže debeline enega voksla. Uporabljen





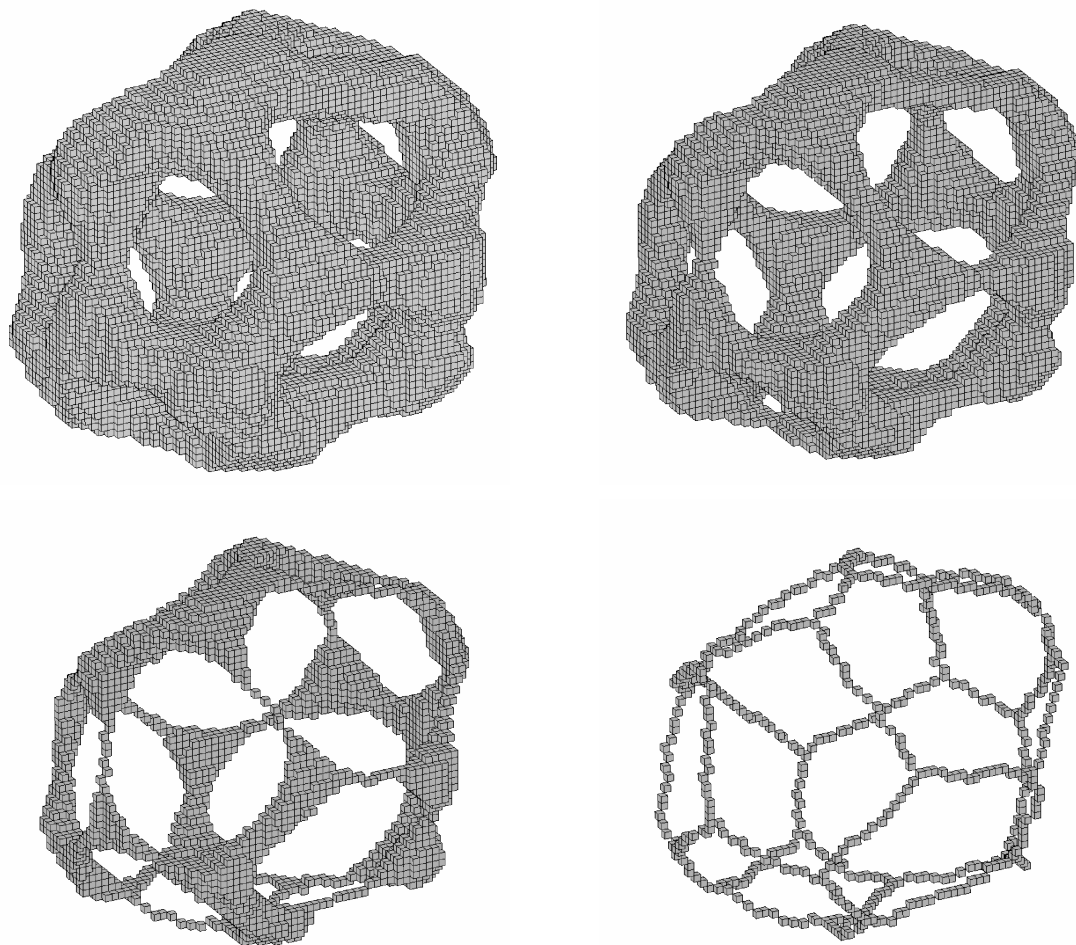
**Slika 3.6:** Površinski model pene v izometričnem pogledu (levo) in pogled od zgoraj (desno); za nazornejši prikaz strukture so bile na desni sliki spodnje plasti pene odstranjene z učinkom megle

algoritem [61] zagotavlja, da nastali topološki model ohrani povezljivost iz volumskega modela in da se nastali skelet nahaja čim bližje sredini volumskega modela. Postopek tanjšanja volumna, izveden na eni vzorčni celici, je prikazan na sliki 3.7.

### 3.2.3 Izgradnja rešetkastega modela

Iz topološkega modela nastane rešetkast model (slika 3.8 levo). Najprej se v topološkem modelu identificirajo stičišča robov celic. To so tisti vokslji, ki so povezani z vsaj še termi drugimi vokslji. Nato se določi povezanost med stičišči robov v topološkem modelu z metodo iskanja v širino. Povezava med stičiščema, ki stičišča neposredno poveže, ponazarja rob celice. Tako dobimo rešetkast model, ki vsebuje položaje stičišč robov celic in ustrezne povezave med njimi. Tak model vsebuje tudi nekaj geometrijskih popačenj, ki so posledica šuma pri zajemanju 3D slike in neenakomerne geometrije pene. Odebeljena stičišča robov celic pene lahko namreč povzročijo nastanek dveh ali več ločenih stičišč v topološkem modelu na mestu, kjer se v volumskem modelu nahaja le eno stičišče. Vendar pa so razdalje med temi stičišči zelo majhne in se lahko odpravijo z avtomatskim glajenjem modela. Iz informacij o povezljivosti stičišč se z metodo iskanja v širino določi, kateri robovi skupaj tvorijo posamezno okno in katera okna tvorijo posamezno celico.

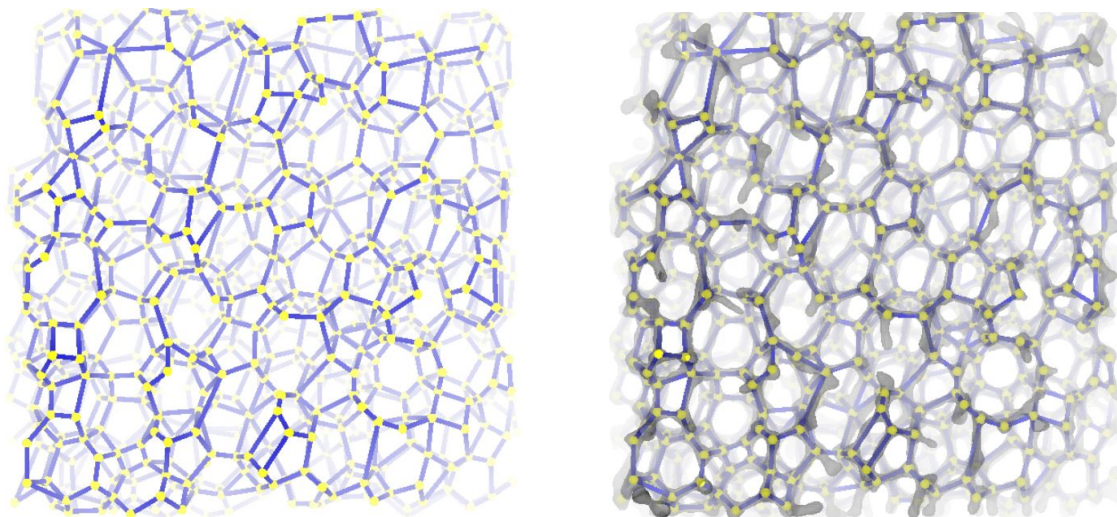
Postopek iskanja oken in celic v rešetkastem modelu predstavlja zelo zahteven problem, predvsem zaradi nepopolnosti informacij v strukturi pene in geometrijske neurejenosti analizirane strukture. Oken in celic v modelu ni mogoče iskati s pomočjo geometrijskih pravil, saj okna ne ležijo v eni ravnini, ampak le s pomočjo topološke povezanosti njihovih robov. Tako je bila za iskanje oken in celic uporabljena metoda na osnovi teorije grafov za iskanje najkrajših enostavnih ciklov v grafu, ki je opisana v nadaljevanju. Graf rešet-



**Slika 3.7:** Tanjšanje volumna celice celičnega gradiva; nastali topološki model celice ohrani povezljivost volumskega modela, njegov skelet pa se nahaja na sredini stanjšane volumna

kastega modela pene je bil zgrajen tako, da so stičišča robov celic predstavljala vozlišča v grafu, robovi celic pa povezave v grafu.

Najprej so bili v grafu poiskani vsi cikli z metodo iskanja v širino, nato so bili kot okna izbrani le najmanjši enostavni cikli. To so cikli, v katerih se vozlišča ne ponavljajo (enostavni) in v katerih ne obstaja krajša pot med poljubnima dvema vozliščema v ciklu kot je pot po ciklu (najkrajši). Za določitev najkrajše poti med dvema točkama je bil uporabljen algoritem Floyd-Warshall [62], ki v enem prehodu izračuna najkrajšo pot med vsemi vozlišči grafa. Časovna zahtevnost omenjenega algoritma znaša  $\Theta(n^3)$ , kjer je  $n$  število vozlišč v grafu. Tako čas določitve najkrajših ciklov eksponentno narašča s številom vozlišč grafa. Zaradi tega je bil v tem primeru za izračun razdalj med vozlišči grafa uporabljen paralelni Floyd-Warshallov algoritem implementiran s pomočjo arhitekture CUDA. Algoritem se je tako izvajal na grafični kartici z 32 jedri, s čimer je bil čas izvajanja algoritma skrajšan za približno  $18\times$ . Po določitvi oken se ponovno z metodo iskanja v širino poiščejo zaprte



**Slika 3.8:** Rešetkast model pene (levo) in prikaz ujemanja med rešetkastim in površinskim modelom pene v sivi barvi (desno); za nazornejši prikaz strukture je bil na slikah dodan učinek megle

celice v modelu. Pri iskanju celic pride do izraza nepopolnost informacij zajetih v strukturi pene, saj za določene dvojice sosednjih celic ni mogoče ugotoviti, ali gre v resnici za dve ločeni celici ali samo za eno večjo celico.

Meritve geometrije pene so bile opravljene na tako pripravljenih računalniških modelih, saj so bile vse značilnosti pene shranjene v računalniškem pomnilniku. Rezultat opisane metode analize slik so modeli pen, ki so izpeljani neposredno iz geometrijske razporeditve robov celic v zajeti 3D sliki, kar zagotavlja natančnost in zanesljivost modela v primerjavi z realno celično strukturo. Ujemanje rešetkastega modela z zajeto 3D sliko je predstavljeno na sliki 3.8 desno.

### 3.3 Rezultati in diskusija

Izvedena je bila analiza geometrije dvajsetih vzorcev odprto-celične aluminijeve pene proizvajalca m-pore, za validacijo razvitih računalniških modelov odprto-celičnih pen opisanih v poglavju 4. Za potrebe validacije so bile statistično ovrednotene sledeče geometrijske lastnosti vzorcev odprto-celičnih pen: dolžine robov celic  $l$ , notranji koti med robovi celic  $\phi$ , velikost površine oken celic  $A$  in velikost prostornin celic  $V$  ter dve topološki lastnosti: število robov v oknu  $N_{ro}$  in število oken v celici  $N_{ok}$ . Pregled statističnih vrednosti šestih opazovanih lastnosti za vse štiri skupine podaja preglednica 3.3.

Vse izbrane lastnosti so bile določene za vsak vzorec pene posebej in naknadno še povprečne vrednosti za vsako od štirih skupin vzorcev  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  in  $S_4$ . Za vsako od izbranih lastnosti so bile določene povprečna vrednost, standardni odklon, največja in najmanjša vrednost ter statistična porazdelitev. Za primerjavo z razvitimi računalniškimi modeli

**Preglednica 3.3:** Povprečni statistični podatki vzorca pene

Skupina	Opazovana veličina	Povprečje	Standarden odklon	Najmanjša vrednost	Največja vrednost
$S_1$	Dolžina roba [mm]	2,37	0,68	1,01	5,39
	Notranji kot [°]	105,10	18,89	27,08	171,40
	Površina okna [mm <sup>2</sup> ]	9,05	4,18	0,84	26,39
	Št. robov okna	4,85	0,82	3	9
	Volumen celice [mm <sup>3</sup> ]	112,08	36,55	10,13	161,81
	Št. oken v celici	13,03	2,48	6	18
$S_2$	Dolžina roba [mm]	2,10	0,59	0,97	4,74
	Notranji kot [°]	102,64	19,91	25,85	167,46
	Površina okna [mm <sup>2</sup> ]	7,44	3,85	0,75	23,30
	Št. robov okna	4,70	0,80	3	8
	Volumen celice [mm <sup>3</sup> ]	81,71	23,41	9,24	151,03
	Št. oken v celici	12,94	2,21	5	18
$S_3$	Dolžina roba [mm]	1,56	0,54	0,48	3,91
	Notranji kot [°]	104,63	18,43	24,71	169,43
	Površina okna [mm <sup>2</sup> ]	3,03	1,47	0,33	12,20
	Št. robov okna	4,81	0,84	3	9
	Volumen celice [mm <sup>3</sup> ]	27,72	5,07	1,43	38,19
	Št. oken v celici	12,89	2,57	5	18
$S_4$	Dolžina roba [mm]	1,34	0,53	0,41	3,83
	Notranji kot [°]	103,22	20,03	23,16	170,66
	Površina okna [mm <sup>2</sup> ]	3,00	1,47	0,34	13,29
	Št. robov okna	4,79	0,88	3	9
	Volumen celice [mm <sup>3</sup> ]	14,62	3,98	1,13	21,73
	Št. oken v celici	13,21	2,61	6	17

odprto-celičnih pen so bili uporabljeni statistični rezultati celotnih skupin vzorcev, saj-le ti dajejo celovitejši vpogled v strukturo odprto-celičnih pen kot vsak posamezen vzorec zase.

Za dolžino robov, velikost notranjih kotov, površine oken in volumne celic vseh štirih skupin vzorcev so bile izdelane njihove porazdelitve na osnovi izračunane povprečne vrednosti  $\mu$  in standardnega odklona  $\sigma$ . Velikosti opazovanih lastnosti so bile diskretizirane v liho število intervalov širine enega standardnega odklona tako, da je predstavljala pov-

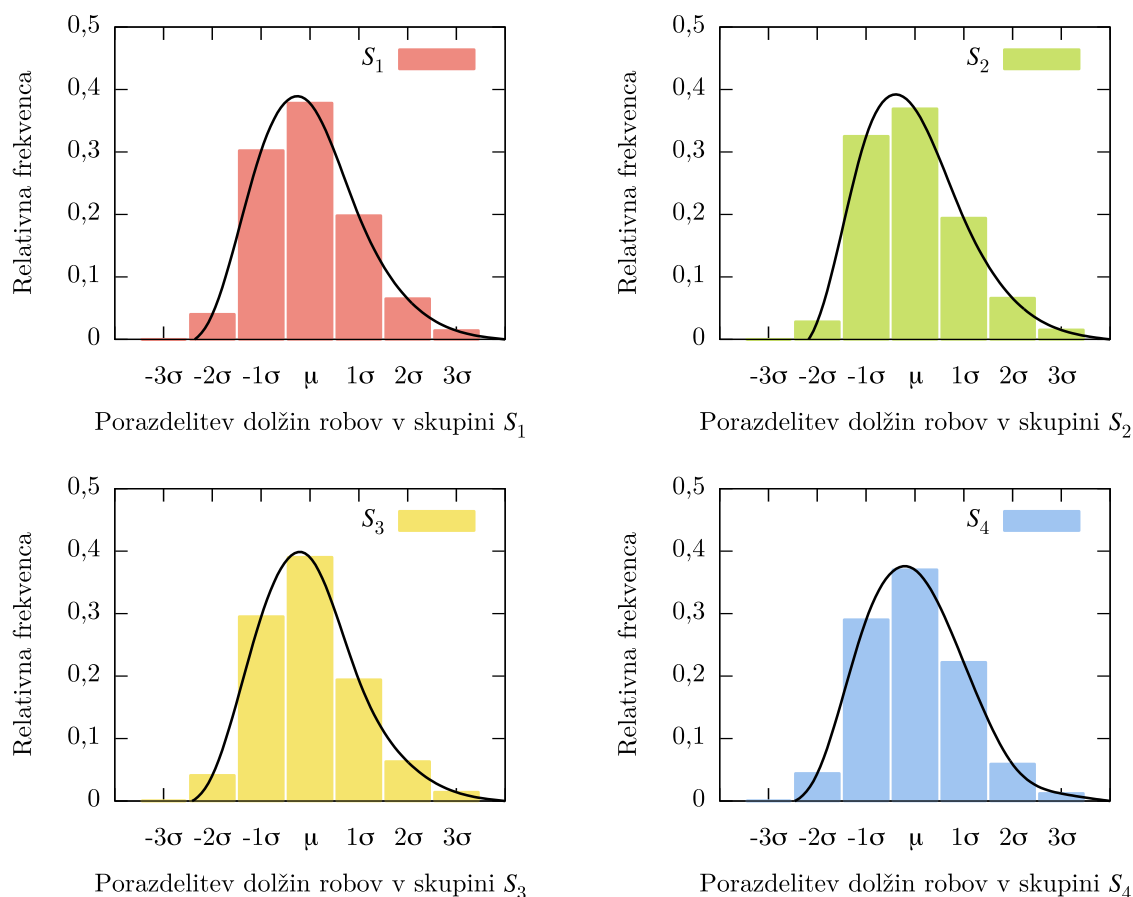
prečna vrednost  $\mu$  sredino srednjega intervala. Za vsakega od intervalov je bilo določeno število vzorcev (frekvenca), katerih velikost opazovane lastnosti je bila med spodnjo in zgornjo mejo intervala. Za lažjo primerjavo med posameznimi skupinami vzorcev pen je bilo število vzorcev v posameznih intervalih normirano s številom vseh vzorcev posamezne lastnosti. Porazdelitve so grafično predstavljene v obliki stolpičnih diagramov na slikah od 3.9 do 3.12.

Analizirani so bili vzorci dveh različnih velikosti celic, in sicer velikosti 10 ppi in 20 ppi, ki so bili posneti pri enaki ločljivosti tomografa, ki je v presečni ravnini znašala 0,12 mm, v vzdolžni smeri pa 0,30 mm. Medtem ko je ta ločljivost povsem zadostovala za zajem 3D slike vzorcev z večjo velikostjo celic ( $S_1, S_2$ ), so se v postopku priprave rešetkastih modelov vzorcev z manjšo velikostjo celic ( $S_3, S_4$ ) pokazala določena odstopanja. Ta odstopanja so delno nastala zaradi tanjših robov celic, ki se pojavijo v vzorcih z manjšimi celicami. Da so bili v 3D slikah teh vzorcev zajeti tudi najtanjši robovi celic, je bil namreč barvni prag pri segmentaciji nekoliko znižan. Posledica tega je bila odebelitev stičišč robov, zaradi katere je lahko prišlo pri tanjšanju volumna do razlik v končnem položaju stičišč robov. Ta odstopanja so pri vzorcih z manjšimi celicami še bolj izrazita zaradi krajših robov celic. Rešitev bi bila uporaba višje ločljivosti pri zajemu 3D slike, kar pa zaradi omejitev uporabljene opreme ni bilo mogoče. Tako so bili pri meritvah geometrijskih lastnosti vzorcev z manjšimi celicami izmerjeni nekoliko višji standardni odkloni, kar je vplivalo tudi na samo porazdelitev njihovih geometrijskih lastnosti, vendar zaradi prenizke uporabljene ločljivosti ni mogoče ugotoviti, ali so višje vrednosti standardnih odklonov posledica uporabljene ločljivosti ali so dejansko prisotni v strukturi.

### 3.3.1 Dolžine robov celic

V prvi skupini vzorcev  $S_1$  je bilo prepoznanih in izmerjenih 29047 robov, v skupini  $S_2$  46204 robov, v skupini  $S_3$  12209 robov in v skupini  $S_4$  13515 robov celic. Osnovne statistične vrednosti so podane v preglednici 3.3, porazdelitev dolžin pa je prikazana na sliki 3.9. Iz preglednice so razvidne pričakovane razlike v povprečni dolžini robov celic med vzorci s celicami večje ( $S_1$  in  $S_2$  - 10 ppi) in manjše ( $S_3$  in  $S_4$  - 20 ppi) velikosti in tudi manjše razlike v dolžini robov celic enakih velikosti. In sicer pri enaki nazivni velikosti celic so dolžine robov celic pri vzorcih z višjo relativno gostoto krajše. Višja relativna gostota je namreč dosežena ravno s krajšimi in nekoliko debelejšimi robovi celic.

Razmerja posameznih projekcij povprečnih dolžin na koordinatne osi so podana v preglednici 3.4, kjer so komponente dolžin robov normirane na najkrajšo komponento in razporejene po naraščajočem vrstnem redu. Iz preglednice je razvidno, da izstopa predvsem ena izmed komponent dolžin robov, kar nakazuje na to, da je bila pena natezno deformirana v tisti smeri. Analiza posameznih smeri je pokazala, da so robovi celic naj-



**Slika 3.9:** Primerjava relativne frekvenca verjetnostne porazdelitve dolžin robov celic za vse štiri skupine opazovanih vzorcev  $S_1, S_2, S_3$  in  $S_4$ ;  $\mu$  predstavlja povprečno vrednost dolžine in  $\sigma$  standarden odklon

daljši v smeri pravokotno na ploščo, iz katere so bili izrezani vzorci. Obstajajo tudi razlike v ravnini plošče, ki pa so dosti manjše in se razlikujejo tudi po smereh od vzorca do vzorca ter znašajo okrog 5 %.

Primerjava porazdelitev dolžin robov (slika 3.9) med skupinami vzorcev pokaže veliko podobnost med obliko in vrednostni porazdelitve. Največje odstopanje relativne frekvenca srednjega intervala se pojavi med skupinama  $S_2$  in  $S_3$  in znaša 5,59 %. Razvidno je, da dolžine robov bolj odstopajo proti dolžini večji od povprečne, kar kaže na desno asime-

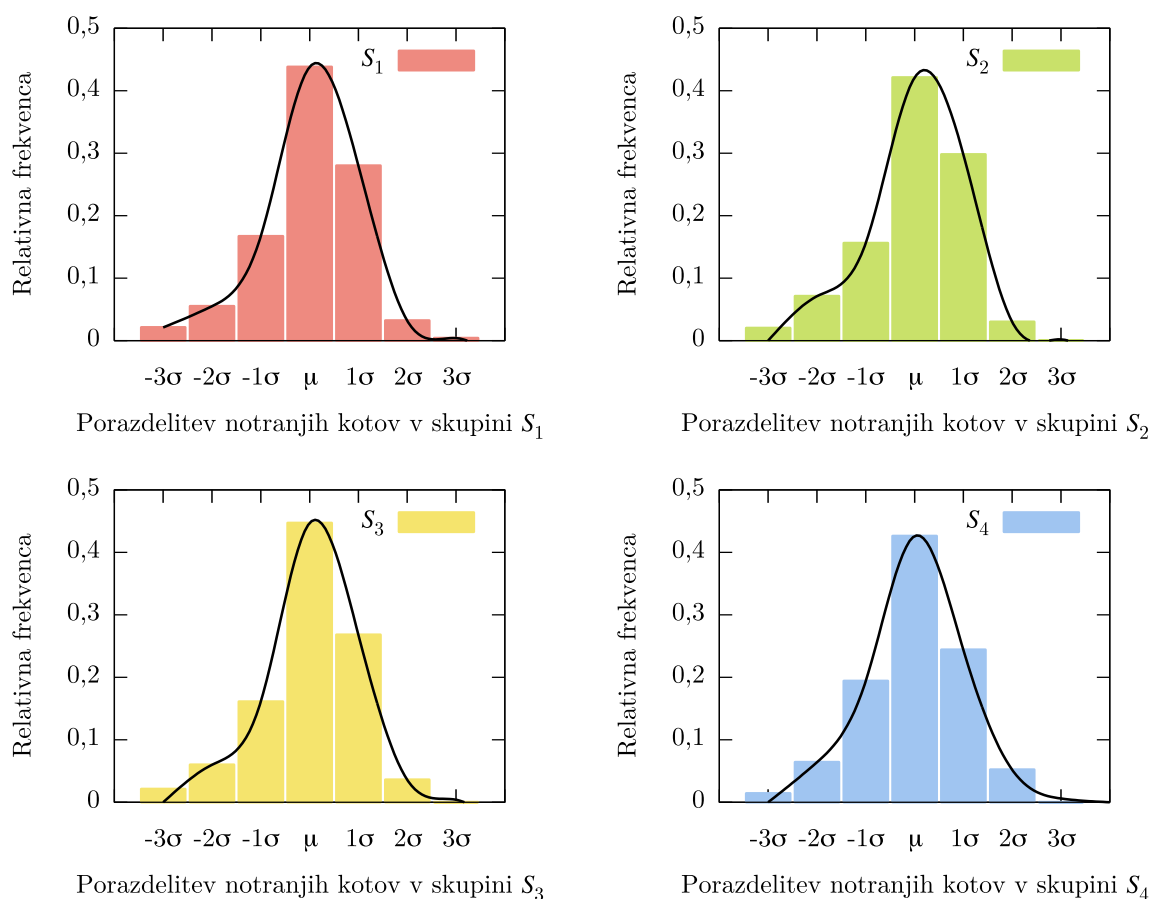
**Preglednica 3.4:** Povprečna stopnja deformiranosti celic pene

Skupina	Dolžina roba [mm]	Relativne komponente dolžin robov [%]		
$S_1$	2,37	100,00	106,11	123,64
$S_2$	2,10	100,00	103,96	115,80
$S_3$	1,56	100,00	105,36	114,62
$S_4$	1,34	100,00	105,61	116,51

trično porazdelitev, ki je značilna za naravne sisteme in se dobro ujema tudi s predhodnimi raziskavami [63]. Zaradi neposredne povezave dolžin robov celic z velikostjo površin oken in prostornin celic to vpliva tudi na rezultate njihovih vrednosti in porazdelitev.

### 3.3.2 Notranji koti med robovi celic

Zunanja obremenitev se pri odprto-celičnih gradivih neposredno prenese tako na robove celic kot tudi na njihova stičišča. Zaradi tega lahko analiza notranjih kotov poda pomembne ugotovitve, kako se pena obnaša pod obremenitvijo. V analiziranih skupinah vzorcev je bilo prepoznanih 67605 notranjih kotov v skupini  $S_1$ , 107242 notranjih kotov v skupini  $S_2$ , 13349 notranjih kotov v skupini  $S_3$  in 14109 notranjih kotov v skupini  $S_4$ . Osnovne statistične vrednosti so podane v preglednici 3.3, porazdelitev notranjih kotov pa je prikazana na sliki 3.10. Primerjava porazdelitev med skupinami vzorcev pokaže veliko podobnost med obliko in vrednostmi porazdelitve. Največje odstopanje relativne frekvence srednjega intervala se pojavi med skupinama  $S_2$  in  $S_3$  in znaša 5,76 %.



**Slika 3.10:** Primerjava relativne frekvence verjetnostne porazdelitve notranjih kotov v okenih celic za vse štiri skupine opazovanih vzorcev  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  in  $S_4$ ;  $\mu$  predstavlja povprečno vrednost dolžine in  $\sigma$  standarden odklon



Povprečni notranji kot med robovi celic znaša med  $102,66^\circ$  in  $105,10^\circ$  in je v vseh skupinah manjši, vendar blizu pričakovanemu ravnotežnemu kotu  $109,5^\circ$ . To je kot, pod katerim se srečajo štirje robovi v ravnotežni strukturi, kot je opisal Plateau [49]. Tudi drugi avtorji so izmerili notranje kote manjše od ravnotežnega. Obstaja več vzrokov za odstopanje od pričakovanih teoretičnih zakonov. Prvi vzrok je, da trdne pene niso ravnotežne strukture, kot je bilo omenjeno že v uvodu. Takšne pene se namreč strdijo, preden je ravnotežno stanje v strukturi doseženo. Drugi vzrok je proizvodni proces, med katerim delujejo zunanje sile na strjujočo se strukturo. Zaradi tega površinska napetost ni glavna sila, ki določa strukturo nastajajoče pene, ampak so to zunanje sile. Dodatno se lahko v realni strukturi za razliko od teoretične, pojavijo tudi stičišča z več kot štirimi robovi, pri katerih so notranji koti med robovi dosti manjši. Samo nekaj takšnih stičišč robov zniža povprečen notranji kot.

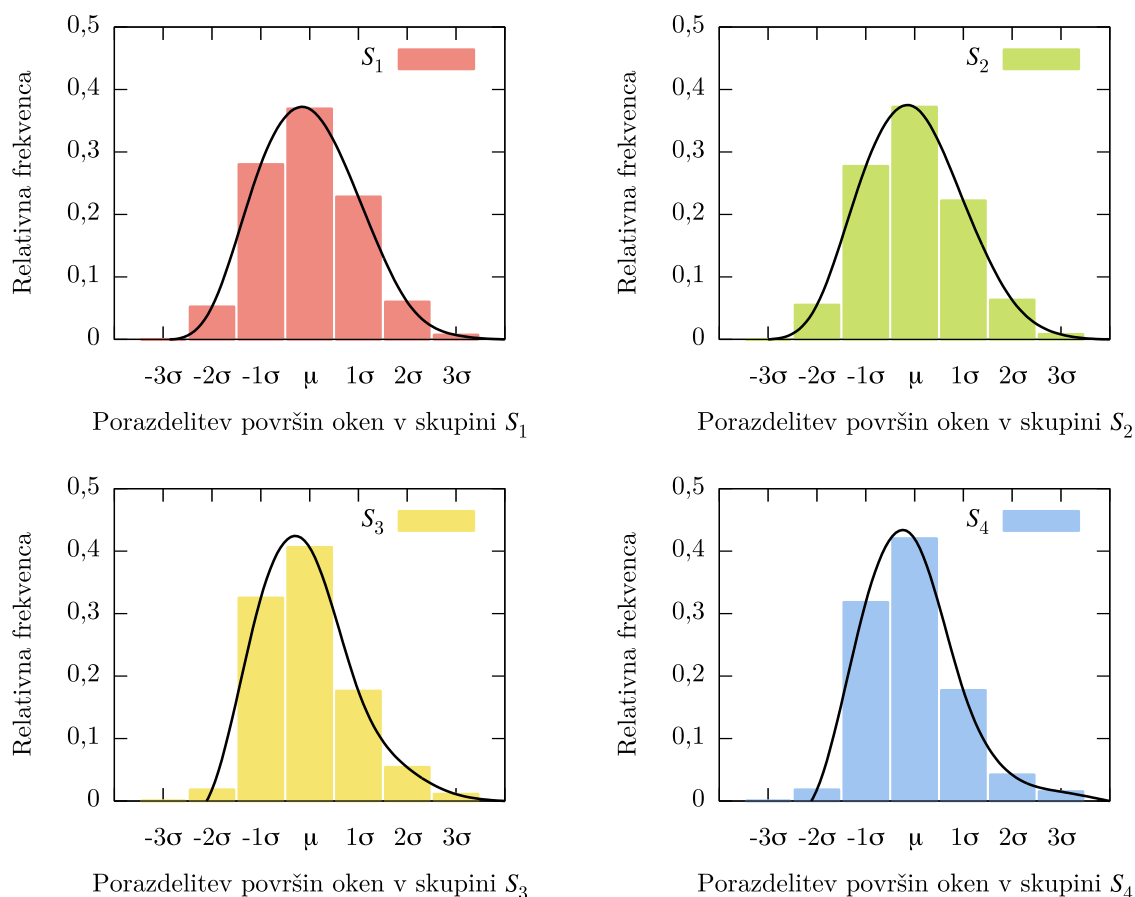
### 3.3.3 Površina in oblika oken celic

Veliko lastnosti odprto-celičnih gradiv je odvisnih od velikosti oken med celicami (pretok tekočine). Pri analizi je bilo prepoznanih 13902 oken v skupini  $S_1$ , 22805 oken v skupini  $S_2$ , 2836 oken v skupini  $S_3$  in 2472 oken v skupini  $S_4$ . Osnovne statistične vrednosti njihovih površin so podane v preglednici 3.3, porazdelitev površin je prikazana na sliki 3.11, obliko oken pa povzema preglednica 3.5. Površina oken je bila izračunana kot vsota površin trikotnikov z vrhom v središču okna, saj okna le redko (razen trikotnih oken) ležijo v eni ravnini.

Primerjava porazdelitev med skupinami vzorcev pokaže veliko podobnost med obliko in vrednostmi porazdelitve med vzorci z enako velikimi celicami ( $S_1$  proti  $S_2$  in  $S_3$  proti  $S_4$ ) in razliko v obliki in vrednostih porazdelitve med vzorci z različno velikimi celicami ( $S_1$  in  $S_2$  proti  $S_3$  in  $S_4$ ). Porazdelitev velikosti oken pri vzorcih iz skupin  $S_1$  in  $S_2$  je uravnotežena, kar kaže na primerljivo število oken, ki so večja in manjša od povprečja, medtem ko je pri drugih dveh skupinah porazdelitev desno asimetrična. Višje relativne frekvence pri manjših oknih so delno posledica večjega števila oken, ki nastanejo ob odebeljenih stičiščih robov celic zaradi povišanega barvnega praga. Tudi relativna frekvenca srednjega intervala je pri skupinah  $S_3$  in  $S_4$  višja, in sicer za okrog 10 %.

Preglednica 3.5 prikazuje primerjavo oblik oken med analiziranimi vzorci in podatki iz literature [54]. Razvidno je, da imajo analizirane pene dosti bolj raznoliko obliko oken kot teoretični modeli osnovani na hipotezi najmanjše površine (Kelvin, Weire-Phelan). Opažna je tudi podobnost med rezultati analiz tekočih pen (Matzke, Kose), ki pa že odstopajo od idealiziranih teoretičnih modelov. Zadnjih pet rezultatov izhaja iz analize trdnih pen in vsi močno odstopajo od prejšnjih rezultatov. Medtem ko predstavljena raziskava analizira aluminijeve pene, so Montminy et al. [54] proučevali odprto-celične polimerne pene.





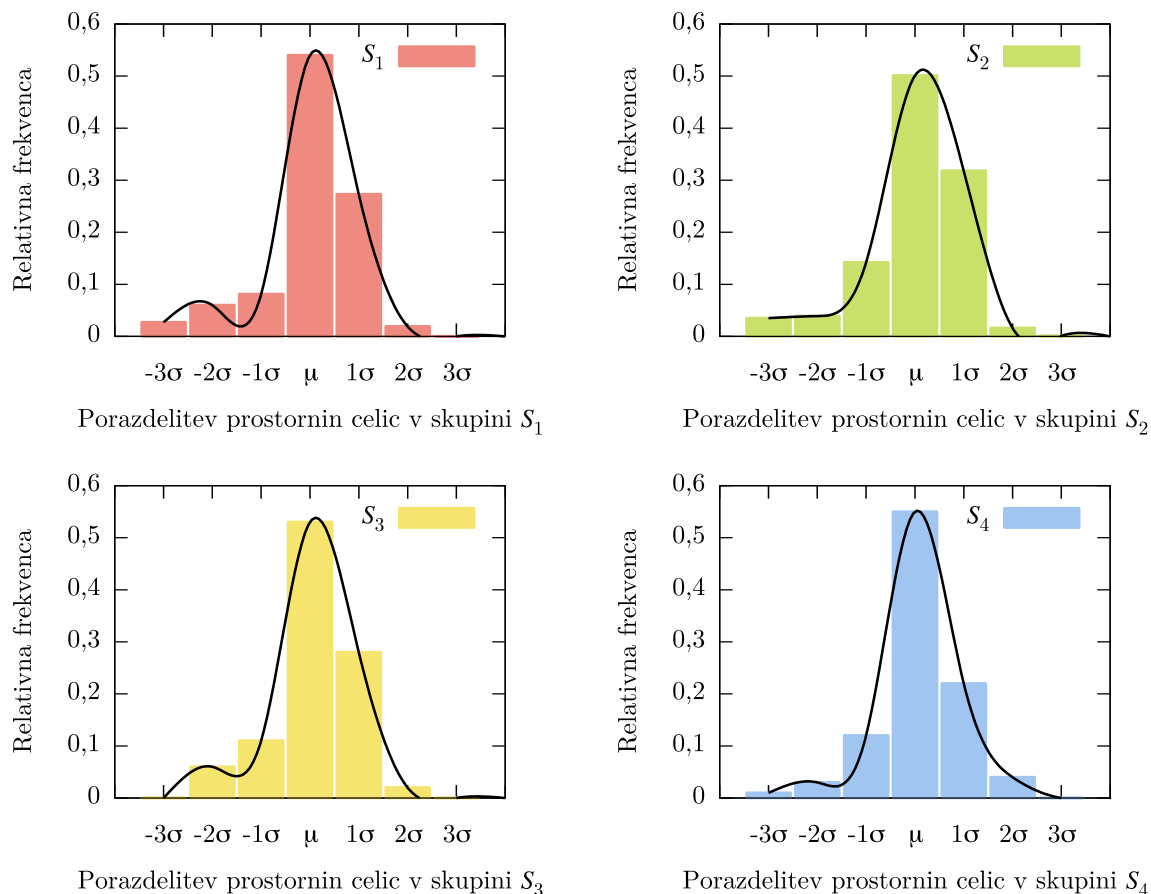
**Slika 3.11:** Primerjava relativne frekvenca verjetnostne porazdelitve površin oken celic za vse štiri skupine opazovanih vzorcev  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  in  $S_4$ ;  $\mu$  predstavlja povprečno vrednost dolžine in  $\sigma$  standarden odklon

Kljub večkratni razliki v velikosti celic so porazdelitve oblike oken zelo podobne, kar kaže skupne značilnosti trdnih pen in predvsem odstopanje od idealne teoretične oblike.

### 3.3.4 Prostornina in oblika celic

Volumen celic je bil izračunan kot vsota volumnov piramid, ki jih tvorijo piramide z oknom kot osnovno ploskvijo in centrom celice kot vrhom piramide. Prepoznanih in izmerjenih je bilo 732 celic v skupini  $S_1$ , 867 celic v skupini  $S_2$ , 215 celic v skupini  $S_3$  in 231 celic v skupini  $S_4$ . Osnovne statistične vrednosti velikosti celic so podane v preglednici 3.3, porazdelitev njihovih velikosti pa prikazuje slika 3.12. Primerjava porazdelitev med skupinami vzorcev pokaže veliko podobnost med obliko in vrednostmi porazdelitve med vzorci, izstopa le skupina  $S_2$ . Pri tej skupini je najnižja tudi relativna frekvenca srednjega intervala, ki se od najvišje pri skupini  $S_4$  razlikuje za 9,11 %.

Če bi imele celice obliko idealne krogle, bi povprečen premer celice v skupini  $S_1$  znašal 5,98 mm, v skupini  $S_2$  5,38 mm, v skupini  $S_3$  3,75 mm in v skupini  $S_4$  3,22 mm. V



**Slika 3.12:** Primerjava relativne frekvence verjetnostne porazdelitve prostornin celic za vse štiri skupine opazovanih vzorcev  $S_1, S_2, S_3$  in  $S_4$ ;  $\mu$  predstavlja povprečno vrednost dolžine in  $\sigma$  standarden odklon

**Preglednica 3.5:** Primerjava oblik oken s podatki iz literature [54]

Vzorec	Število analiziranih celic	Porazdelitev števila robov v oknu [%]				
		3	4	5	6	7 in več
Kelvin	-	0	43	0	57	0
Weire-Phelan	-	0	0	89	11	0
Matzke	600	0	11	67	22	1
Kose	8	0	9	70	21	0
Montminy	106	1	24	55	19	1
$S_1$	732	5,16	24,81	52,45	16,07	1,51
$S_2$	867	6,60	28,38	52,31	11,83	0,88
$S_3$	215	6,02	27,10	53,29	12,23	1,36
$S_4$	231	5,51	26,81	51,73	15,40	0,55

primerjavi s povprečno višino vzorcev ti premeri predstavljajo 15,00 % višine pri skupini  $S_1$ , 13,46 % višine pri skupini  $S_2$ , 18,28 % višine pri skupini  $S_3$  in 15,97 % višine pri skupini  $S_4$ . Porazdelitev volumnov celic in razmerja med najmanjšo in največjo prepoznano celico kažejo, da gre za peno z močno različnimi velikostmi celic, katere lastnosti bi težko opisali s poenostavljenimi modeli reprezentativne enotske celice. Nadaljnje raziskave in modeliranje odprto-celičnih kovinskih pen morajo tako temeljiti na manj urejenih, bolj realnih strukturah, da bi izboljšali razumevanje odvisnosti makroskopskih lastnosti pen od njihove strukture.

### 3.4 Zaključek

Rezultati opravljenih analiz strukture realnih odprto-celičnih pen kažejo, da je avtomatizirana 3D analiza geometrijskih značilnosti takšnih pen mogoča in daje dobre ter zanimive rezultate. Predvsem zanimivo za uporabo takšnih modelov je področje modeliranja in računalniške analize tlačnih obremenitev in toka tekočine skozi peno. Za proizvajalce pen je izrednega pomena možnost izboljšanja kvalitete proizvodnje z avtomatizirano kontrolo strukture pen in možnost razvoja novih izdelkov.

Enega najpomembnejših korakov v analizi strukture realnih pen predstavlja segmentacija zajetih 2D slik. Z njo se namreč določi, kje se nahaja meja med osnovnim materialom celičnega gradiva in prazninami. Vpliv spremembe barvnega praga na rezultate analiz geometrije in topologije pene kažejo rezultati analiz vzorcev pen z manjšimi celicami ( $S_3$  in  $S_4$ ). Pri njih je bilo potrebno, zaradi uporabljene ločljivosti zajema 2D prerezov, nekoliko dvigniti barvni prag. Ta dvig je prinesel odebelitev stičišč robov celic in posledično delna odstopanja v njihovem položaju po tanjšanju volumna. Zaradi tega so bili standardni odkloni opazovanih geometrijskih in topoloških lastnosti večji kot pri skupinah vzorcev z večjimi celicami. Tako je primerjava vzorcev z računalniškimi modeli pokazala, da imajo vzorci z manjšimi celicami bolj neurejeno strukturo kot vzorci z večjimi celicami.

V analiziranih vzorcih je bilo zaznanih in izmerjenih le okrog 50 % vseh celic (približno oceno vseh celic je mogoče izračunati iz volumna analiziranega vzorca in povprečnega volumna ene celice vzorca), saj je izgradnja rešetkastega modela zelo občutljiva na napake v segmentaciji in pripravi topološkega modela zaradi specifične topologije robov, oken in celic pene. Razlog za visoko občutljivost najbolje ponazarja primer idealizirane pene, ki jo sestavljajo tri Kelvinove celice tako, da se medsebojno dotikajo in imajo en skupen rob. Število robov ene Kelvinove celice znaša 36, treh dotikajočih se celic s skupnim robom pa 93 robov (celice se stikajo v dveh šestkotnikih in enem štirikotniku:  $3 \times 36 - 2 \times 6 - 1 \times 4 + 1 = 93$ ). Če pride do napake pri zaznavi robov v takšni peni in iz analize izpade samo en rob, to predstavlja le dober 1 % vseh robov strukture. Po drugi strani pa zaradi tega dobrega 1 % manjkajočih robov ni mogoče zaznati ene, dveh ali celo treh celic pene (če manjka

rob, ki si ga delijo vse tri celice). Relativno gledano to v najboljšem primeru pomeni izgubo 33 %, v najslabšem primeru pa izgubo kar 100 % vseh celic pene.

Kljub temu je bilo v opravljeni analizi strukture aluminijevih odprto-celičnih pen zaznanih in analiziranih dovolj geometrijskih elementov, da so rezultati porazdelitev geometrijskih in topoloških veličin dali pomemben vpogled v strukturo kovinskih pen. Izkazalo se je, da geometrijske lastnosti trdnih pen niso podobne teoretičnim, ampak imajo bogato in raznoliko porazdelitev osnovnih gradnikov. Porazdelitve volumnov celic in razmerij med najmanjšo in največjo prepoznano celico kažejo, da imajo analizirane pene močno različno velikost celic, saj niso ravnotežne strukture in se močno razlikujejo od urejenih struktur s tetrakaidekaedrično oziroma kubično osnovno celico, ki so služile kot osnova številnim raziskavam. Nadaljnje raziskave in modeliranje odprto-celičnih kovinskih pen morajo tako temeljiti na manj urejenih, bolj realnih strukturah, da bi izboljšali razumevanje odvisnosti makroskopskih lastnosti pen od njihove strukture, saj poenostavljeni modeli z reprezentativno enotsko celico težko opišejo njihove lastnosti.

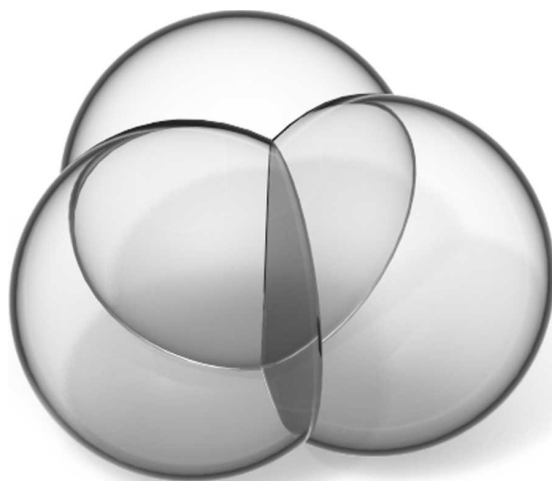
## 4 MODELIRANJE NEUREJENIH CELIČNIH STRUKTUR

Kovinske pene se proizvajajo na več načinov, vsem pa je skupna prisotnost plinaste faze v obliki mehurčkov, ki določa morfologijo celic. Ker se mehurčki plinaste faze med seboj združujejo po principu minimalne površinske energije, ta princip določa obliko celic kovinske pene. Mehurčki v idealnih pogojih (čas, temperatura) dosežejo ravnotežno strukturo, ki deli prostor na ločene dele prostora tako, da je skupna površinska energija teh delov najmanjša.

S problemom delitve prostora na celice enakih prostornin, ki imajo najmanjšo površino glede na prostornino, se je ukvarjal že Sir William Thompson (Lord Kelvin) [64]. Kot rešitev je predlagal strukturo (peno), ki je zgrajena le iz celic ene oblike (Kelvinove celice), katerih centri se nahajajo na položajih telesno centrirane kubične celice. Njegova rešitev je veljala za najboljšo vse do leta 1993, ko sta Weaire in Phelan [65] predlagala boljšo rešitev. Uporabila sta dve geometrijsko različni celici (Weaire-Phelanove celice) z enako prostornino, ki popolnoma zapolnita prostor in pri tem tvorita strukturo z manjšo površino glede na prostornino kot Kelvinove celice.

Ravnotežne strukture sledijo pravilom, ki jih je prvi opisal Plateau leta 1873 [49] in kasneje dokazal Taylor [66]. Plateau je opazil, da se v takšnih strukturah pojavljajo singularnosti dveh oblik: robovi in njihova stičišča. Meje med posameznimi celicami v peni (okna) so gladke površine s konstantno ukrivljenostjo, razen na mestih medsebojnih stikov. Po tri okna se hkrati stikajo v robovih celic pod medsebojno enakimi koti  $120^\circ$ , ki imajo obliko gladkih krožnih lokov. Ti krožni loki se nadalje medsebojno dotikajo v stičiščnih točkah (po štirje hkrati) v tetraedrični konfiguraciji (koti med vsemi pari stikajočih se krožnih lokov so enaki in znašajo  $109,5^\circ$ ). Singularnosti obeh vrst se pojavita že pri skupini treh stikajočih se mehurčkov (slika 4.1).

Plateaujeva pravila so sestavljena iz geometrijskega dela, ki obravnava ukrivljenost in enakost kotov, ter iz kombinatoričnega dela, ki zajema topologijo celic. Topološki del pravi, da si en rob delijo natanko tri celice, medtem ko si eno oglišče delijo natanko štiri celice. Nastanek pen lahko glede na ta pravila razdelimo na dve fazi. Prva faza je faza hkratne rasti in spajanja posameznih celic pene, kar poteka po kombinatoričnih pravilih, nato počasi pena prehaja v ravnotežnejšo strukturo (relaksacije pene), kar poteka po geometrijskih pravilih.



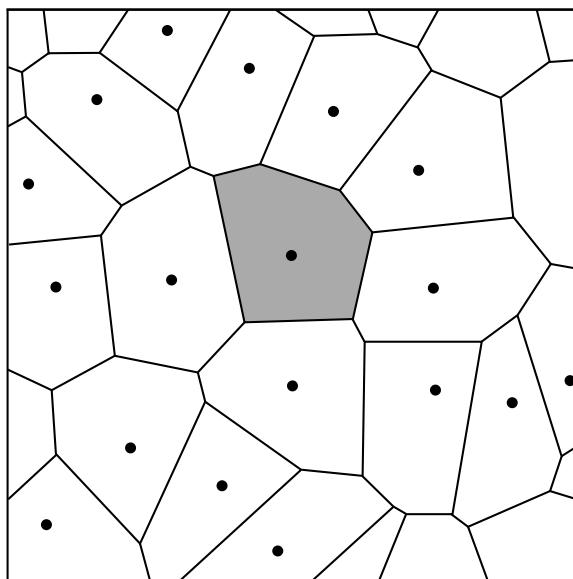
**Slika 4.1:** Trije stikajoči se mehurčki vsebujejo obe vrsti singularnosti; tri mejne površine se stikajo v robu, štirje robovi se stikajo v stičiščni točki v tetraedrični konfiguraciji

#### 4.1 Voronojeva delitev prostora in odprto-celične strukture

Kombinatorični del pravil je enak kot pri Voronojevi delitvi prostora (Voronovej diagram). Za dane začetne točke v prostoru Voronojeva delitev razdeli prostor na Voronojeve regije tako, da vsaka nastala regija vsebuje natanko eno začetno točko. Znotraj ene tako nastale Voronojeve regije se nahajajo vse tiste točke prostora, ki so bližje začetni točki izbrane Voronojeve regije kot katerikoli drugi začetni točki. Voronojevo delitev ravnine prikazuje slika 4.2. Geometrijsko nasprotje Voronojeve delitve je Delaunayeva triangulacija. To je triangulacija na osnovi izbranih začetnih točk, pri kateri je najmanjši notranji kot triangulacije največji možen za dano razporeditev začetnih točk. Določena pa je tako, da se v Voronojevi delitvi povežejo tiste začetne točke, ki imajo skupno mejo (dvojni graf).

V ravnini je meja med sosednjima Voronojevima regijama linija, ki seka premico skozi začetni točki Voronojevih regij pod pravim kotom na enaki razdalji med njima. Tri mejne linije se končajo v stičiščih, katera so enako oddaljena od treh začetnih točk. V prostoru dobi meja obliko poligona na ravnini, ki leži na sredini daljice med začetnima točkama. Trije mejni poligoni se hkrati dotikajo vzdolž svojih robov, ki so tako enako oddaljeni od treh začetnih točk, robovi pa se končajo v stičiščnih točkah, ki so enako oddaljene od štirih začetnih točk.

Ta podobnost med kombinatoričnimi pravili zgradbe pen in med pravili, ki veljajo za Voronojeve regije, je razlog, da se tekoče in trdne pene modelira s pomočjo delitve prostora na Voronojeve regije. Pri tem je pri tekočih penah potrebno upoštevati tudi relaksacijo pene (geometrijska pravila), med proizvodnjo trdnih pen pa pride do prehoda tekoče faze osnovnega materiala v trdno pred končno relaksacijo pene, tako da teh pravil pri trdnih penah ni potrebno upoštevati. Nadalje pride pri proizvodnji trdne pene do pojavov pre-



**Slika 4.2:** Voronojeva delitev kvadratnega odseka ravnine na podlagi izbranih začetnih točk; potemnjena je ena Voronojeva regija

nosa in prehoda toplote ter faznih sprememb, ki močno vplivajo na končno strukturo trdne pene. Takšne pene zaradi naštetih vzrokov odstopajo od ravnotežne (urejene) strukture tekoče pene, torej je njihova struktura neravnotežna (neurejena). Odstopanje od ravnotežne strukture je lahko večje ali manjše in je odvisno predvsem od uporabljenih proizvodnih parametrov pred in med fazo strjevanja pene.

Delitev prostora na Voronojeve regije se uporablja v številnih področjih za reševanje najrazličnejših problemov. Na področju navigacije se tako rešujejo problemi najbližjih točk (najbližja bolnica, letališče), na področju logistike se rešujejo problemi iskanja točk, ki so najdlje oddaljene od drugih točk (nova trgovina se gradi čim dlje od že obstoječih trgovin). Uporablja se v računalništvu za določanje kapacitete brezžičnih omrežij, v meteorologiji za določevanje količine padavin na podlagi le nekaj zajetih podatkov ter na področju robotike pri iskanju najvarnejše poti okoli ovir.

Zaradi tako razširjenega področja uporabe so bili razviti številni algoritmi za Voronojevo delitev prostora, kot so naivna metoda (*angl.: naive approach*), inkrementalna metoda (*angl.: incremental method*), algoritem deli in vlada (*angl.: divide & conquer*) ter algoritem s prebirno premico (*angl.: Fortune's algorithm*) [67]. Zaradi neposredne povezave med Voronojevo delitvijo in konveksnimi lupinami (projekcija konveksne lupine prostora  $R_n$  na prostor  $R_{n-1}$  razdeli ta prostor na Voronojeve regije) se uporabljajo tudi metode za konstrukcijo konveksnih lupin. Med njih spadajo naivna metoda (*angl.: naive approach*), Grahamovo preiskovanje (*angl.: Graham search*), Jarvishev obhod (*angl.: Jarvis march*), inkrementalna metoda (*angl.: incremental method*), metoda s preiskovalno premico (*angl.: sweep-line method*), hitra konveksna lupina (*angl.: quick hull*) in aproksimativna rešitev (*angl.: approximate algorithm*) [68].

#### 4.1.1 Modeliranje z neurejeno razporeditvijo začetnih točk

Osnovo za model neurejene odprto-celične strukture tako predstavlja Voronojeva delitev prostora, pri čemer je končna struktura odvisna le od izbranih položajev začetnih točk. Položaji začetnih točk Voronojeve delitve so lahko izbrani povsem naključno, lahko pa sledijo določenim pravilom. Pri popolnoma naključno izbranih začetnih točkah je tudi končna struktura Voronojeve delitve povsem naključna. V takšni strukturi se nahajajo celice vseh velikosti, od najmanjših do največjih, njihovi položaji v prostoru pa so povsem neurejeni. Porazdelitev velikosti celic v takšni strukturi sledi  $\Gamma$ -porazdelitvi, kjer je verjetnost obstoja celice velikosti  $a$  enaka:

$$f(a) = \frac{\tau^\tau}{\mu \Gamma(\tau)} \left(\frac{a}{\mu}\right)^{\tau-1} \exp\left(-\tau \frac{a}{\mu}\right), \quad (4.1)$$

kjer je  $\mu$  povprečna velikost celic,  $\Gamma$  je gama funkcija (funkcija fakulteta definirana nad realnimi in kompleksnimi števili) in  $\tau = 3,61$  [69]. Če je takšnemu načinu modeliranja dodan še robni pogoj o najmanjši dovoljeni medsebojni razdalji med začetnimi točkami Voronojeve delitve, postanejo velikosti celic v takšnem modelu medsebojno zelo podobne in sledijo  $\delta$ -porazdelitvi [70]:

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & x \neq 0 \\ \infty & x = 0 \end{cases} \text{ in velja } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (4.2)$$

Model celične strukture z  $\Gamma$ -porazdelitvijo ( $\Gamma$ -model) je izključno uporabljalo manj avtorjev, uporabljen je bil predvsem za primerjavo z bolj uporabljenimi modeli z  $\delta$ -porazdelitvijo ( $\delta$ -modeli). Kot primerjalni model so  $\Gamma$ -model za proučevanje vpliva neurejenosti na mejo tečenja v dvo-razsežnih penah uporabili Chen et al. [70], Lu in Chen [71] pa sta ga uporabila za proučevanje prenosa toplote in zadrževanja ognja v aluminijevih zlitinah.

Pogosteje se uporabljajo  $\delta$ -modeli. Silva et al. [72] so ga uporabili za proučevanje vpliva neurejenosti na elastične lastnosti celičnih gradiv in kasneje Silva in Gibson [73] za proučevanje vpliva neurejenosti ter napak v celični strukturi na njene trdnostne lastnosti. Kraynik et al. [74] so s pomočjo  $\delta$ -modela proučevali strukturne lastnosti tro-razsežnih relaksiranih pen, Huang in Gibson [75] pa sta ga uporabila za proučevanje vpliva napak na lezenje kovinskih pen pri povišanih temperaturah.



### 4.1.2 Modeliranje z urejeno razporeditvijo začetnih točk

Drug način izbire položajev začetnih točk temelji na fizikalnem ozadju nastanka odprto-celične strukture. Upošteva se dejstvo, da se pred in med fazno spremembo osnovnega materiala odprto-celične strukture izvrši delna relaksacija. Tako so položaji začetnih točk Voronojeve delitve blizu položajev začetnih točk popolnoma ravnotežne strukture. V literaturi avtorji kot osnovo za ravnotežen model uporabljajo Kelvinovo strukturo. Roberts in Gabroczi [76, 77] sta s takšnim načinom modeliranja proučevala elastične mehanske lastnosti tri-razsežnih zaprto-celičnih in odprto-celičnih pen, Gan et al. [78] so proučevali vpliv večosnih obremenitev na elastične mehanske lastnosti tri-razsežnih odprto-celičnih pen, medtem ko so Li et al. [5] proučevali vpliv oblike celic in oblike prereza robov odprto-celične pene na njene elastične lastnosti.

Neurejenih struktur osnovanih na Weaire-Phelanovih celicah v literaturi ni zaslediti kljub dejstvu, da predstavljajo strukturo, ki ima ugodnejše razmerje med površino in prostornino kot Kelvinova struktura. Zaradi tega bo v nadaljevanju opisano modeliranje neurejene odprto-celične strukture, temelječe na fizikalnem ozadju proizvodnje trdne pene, katere osnovo bosta predstavljala oba ravnotežna modela tekoče pene. Ravnotežni model tekoče pene, zgrajen iz Kelvinovih celic, bo obravnavan zaradi njegove razširjenosti v literaturi, medtem ko bo ravnotežni model tekoče pene, zgrajen iz Weaire-Phelanovih celic, obravnavan zaradi njegovega ugodnejšega razmerja med površino in prostornino celic.

## 4.2 Ravnotežen model tekoče pene

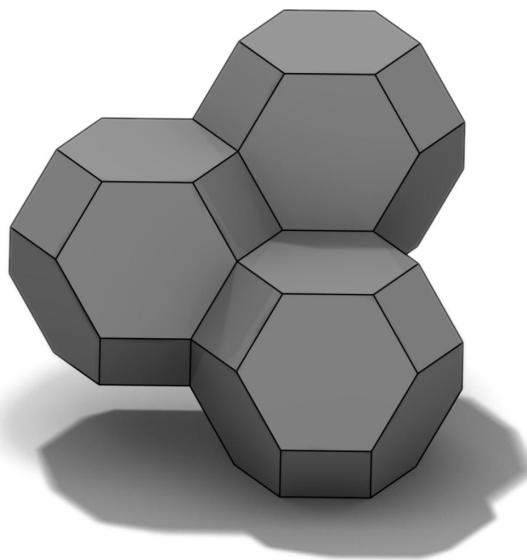
Delitev prostora je delitev tri-dimenzionalnega prostora na ločene celice. Teoretično ravnotežna delitev prostora je periodična glede na izbrano osnovno enoto. Takšna enota je sestavljena iz ene ali več osnovnih celic in nima zunanjih mej. Za vrednotenje posamezne delitve prostora so pomembne predvsem površine, ki tvorijo meje med posameznimi osnovnimi celicami. Vrednotenje delitve prostora temelji na razmerju med prostornino  $V$  in mejno površino  $A$  enote delitve prostora enake prostornine, ki se zapiše v obliki brez-dimenzijske namenske funkcije:

$$f(A, V) = \frac{A^3}{V^2}. \quad (4.3)$$

Pri tem naj bo prostornina  $V$  vseh celic enaka, površina  $A$  pa naj predstavlja povprečno mejno površino vseh obravnavanih celic (tako je povprečna mejna površina  $A$  v bistvu le polovica površine osnovne celice, saj si vsako mejo delita dve celici).

### 4.2.1 Kelvinove celice

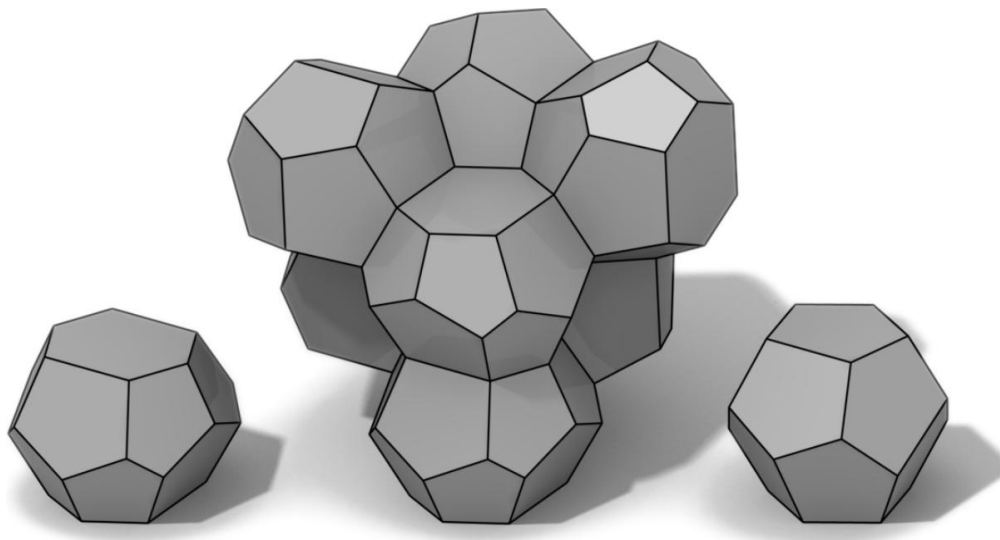
Voronoeva delitev prostora s postavitvijo začetnih točk na mesta telesno centrirane kubične celice (BBC) razdeli prostor na Kelvinove celice (slika 4.3). Vse celice takšne delitve so med seboj enake in imajo obliko prirezanega oktaedra (dvostrana piramida). Voronoeva celica, ki nastane okoli središčne točke telesno centrirane kubične celice, se stika s štirinajstimi sosedi: s šestimi drugimi najbližjimi sosednjimi središčnimi točkami tvori mejno ploskev v obliki kvadrata, z osmimi sosedi po telesni diagonali tvori mejno ploskev v obliki pravlinega šestkotnika (Kelvin je to celico poimenoval tetrakaidekaeder; tetrakaideka pomeni 14). Vrednost namenske funkcije (enačba 4.3) za ne-relaksirano Kelvinovo peno znaša  $f(A, V) = 18,7653$ , za relaksirano peno pa je ta vrednost še nekoliko nižja in znaša  $f(A, V) = 18,6758$  [79].



**Slika 4.3:** Kelvinove celice oziroma tetrakaidekaedri so štirinajststrana telesa, sestavljena iz šestih kvadratov in osmih šestkotnikov

### 4.2.2 Weaire-Phelanove celice

Nekatere kovine, kot je na primer zlitina kroma in silicija, kristalizirajo v kristalne strukture, imenovane A15 [80]. Takšne strukture vsebujejo položaje telesno centrirane kubične celice in dodatno še polovico njenih Voronojevih oglišč. Weaire-Phelanova pena kot osnovo za Voronojevo delitev uporablja začetne točke na položajih kristalne strukture A15. Na mestih telesno centrirane kubične celice nastanejo nepravilni petkotni dodekaedri (dodeka pomeni 12), na ostalih mestih pa štirinajststrana telesa, ki so sestavljena iz dveh vzporednih nepravilnih šestkotnikov in desetih nepravilnih petkotnikov (slika 4.4). Vrednost namenske funkcije (enačba 4.3) za ne-relaksirano Weaire-Phelanove peno znaša  $f(A, V) = 18,5775$ , za relaksirano peno pa znaša  $f(A, V) = 18,4871$  [79]. Razvidno je,



**Slika 4.4:** Periodična osnovna enota Weaire-Phelanove pene je sestavljena iz šestih nepravilnih tetrakaidekaedrov (levo) in dveh nepravilnih dodekaedrov (desno)

da je Weaire-Phelanova struktura tista, ki ima manjšo površino glede na prostornino v primerjavi s Kelvinovo strukturo in tvori ravnotežnejšo peno.

### 4.3 Model neurejene odprto-celične strukture

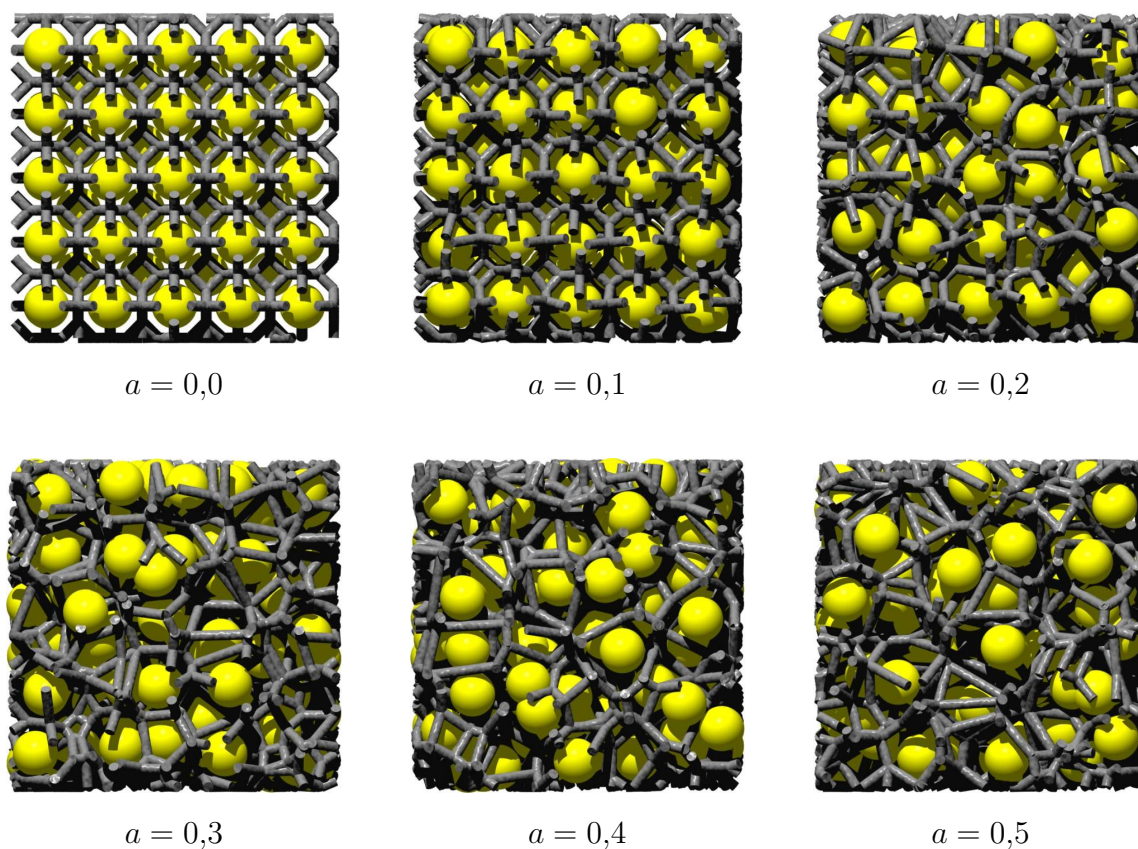
Osnovo za neurejen model pene predstavljajo opisani ravnotežni modeli oziroma položaji začetnih točk njihovih Voronojevih delitev. Vsaka tako dobljena Voronojeva regija predstavlja eno celico modelirane pene, katere položaj določajo koordinate njene začetne točke. Za pripravo neurejenih modelov sta bila uporabljena ravnotežna modela na osnovi Kelvinovih celic (Kelvinov model) in na osnovi Weaire-Phelanovih celic (Weaire-Phelanov model). Neurejena pena se razlikuje od urejene po tem, da so njene celice bolj ali manj nepravilno razporejene po prostoru. Ta nepravilnost je v neurejen model vpeljana s kontroliranimi premiki začetnih točk Voronojeve delitve urejenega modela. Koordinate premaknjenih začetnih točk so določene po enačbi:

$$x_k = x_k^i + a \cdot d_c \cdot \phi_k, \quad (4.4)$$

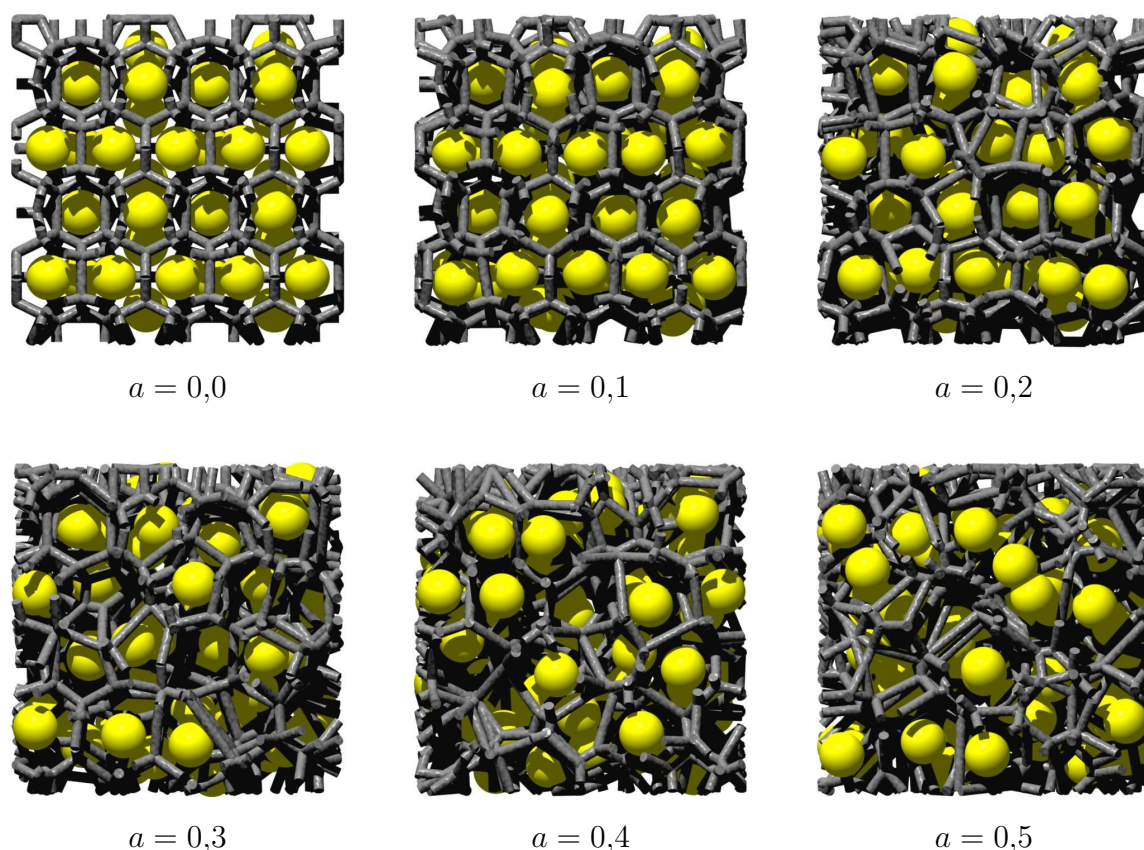
kjer so  $x_k^i$  ( $k \in [1, 2, 3]$ ) prostorske koordinate začetne točke v urejenem modelu in  $d_c$  predstavlja reprezentativno velikost celice. Ta velikost je odvisna od izbranega urejenega modela, predstavlja pa najbližjo koordinatno razdaljo med začetnima točkama urejenega modela.  $\phi_k$  ( $\in [-1, 1]$ ) je naključna spremenljivka z enakomerno porazdelitvijo,  $a$  ( $\in [0, 1]$ ) pa predstavlja amplitudo, ki določa stopnjo neurejenosti mreže (parameter neurejenosti).

Reprezentativna velikost celice  $d_c$  in stopnja neurejenosti  $a$  se določita pred izračunom položajev začetnih točk, medtem ko se vrednost naključne spremenljivke  $\phi_k$  določi med izračunom položajev začetnih točk za vsako koordinatno os posebej. Reprezentativna velikost celice in stopnja neurejenosti določata mejni prostor, znotraj katerega ležijo začetne točke neurejenega modela. Mejni prostor ima obliko kocke, katere središče leži na položaju začetne točke urejenega modela, z naključno spremenljivko  $\phi_k$  pa je določen končen položaj začetne točke znotraj mejnega prostora.

Z večanjem parametra neurejenosti  $a$  od 0 do 1 prehaja Voronojeva struktura postopno iz urejene v neurejeno strukturo (slika 4.5 in 4.6). Ker se lahko parameter spreminja s poljubnim korakom, je na tak način mogoče dobiti strukture vseh stopenj neurejenosti, kar omogoča izvajanje analiz vpliva neurejenosti na izbrane lastnosti strukture. Pri skrajni vrednosti parametra neurejenosti  $a = 1$  ima mejni prostor začetnih točk velikost dveh reprezentativnih velikosti celice  $d_c$  in prihaja do polovičnega prekrivanja mejnih prostorov sosednjih začetnih točk. Pri takšnem prekrivanju mejnih prostorov v strukturi ni več sledu o začetni urejenosti, kljub temu pa se ne more zgoditi, da bi bilo večje število začetnih točk zbrano na enem samem mestu v prostoru ali da bi nastale večje vrzeli v strukturi.



**Slika 4.5:** Kelvinovi modeli velikosti  $5 \times 5 \times 5$  celic pri postopnem prehodu iz urejenega modela v neurejen model, kjer rumene krogle predstavljajo položaje začetnih točk Voronojeve delitve prostora



**Slika 4.6:** Weaire-Phelanovi modeli velikosti  $5 \times 5 \times 5$  celic pri postopnem prehodu iz urejenega modela v neurejen model, kjer rumene krogle predstavljajo položaje začetnih točk Voronojeve delitve prostora

Zaradi prekrivanja mejnih prostorov začetnih točk pri stopnjah neurejenosti višjih od  $a = 0,5$ , postaja Voronojeva struktura vedno bolj naključna, zato se tudi porazdelitev geometrijskih lastnosti celic takšne strukture vedno bolj bliža  $\Gamma$ -porazdelitvi, opisani z enačbo 4.1. Zaradi enakega postopka priprave Kelvinovih in Weaire-Phelanovih modelov postajajo oboji pri višjih stopnjah neurejenosti vedno bolj naključni in tako podobni drug drugemu.

Na slikah 4.5 in 4.6 so prikazani Kelvinovi in Weaire-Phelanovi modeli velikosti  $5 \times 5 \times 5$  celic v odvisnosti od stopnje neurejenosti za  $a \leq 0,5$ . Na sliki so robovi Voronojevih regij, ki predstavljajo robove celic odprto-celičnega gradiva, prikazani kot sivi valji, središčne točke Voronojevih regij pa so ponazorjene z rumenimi krogli. Krogle so bile uporabljene, da prekrijejo spodnje plasti celic in tako bolj nazorno prikažejo nastalo tri-dimenzionalno strukturo modela. Pri nižjih stopnjah neurejenosti je iz slik dobro razvidna razlika med strukturo Kelvinovih in Weaire-Phelanovih modelov, medtem ko pri višjih stopnjah primerjava slik kaže veliko podobnost med Kelvinovimi in Weaire-Phelanovimi modeli že pri stopnjah neurejenosti manjših od  $a = 0,5$ .

### 4.3.1 Priprava modela

Za pripravo samega modela je potrebno ob reprezentativni velikosti celice  $d_c$  ter parametru neurejenosti  $a$  za določitev položajev začetnih točk predpisati še obliko in velikost končnega modela neurejene odprto-celične strukture. Z velikostjo in obliko se namreč določi potrebno število celic po vseh koordinatnih oseh in s tem tudi potrebno število začetnih točk. Za vse opisane modele je bila uporabljena oblika enakostraničnega paralelepipeda (kocke) z dolžino roba  $L$ .

Postopek priprave neurejenega modela odprto-celičnega gradiva z Voronojevo delitvijo prostora je sledeč. Najprej se določen mejni paralelepiped zapolni z začetnimi točkami na položajih izbrane ravnotežne strukture. Da se zmanjša vpliv meje, sta na vseh zunanjih mejnih ploskvah paralelepipeda dodani še dve plasti začetnih točk. Na tako postavljenih začetnih točkah se po enačbi 4.4 izvršijo kontrolirani premiki začetnih točk, ki se uporabijo kot osnova za Voronojevo delitev prostora. Po delitvi prostora robovi dobljenih Voronojevih regij predstavljajo robove celic odprto-celičnega gradiva. Dobljena struktura je zaradi dveh dodatnih plasti začetnih točk večja od začetno izbranega modela, zato jo je potrebno še odrezati po mejah paralelepipeda. Pri tem se lahko zgodi, da postanejo robovi odrezanih Voronojevih regij ločeni od preostale strukture in jih je potrebno odstraniti iz končnega modela. To se zgodi pri Voronojevih regijah, ki se nahajajo na robovih in ogliščih mejnega paralelepipeda, saj so odrezani z dveh ali treh smeri hkrati. Nastala struktura predstavlja rešetkast model neurejenega odprto-celičnega materiala.

Za Voronojevo delitev pri pripravi neurejenih modelov odprto-celičnih gradiv je bil uporabljen programski paket Qhull [81], razvit na Univerzi Minnesota-Twin Cities. V osnovi je namenjen določevanju konstrukcij konveksnih lupin, Delaunayevih triangulacij in Voronojevih delitev v dvo-, tro-, štiri- in več-razsežnih prostorih (za srednje velike množice točk je praktična omejitev devet-dimenzijski prostor). Qhull uporablja algoritem hitrih konveksnih lupin za določitev konveksnih lupin, s pomočjo katerih nato izračuna Delaunayovo triangulacijo in Voronojevo delitev ter pri tem skrbi za napako pri zaokroževanju zaradi aritmetike s plavajočo vejico. Pri tem izračuna tudi prostornino in površino konveksnih lupin. Opisan programski paket je bil uporabljen zaradi njegove razširjenosti, hitrosti in verificiranosti (je del komercialnih paketov MATLAB in Mathematica).

## 4.4 Statistično vrednotenje modelov

Za pripravo reprezentativnega rešetkastega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva je potrebno njegove lastnosti čim bolj približati lastnostim realnega celičnega gradiva. Najpomembnejše so naslednje lastnosti realnega gradiva: lastnosti osnovnega materiala, velikost in oblika celičnega gradiva, povprečna velikost celic, relativna gostota in stopnja



neurejenosti. Prve štiri lastnosti celičnega gradiva je mogoče neposredno izmeriti na vzorcu gradiva, medtem ko to za stopnjo neurejenosti ni mogoče, saj je le-ta namreč umetno izbrana virtualna lastnost, ki pomaga pri pripravi modela neurejenega celičnega gradiva.

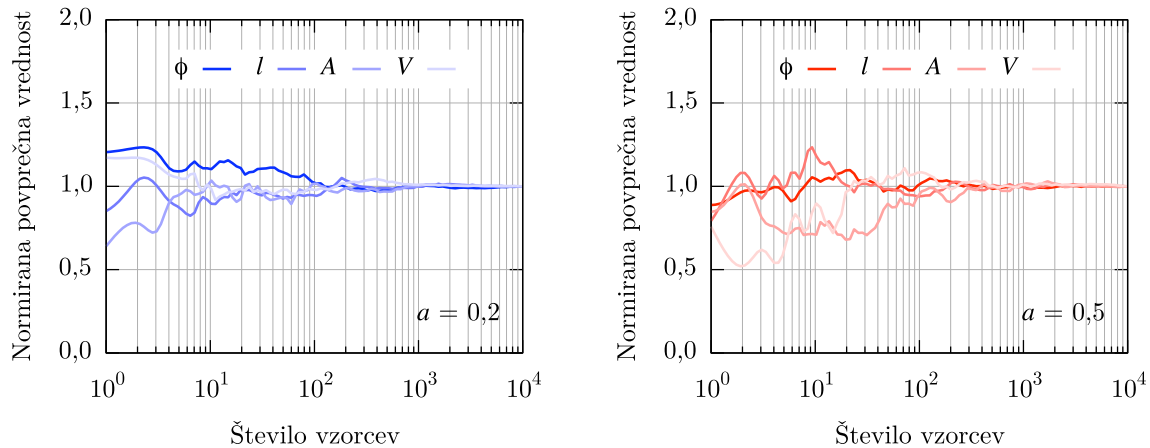
Ustrezna stopnja neurejenosti modela odprto-celičnega gradiva se določi s pomočjo primerjave z realnim vzorcem celičnega gradiva. Primerjajo se verjetnostne porazdelitve izbranih geometrijskih lastnosti vzorca s porazdelitvami vnaprej pripravljenih modelov z različnimi stopnjami neurejenosti. Za izvajanje numeričnih analiz se nato izbere model s tisto stopnjo neurejenosti, ki se najbolj ujema z realno peno. Metode merjenja in določevanja verjetnostne porazdelitve geometrijskih lastnosti vzorcev celičnih materialov opisuje poglavje 3, v nadaljevanju pa bo opisno določevanje verjetnostne porazdelitve geometrijskih lastnosti računalniških modelov celičnih gradiv z različnimi stopnjami neurejenosti.

Za določitev stopnje neurejenosti s pomočjo primerjave med vzorci celičnega gradiva in računalniškimi modeli so bile izbrane naslednje geometrijske lastnosti: dolžine robov celic  $l$ , notranji koti med robovi celic  $\phi$ , velikost površine oken celic  $A$  in velikost prostornin celic  $V$  ter dve topološki lastnosti: število robov v oknu  $N_{ro}$  in število oken v celici  $N_{ok}$  (poglavje 3). Pred statistično analizo je bilo določeno potrebno število vzorcev za reprezentativno populacijo, nato je bila izdelana statistična analiza izbranih lastnosti za Kelvinove in Weaire-Phelanove modele za stopnje neurejenosti od  $a = 0,01$  do  $a = 1,00$  s korakom  $0,01$ .

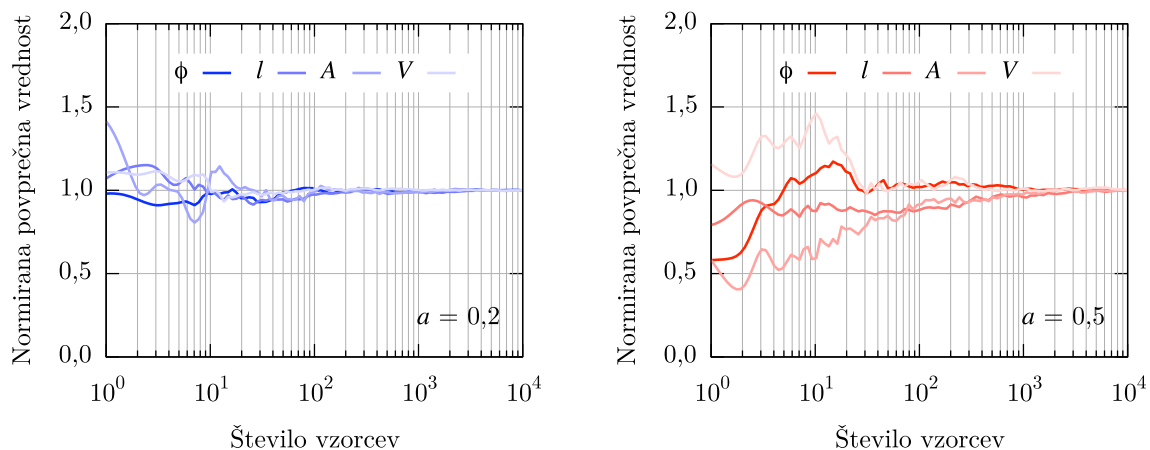
#### 4.4.1 Potrebno število vzorcev

Pred statistično analizo je bilo potrebno določiti število vzorcev  $N_{vz}$  tako, da izbrana skupina vzorcev predstavlja reprezentativno populacijo vzorcev za vsako izbrano geometrijsko lastnost. To število je bilo določeno na osnovi analize spreminjanja povprečnih vrednosti izbranih geometrijskih lastnosti pri treh različnih stopnjah neurejenosti  $a = 0,2$ ,  $a = 0,5$  in  $a = 1,0$  na populacijah z  $10^4$  vzorci za oba modela.

Odvisnost normiranih povprečnih vrednosti vseh štirih izbranih geometrijskih lastnosti od števila vzorcev za Kelvinov model v logaritemski skali prikazuje slika 4.7, za Weaire-Phelanov model pa slika 4.8. Povprečne vrednosti izbranih geometrijskih lastnosti so bile normirane z njihovo povprečno vrednostjo pri  $10^4$  vzorcih, da je omogočena neposredna primerjava med njimi, ki omogoča določitev potrebnega števila vzorcev v reprezentativni množici. Kot potrebno število vzorcev  $N_{vz}$  je bilo izbrano tisto število, od katerega naprej vse normirane povprečne vrednosti odstopajo od norme 1 za manj kot 1 %.



**Slika 4.7:** Vpliv števila upoštevanih vzorcev na njihovo normirano povprečno vrednost za Kelvinov model pri stopnji neurejenosti  $a = 0,2$  (levo) ter  $a = 0,5$  (desno)



**Slika 4.8:** Vpliv števila upoštevanih vzorcev na njihovo normirano povprečno vrednost za Weaire-Phelanov model pri stopnji neurejenosti  $a = 0,2$  (levo) ter  $a = 0,5$  (desno)

Potrebna števila vzorcev reprezentativne množice za oba modela in vse tri stopnje neurejenosti so podana v preglednici 4.1. Iz nje je razvidno, da z naraščajočo stopnjo neurejenosti narašča tudi potrebno število vzorcev in da glede na predhodno izbran kriterij za vse izbrane stopnje neurejenosti zadostuje 7500 vzorcev za reprezentativno populacijo. Vendar ta vrednost predstavlja samo oceno potrebnega števila vzorcev zaradi prisotnosti naključnosti, ki vodi v neponovljivost postopka priprave modelov. Zaradi tega je bilo končno izbrano število potrebnih vzorcev za statistično analizo izbranih lastnosti povečano na  $N_{vz} = 10^4$ .



**Preglednica 4.1:** Potrebno reprezentativno število vzorcev  $N_{vz}$ 

Model	Stopnja neurejenosti		
	$a = 0,2$	$a = 0,5$	$a = 1,0$
Kelvinov model	4674	5099	7016
Weaire-Phelanov model	2339	7339	7475

#### 4.4.2 Statistična analiza vzorcev

Za statistično analizo je bilo pripravljenih toliko modelov neurejenega odprto-celičnega gradiva velikosti  $5 \times 5 \times 5$  celic, da je bilo v vseh pripravljenih modelih skupaj doseženo potrebno število vzorcev za reprezentativno populacijo  $N_{vz}$ . V analizi so bile upoštevane samo tiste celice rešetkastega modela, ki se v celoti nahajajo znotraj mejnega paralelepipedu. Celice, ki se nahajajo na zunanjih robovih mejnega paralelepipedu in so zaradi tega odrezane, v analizi niso bile upoštevane. Pri višjih stopnjah neurejenosti se pojavijo tudi celice z robovi, ki so za več velikostnih razredov krajši od povprečne dolžine roba. Njihova dolžina je krajša tudi od premera celičnih robov realne odprto-celične strukture. Tako kratkih robov v realnem celičnem gradivu ni in so bili zaradi tega iz strukture odstranjeni s pomočjo metode glajenja rešetkastega modela, ki je opisana v poglavju 6.

Za vsako stopnjo neurejenosti je bilo tako zbranih  $10^4$  vzorcev za vsako opazovano lastnost rešetkastega modela odprto-celičnega gradiva. Izračunana je bila njihova povprečna vrednost  $\mu$  in standarden odklon  $\sigma$ . Na osnovi tega so bile velikosti opazovanih lastnosti diskretizirane v liho število intervalov širine enega standardnega odklona tako, da je predstavljala povprečna vrednost  $\mu$  sredino srednjega intervala. Za vsakega od intervalov je bilo nato določeno število vzorcev, katerih velikost opazovane lastnosti je bila med spodnjo in zgornjo mejo intervala.

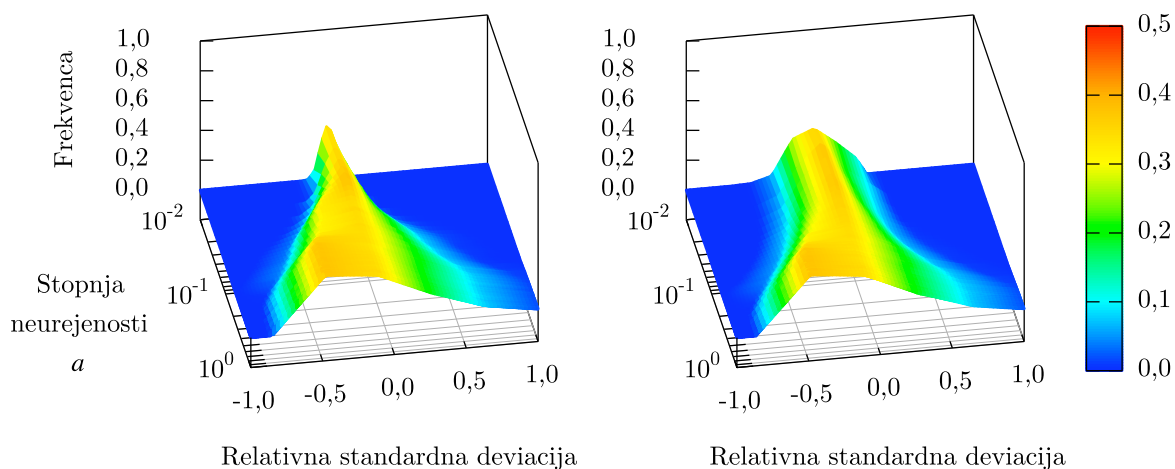
Tako nastala verjetnostna porazdelitev je bila zaradi primerjave med modeli različnih neurejenosti še normirana. In sicer je bilo normirano število vzorcev v intervalu glede na število vseh vzorcev v reprezentativni populaciji ter standarden odklon. Z naraščanjem stopnje neurejenosti se namreč povprečna vrednost in standarden odklon spreminjata. Zato je bil namesto standardnega odklona uporabljen relatiiven standarden odklon  $\sigma_r$ , ki predstavlja razmerje med standardnim odklonom in povprečjem  $\sigma_r = \sigma/\mu$ .

Rezultati opisane statistične analize so za vsako opazovano lastnost ter za vsak analiziran model posebej prikazani na površinskih diagramih. Vpliv stopnje neurejenosti na lastnosti rešetkastega modela je večji predvsem pod stopnjo neurejenosti  $a = 0,5$ , nad njo pa skoraj neopazen. Zaradi tega je koordinatna os stopnje neurejenosti prikazana v logaritemski skali.

### 4.4.3 Dolžine robov celic

Normirana verjetnostna porazdelitev dolžin robov celic za Kelvinove in Weaire-Phelanove modele v odvisnosti od stopnje neurejenosti je prikazana na sliki 4.9. Razvidno je, da je vpliv stopnje neurejenosti na spreminjanje vrednosti največje normirane frekvence zanemarljiv za oba modela. Dosti večji je vpliv na verjetnostno porazdelitev. Pri obeh modelih se z večanjem stopnje neurejenosti večja tudi širina verjetnostne porazdelitve, oziroma razmerje med povprečjem in standardnim odklonom. To nakazuje na pričakovano večjo razpršenost dolžin robov pri višjih stopnjah neurejenosti. Dolžine robov obeh modelov bolj odstopajo proti dolžini večji od povprečne, kar kaže na desno asimetrično porazdelitev, ki je značilna za naravne sisteme.

Primerjava med obema modeloma pokaže veliko podobnost relativne verjetnostne porazdelitve pri visokih stopnjah neurejenosti. Razlog je način priprave modelov po podobnem postopku z uporabo enačb 4.4, saj pride v skladu s to enačbo pri stopnji neurejenosti višji od  $a = 0,5$  do prekrivanja mejnih prostorov začetnih točk Voronojeve delitve. Tako imajo začetni položaji mejnih prostorov, ki jih določa vrsta izbranega modela, na končno obliko celic močno zmanjšan vpliv. Zaradi dovolj visoke stopnje naključnosti postaneta oba modela podobna drug drugemu in njune dolžine robov celic postanejo enako porazdeljene. Pri nizkih stopnjah neurejenosti so razlike večje. Medtem ko ima ravnotežni Kelvinov model vse robove enako dolge, ima namreč ravnotežni Weaire-Phelanov model robove štirih različnih dolžin. Zaradi tega je verjetnostna porazdelitev pri Weaire-Phelanovem modelu pri nižjih stopnjah neurejenosti širša od porazdelitve Kelvinovega modela.



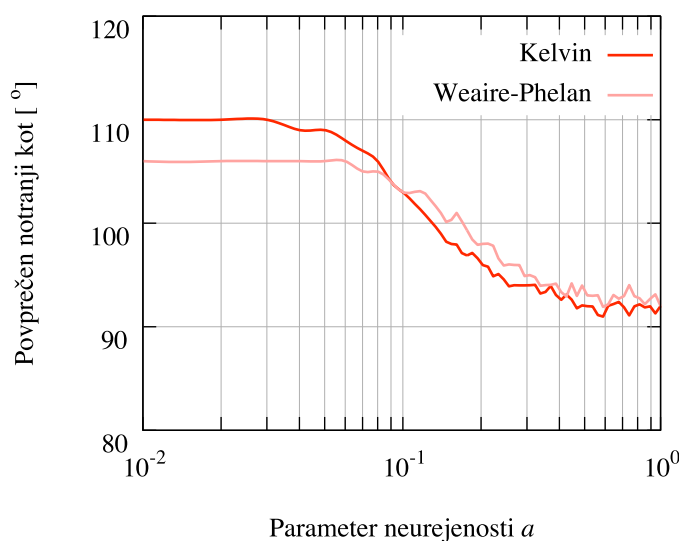
**Slika 4.9:** Normirana porazdelitev dolžin robov celic Kelvinovih modelov (levo) in Weaire-Phelanovih modelov (desno) glede na relativni standardni odklon  $\sigma_r$  pri spreminjajočem se parametru neurejenosti  $a$

#### 4.4.4 Notranji koti med robovi celic

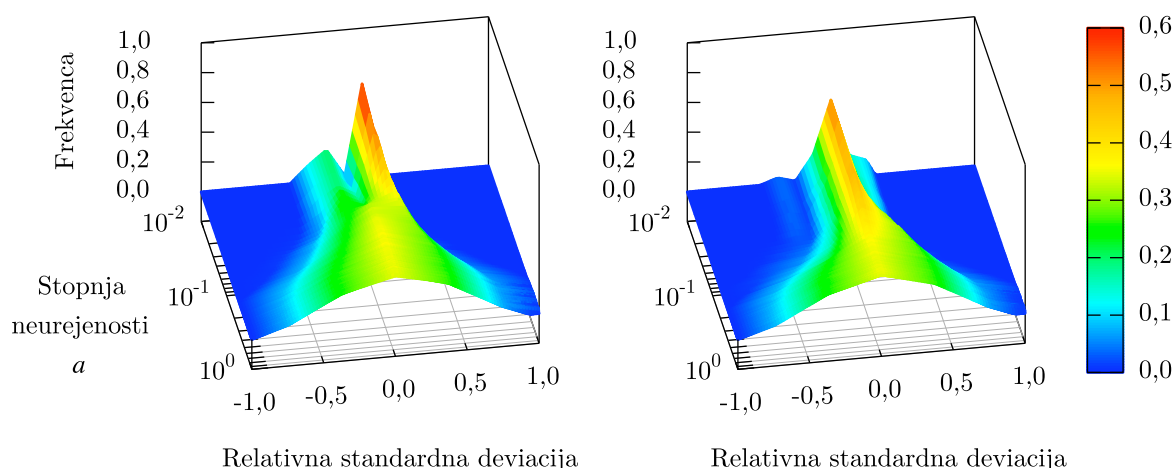
Zunanja obremenitev se pri odprto-celičnih gradivih neposredno prenese na robove celic in na njihova stičišča. Zaradi tega lahko analiza notranjih kotov poda pomembne ugotovitve, kako se pena obnaša pod obremenitvijo. Potek povprečnega notranjega kota za Kelvinov in Weaire-Phelanov model v odvisnosti od parametra neurejenosti je podan na sliki 4.10. Povečevanje parametra neurejenosti do  $a = 1,0$  ima za posledico padanje povprečnega notranjega kota med robovi celic, zaradi uporabljenega glajenja rešetkastega modela. Pri glajenju namreč pride do nastanka takšnih stičišč robov celic, v katerih se stika pet ali več robov celic. V takšnih stičiščih so koti med robovi celic manjši, kot pri stičiščih s štirimi ali manj robovi.

Povprečen notranji kot Kelvinovega modela tako pade iz začetnega kota urejenega modela  $110,8^\circ$  na  $92,5^\circ$ , medtem ko pade kot Weaire-Phelanovega modela iz  $107,8^\circ$  na  $92,9^\circ$ . S povečevanjem neurejenosti se tako zmanjša tudi začetna razlika v povprečnem notranjem kotu obeh modelov.

Normirana verjetnostna porazdelitev notranjih kotov celic za Kelvinove in Weaire-Phelanove modele v odvisnosti od stopnje neurejenosti je prikazana na sliki 4.11. Razvidno je, da z naraščanjem stopnje neurejenosti največja normirana frekvenca pada, medtem ko se večja širina verjetnostne porazdelitve, dokler verjetnostna porazdelitev ne dobi oblike Gaussove porazdelitve. To nakazuje na pričakovano večjo razpršenost notranjih kotov pri višjih stopnjah neurejenosti.



**Slika 4.10:** Potek povprečnega notranjega kota med robovi celic za Kelvinov in Weaire-Phelanov model v odvisnosti od parametra neurejenosti  $a$



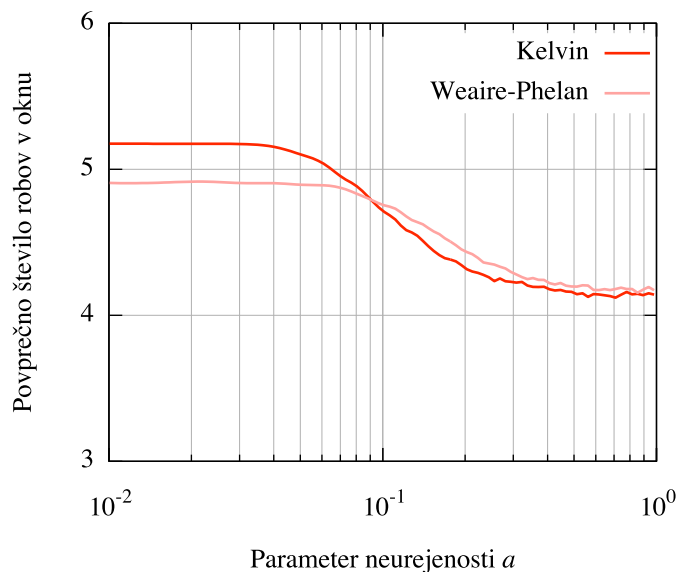
**Slika 4.11:** Normirana porazdelitev notranjih kotov Kelvinovih modelov (levo) in Weaire-Phelanovih modelov (desno) glede na relativni standardni odklon  $\sigma_r$  pri spreminjajočem se parametru neurejenosti  $a$

Podobno kot pri porazdelitvi dolžini robov celic pokaže primerjava relativne verjetnostne porazdelitve notranjih kotov veliko podobnost pri visokih stopnjah neurejenosti med obema modeloma. Zaradi dovolj visoke stopnje naključnosti namreč postaneta oba modela podobna drug drugemu. Pri nizkih stopnjah neurejenosti so razlike večje. Na eni strani ima ravnotežni Kelvinov model dva različna notranja kota, enega znotraj štirikotnikov in drugega znotraj šestkotnikov, ki ju v porazdelitvi loči prazen interval širine standardnega odklona. Pri Kelvinovem modelu se zaradi tega izrazito kažeta dva vrha pri nizkih stopnjah neurejenosti. Na drugi strani ima ravnotežni Weaire-Phelanov model kar deset različnih notranjih kotov, zaradi česar je verjetnostna porazdelitev bolj enakomerna in ima en vrh.

#### 4.4.5 Površina in oblika oken celic

Veliko lastnosti odprto-celičnih gradiv je povezanih z obliko in velikostjo oken med celicami. Pomembne so tako za mehanske lastnosti gradiva kot tudi za aplikacije, ki vključujejo pretok plina ali tekočine skozi gradivo. Oblika oken je bila analizirana s pomočjo števila robov v oknu, velikost oken pa z njihovo površino.

Odvisnost povprečnega števila robov v oknu za Kelvinov in Weaire-Phelanov model od parametra neurejenosti je podan na sliki 4.12. Povečevanje parametra neurejenosti ima za posledico padanje povprečnega števila robov v oknu. S povečevanjem parametra neurejenosti prehaja namreč struktura rešetkastega modela iz energijsko ravnotežne oblike v stanje s povišano površinsko energijo. Tako tudi oblika oken prehaja iz energijsko ugodne, v energijsko manj ugodno obliko, za katero je značilno manjše število robov.



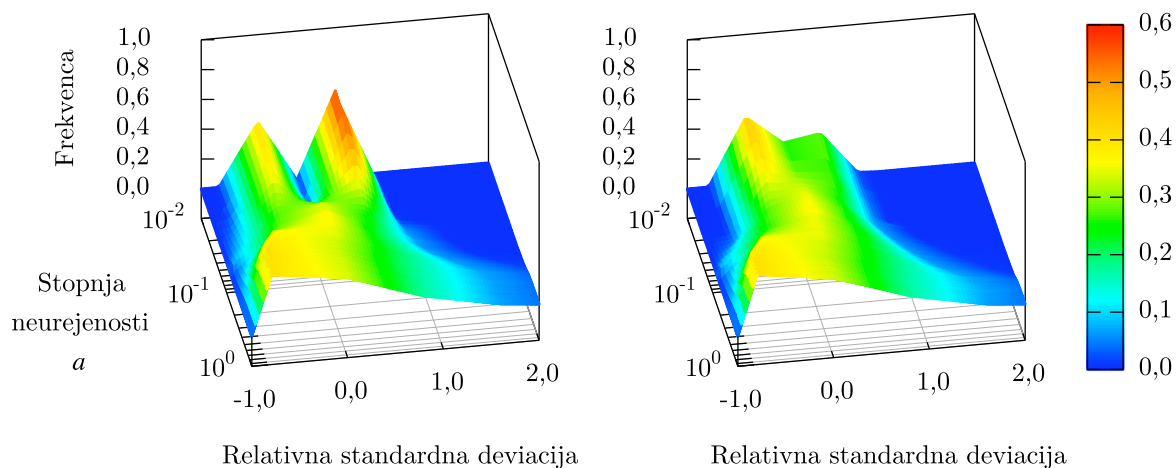
**Slika 4.12:** Potek povprečnega števila robov v oknih Kelvinovega in Weaire-Phelanovega modela v odvisnosti od parametra neurejenosti  $a$

Povprečno število robov v oknih Kelvinovega modela tako pade iz 5,17 v urejenem modelu na 4,14 robov v oknu, medtem ko pade povprečno število robov Weaire-Phelanovega modela iz 4,97 na 4,17 robov v oknu. S povečevanjem neurejenosti se tako zmanjša tudi začetna razlika v povprečnem številu robov v oknih Kelvinovega in Weaire-Phelanovega modela.

Površina oken za statistično analizo je bila izračunana kot vsota površin trikotnikov, ki okno sestavljajo, saj okna neurejenih modelov zaradi uporabljenega glajenja rešetkastega modela ne ležijo v eni ravnini. Normirana verjetnostna porazdelitev površin oken celic za Kelvinove in Weaire-Phelanove modele v odvisnosti od stopnje neurejenosti je prikazana na sliki 4.13. Porazdelitev velikosti površin oken je desno asimetrična in bolj razgibana kot porazdelitev dolžin robov ali notranjih kotov. Razlog je v tem, da velikost površine in s tem njena porazdelitev neposredno izhajata iz dolžin robov celic in notranjih kotov oken. Tako je verjetnostna porazdelitev velikosti oken sestavljena iz verjetnostne porazdelitve dolžin robov in porazdelitve velikosti notranjih kotov.

Iz slike 4.13 je razvidno, da z naraščanjem stopnje neurejenosti največja normirana frekvenca pada. Ta vpliv je viden predvsem za Kelvinov model, medtem ko je to pri Weaire-Phelanovemu modelu manj očitno. Z naraščanjem stopnje neurejenosti se širina verjetnostne porazdelitve veča. To nakazuje na pričakovano večjo razpršenost velikosti oken celic pri višjih stopnjah neurejenosti.

Podobno kot pri prejšnjih analizah tudi primerjava relativne verjetnostne porazdelitve velikosti oken med modeloma pokaže veliko podobnost pri visokih stopnjah neurejenosti. Zaradi dovolj visoke stopnje naključnosti namreč postaneta oba modela podobna drug



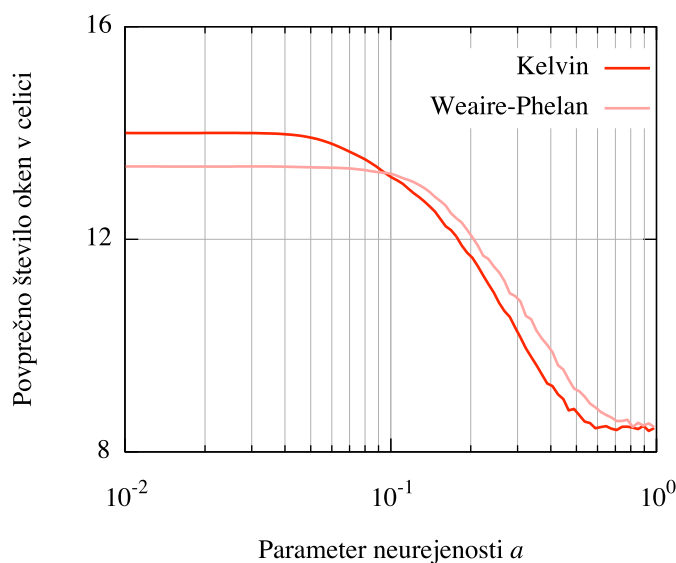
**Slika 4.13:** Normirana porazdelitev površin oken celic Kelvinovih modelov (levo) in Weaire-Phelanovih modelov (desno) glede na relativni standarden odklon  $\sigma_r$  pri spreminjajočem se parametru neurejenosti

drugemu. Pri nizkih stopnjah neurejenosti so razlike večje. Na eni strani ima ravnotežni Kelvinov model dve različni obliki oken, kvadratno in šestkotno, ki ju v porazdelitvi loči prazen interval širine standardnega odklona. Na sliki 4.13 se zaradi tega izrazito kažeta dva vrha pri nizkih stopnjah neurejenosti, ki z naraščanjem neurejenosti preideta v en širši vrh. Na drugi strani ima ravnotežni Weaire-Phelanov model sedem različnih oblik oken, zaradi česar je verjetnostna porazdelitev bolj enakomerna in ima tudi pri nizkih stopnjah neurejenosti en vrh.

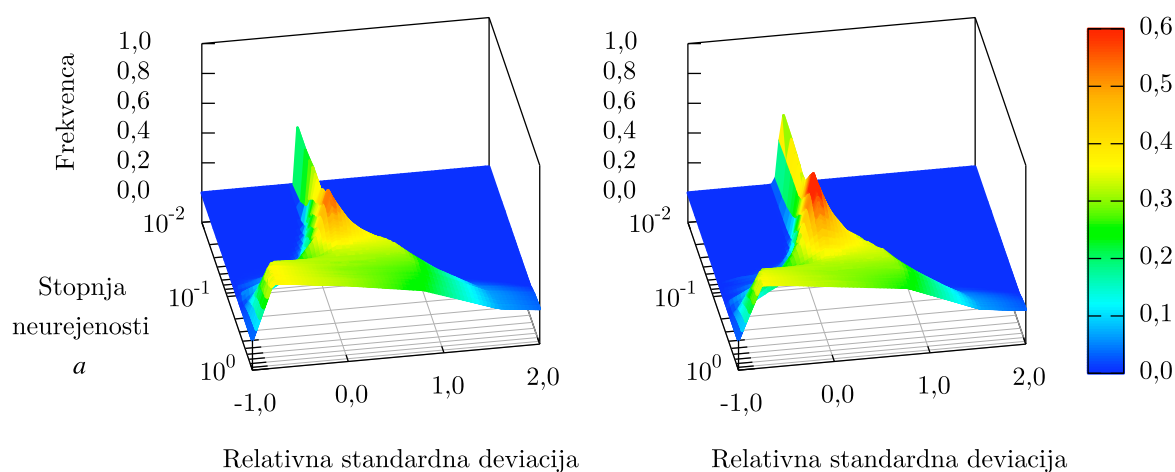
#### 4.4.6 Prostornina in oblika celic

Podatki o obliki in velikosti celic dajejo pomemben vpogled v strukturo odprto-celičnega gradiva. Oblika celic je bila analizirana s pomočjo števila oken v celici, velikost celic pa z njihovo prostornino. Odvisnost povprečnega števila oken v celici za Kelvinov in Weaire-Phelanov model od parametra neurejenosti je podan na sliki 4.14. Povečevanje parametra neurejenosti ima za posledico padanje povprečnega števila oken v celici. Razlogi so podobni kot pri povprečnem številu robov v oknu, namreč prehajanje strukture rešetkastega modela iz energijsko ravnotežne oblike v stanje s povišano površinsko energijo, za katero je značilno manjše število oken v celici.

Povprečno število oken v celicah Kelvinovega modela tako pade iz 14,0 v urejenem modelu na 8,45 oken v celici, medtem ko pade povprečno število oken Weaire-Phelanovega modela iz 13,36 na 8,46 oken v celici. S povečevanjem neurejenosti se tako zmanjša tudi začetna razlika v povprečnem številu oken v celici med Kelvinovim in Weaire-Phelanovim modelom.



**Slika 4.14:** Potek povprečnega števila robov v okenih Kelvinovega in Weaire-Phelanovega modela v odvisnosti od parametra neurejenosti  $a$



**Slika 4.15:** Normirana porazdelitev prostornin celic Kelvinovih modelov (levo) in Weaire-Phelanovih modelov (desno) glede na relativni standarden odklon  $\sigma_r$  pri spreminjajočem se parametru neurejenosti  $a$

Prostornina celic je bila izračunana kot vsota prostornin piramid, ki imajo za osnovno ploskev okno celice ter vrh v centru celice. Normirana verjetnostna porazdelitev prostornin celic za Kelvinove in Weaire-Phelanove modele v odvisnosti od stopnje neurejenosti je prikazana na sliki 4.15. Porazdelitev prostornin celic je desno asimetrična in bolj razgibana kot porazdelitev dolžin robov ali notranjih kotov iz enakega razloga kot pri porazdelitvi površin oken.

Razvidno je, da z naraščanjem stopnje neurejenosti največja normirana frekvenca najprej naraste, nato pa pada. Ta vpliv je viden predvsem za Weaire-Phelanov model, medtem ko

je to pri Kelvinovem modelu manj očitno. Z naraščanjem stopnje neurejenosti se širina verjetnostne porazdelitve večja. To nakazuje na pričakovano večjo razpršenost velikosti celic pri višjih stopnjah neurejenosti.

Podobno kot pri prejšnjih analizah tudi primerjava relativne verjetnostne porazdelitve velikosti prostornin med modeloma pokaže veliko podobnost pri visokih stopnjah neurejenosti. Zaradi dovolj visoke stopnje naključnosti namreč postaneta oba modela podobna drug drugemu. Za razliko od drugih analiz pa je v tem primeru podobnost med modeloma prisotna tudi pri nizkih stopnjah neurejenosti. Ta podobnost je posledica dejstva, da imata oba ravnotežna modela enako začetno izhodišče, saj ima ravnotežna Kelvinova celica enako prostornino kot obe ravnotežni Weaire-Phelanovi celici. S povečanjem stopnje neurejenosti pa nastanejo manjše razlike v porazdelitvi zaradi razlik v postavitvi začetnih točk Voronojeve delitve.

## 4.5 Primerjava rezultatov računalniških modelov z rekonstruiranimi modeli

Računalniški modeli opisani v tem poglavju uporabljajo za reprodukcijo neurejene strukture odprto-celične pene parameter neurejenosti  $a$ . Ta parameter predstavlja stopnjo, do katere je urejena mreža naključno spremenjena. Posledica uporabe naključnosti v pripravi računalniškega modela pene je, da stopnja neurejenosti  $a$  ni neposredno povratno določljiva. To pomeni, da na podlagi pripravljenega računalniškega modela ni mogoče neposredno določiti stopnje neurejenosti, ki je bila uporabljena pri pripravi modela. Stopnjo neurejenosti je potrebno določiti s primerjavo geometrijskih in topoloških lastnosti obravnavanega modela pene z lastnostmi računalniškega modela pene z izbrano stopnjo neurejenosti. S tem namenom je bila v poglavju 3 narejena analiza geometrijskih in topoloških lastnosti vzorcev aluminijevih odprto-celičnih pen.

Za primerjavo geometrijskih in topoloških lastnosti realnih odprto-celičnih gradiv z opisanimi računalniškimi modeli je bilo potrebno oblikovati namensko funkcijo ujemanja  $f_m$ , ki bi podala stopnjo ujemanja med lastnostmi vzorcev in lastnostmi modelov. Takšna funkcija bi lahko zajemala tako absolutne vrednosti merjenih lastnosti kot tudi njihove odvisnosti. Vendar primerjava odvisnosti lastnosti predstavlja določeno oviro. Primerjava odvisnosti ene same lastnosti namreč zahteva primerjavo najmanj sedmih intervalov porazdelitve relativne frekvence (od  $-3\sigma$  do  $+3\sigma$ ). Ker je večina izmerjenih vrednosti zbrana v srednjih intervalih okrog povprečne vrednosti, morajo imeti frekvence teh intervalov večji vpliv na primerjavo lastnosti kot robni intervali. Zato bi bilo potrebno uvesti določene utežne koeficiente, ki bi upoštevali razliko v vplivu vsakega posameznega intervala. In določitev utežnih koeficientov predstavlja omenjeno oviro, saj ne obstaja ustrezen referenčen vzorec, na katerem bi jih bilo mogoče določiti s pomočjo primerjave.



Pomanjkanje referenčnih vzorcev za primerjavo je pripeljalo do poenostavljene namenske funkcije, ki pri vsaki lastnosti upošteva le velikosti povprečnih vrednosti  $\mu$  in standardnih odklonov  $\sigma$ . Izjemo predstavljajo naslednje geometrijske lastnosti: dolžina roba celice  $l$ , površina okna celice  $A$  in prostornina celice  $V$ , saj mora biti namenska funkcija neodvisna od velikosti računalniškega modela (geometrična podobnost). Če namreč računalniški model odprto-celične pene povečamo, se povečajo tudi povprečne vrednosti dolžin robov, površin oken in prostornin celic, medtem ko ostanejo povprečne vrednosti notranjih kotov, povprečne vrednosti števila robov v oknu in povprečne vrednosti števila oken v celici nespremenjene. Zaradi tega pri lastnostih odvisnih od velikosti nista bila upoštevana njihova povprečna vrednost in standarden odklon, ampak samo relativen standarden odklon  $\sigma_r = \sigma/\mu$ , na katerega sprememba velikosti modela ne vpliva.

Namenska funkcija ujemanja za posamezen računalniški model  $f_m$  je bila oblikovana na podlagi treh statističnih veličin, in sicer na podlagi povprečne vrednosti  $\mu$ , standardnega odklona  $\sigma$  in relativnega standardnega odklona  $\sigma_r$ . Prvi dve statistični veličini sta bili uporabljeni za oceno odstopanja velikosti notranjih kotov, števila robov v oknu in števila oken v celici, medtem ko je bila tretja statistična veličina uporabljena za oceno odstopanja dolžine robov, površine oken in prostornine celic. Odstopanja posamezne statistične veličine so bila izračunana kot razlika med njeno vrednostjo v računalniškemu modelu in vzorcu pene ter nato še normirana z njeno vrednostjo v vzorcu pene. Odstopanja statističnih veličin so bila normirana, da so bila medsebojno primerljiva. Namenska funkcija računalniškega modela  $f_m$  je bila nato sestavljena kot vsota kvadratov normiranih odstopanj statističnih veličin posameznih lastnosti in je podana z naslednjo enačbo:

$$f_m = \sqrt{\frac{1}{9} \left( \sum_{i=1}^3 \Delta\mu_i^2 + \sum_{i=1}^3 \Delta\sigma_i^2 + \sum_{j=1}^3 \Delta\sigma_{r,j}^2 \right)}, \quad (4.5)$$

v kateri indeks  $i$  predstavlja od velikosti neodvisne lastnosti ( $\phi$ ,  $N_{ro}$  in  $N_{ok}$ ) in indeks  $j$  predstavlja od velikosti odvisne lastnosti ( $l$ ,  $A$  in  $V$ ). Uporabljena normirana relativna odstopanja statističnih veličin se izračunajo z naslednjimi enačbami:

$$\Delta\mu_i = \frac{\mu_{i,m} - \mu_{i,v}}{\mu_{i,v}}, \quad (4.6)$$

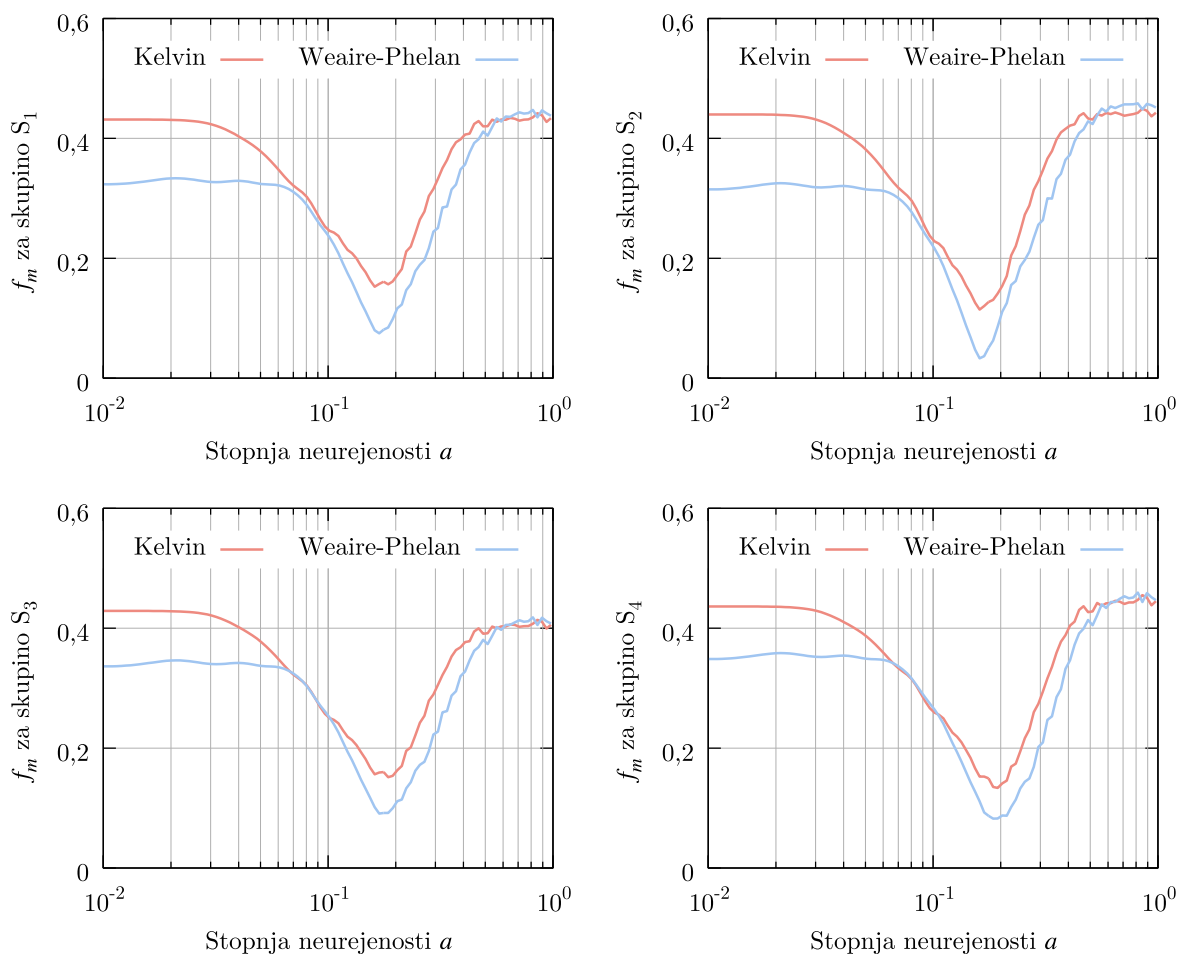
$$\Delta\sigma_i = \frac{\sigma_{i,m} - \sigma_{i,v}}{\sigma_{i,v}}, \quad (4.7)$$

$$\Delta\sigma_{r,j} = \frac{\sigma_{r,j,m} - \sigma_{r,j,v}}{\sigma_{r,j,v}}, \quad (4.8)$$

v katerih indeks  $m$  predstavlja ustrezno lastnost računalniškega modela in indeks  $v$  ustrezno lastnost vzorca realne pene. Potek vrednosti namenske funkcije  $f_m$  za Kelvinove in Weaire-Phelanove računalniške modele za vse štiri skupine vzorcev  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  in  $S_4$  v odvisnosti od stopnje neurejenosti  $a$  podaja slika 4.16. Najmanjše vrednosti namenske funkcije in njim pripadajoče vrednosti stopnje neurejenosti računalniških modelov pen podaja preglednica 4.2.

Iz slike 4.16 je razvidna velika podobnost med poteki namenske funkcije posameznih skupin vzorcev, ki vsebujejo eden izrazit ekstrem v okolici stopnje neurejenosti  $a = 0,20$ . Nadaljnje povečanje stopnje urejenosti poveča tudi vrednost namenske funkcije. Ta ugotovitev potrjuje predpostavko, da struktura realnih odprto-celičnih gradiv ni naključna, ampak na njo močno vpliva fizikalno ozadje nastanka pene.

Primerjava potekov namenske funkcije pokaže veliko razliko v vrednostih namenske funkcije Kelvinovega in Weaire-Phelanovega modela. Pri vseh skupinah analiziranih vzorcev se je namreč pokazalo, da Weaire-Phelanov model odprto-celičnega gradiva dosega nižje



**Slika 4.16:** Poteki vrednosti namenske funkcije ujemanja  $f_m$  v odvisnosti od izbranega računalniškega modela odprto-celične pene, izbrane skupine vzorcev in izbrane stopnje neurejenosti  $a$

**Preglednica 4.2:** Najmanjše vrednosti namenske funkcije

Skupina	Model	$\min(f_m)$ [%]	Stopnja neurejenosti $a$
$S_1$	Kelvin	15,29	0,17
	Weaire-Phelan	7,52	0,18
$S_2$	Kelvin	11,49	0,17
	Weaire-Phelan	3,87	0,18
$S_3$	Kelvin	14,95	0,20
	Weaire-Phelan	9,02	0,18
$S_4$	Kelvin	13,03	0,20
	Weaire-Phelan	8,62	0,19

vrednosti namenske funkcije kot Kelvinov model za vse vrednosti stopnje neurejenosti  $a < 0,5$ . Nad to mejo postaneta oba modela naključna in tako dosejata zelo podobne vrednosti namenske funkcije. To opažanje nakazuje na dejstvo, da Weaire-Phelanov model opiše lastnosti analiziranih realnih odprto-celičnih pen dosti bolje kot Kelvinov model. S tem so potrjena predpostavljena pričakovanja in opravičena uporaba Weaire-Phelanove delitve prostora za uporabo v računalniških modelih neurejenih odprto-celičnih pen.

Poteki namenske funkcije skupaj s preglednico 4.2 kažejo na to, da je odstopanje med Kelvinovim in Weaire-Phelanovim modelom še posebej veliko pri tistih stopnjah neurejenosti, kjer so vrednosti namenske funkcije najmanjše oziroma optimalne. To daje še dodatno prednost uporabi Weaire-Phelanove delitve prostora v modelih odprto-celičnih gradiv. Opisana razlika je največja pri skupini vzorcev  $S_2$ , ker je odstopanje Kelvinovega modela skoraj trikrat večje od odstopanja Weaire-Phelanovega modela, najmanjša razlika je pri skupini  $S_4$ .

Vrednosti stopnje neurejenosti  $a$ , pri kateri dosežejo namenske funkcije najmanjšo vrednost, so podane v preglednici 4.2. Iz primerjave vzorcev štirih različnih skupin in Weaire-Phelanovega računalniškega modela izhaja, da je povprečna stopnja neurejenosti za ta model enaka  $a = 0,18$ . Medtem ko najustreznejše stopnje neurejenosti pri Weaire-Phelanovem modelu zelo malo medsebojno odstopajo, so razlike med njimi pri Kelvinovem modelu večje. Najustreznejša stopnja neurejenosti se tako giblje med  $a = 0,17$  in  $a = 0,20$ . Opazno je, da je pri skupinah vzorcev z manjšimi celicami ( $S_3$  in  $S_4$ ) najustreznejša stopnja neurejenosti višja kot pri ostalih dveh skupinah vzorcev. To nakazuje na večjo neurejenost v strukturi vzorcev z manjšimi celicami. Vzrok za to so relativno višje vrednosti standardnih odklonov geometrijskih in topoloških lastnosti vzorcev z manjšimi celicami. Kot je že omenjeno v poglavju 3.3, pa so ti rezultati lahko posledica uporabljene ločljivosti pri zajemu 3D slike.

## 4.6 Zaključek

Razvoj računalniških modelov neurejenih realnih kovinskih pen je potreben za nadaljnje raziskave njihovih geometrijskih in topoloških lastnosti in iz njih izhajajočih makroskopskih fizikalnih lastnosti. Pri tem mora razvoj izboljšanih modelov temeljiti na analizi geometrijske in topološke strukture realnih pen, saj je to edini način, da se struktura modelov in s tem tudi njihove lastnosti približajo lastnostim realnih pen. Da se pri meritvah strukture zagotovi dovolj visoka stopnja ponovljivosti in zanesljivosti opravljenih meritev strukture, pa je v meritve potrebno vnesti čim višjo stopnjo avtomatizacije.

Vendar je potrebno pred uporabo popolnoma avtomatiziranih metod do podrobnosti poznati tudi njene pomanjkljivosti in temu prilagoditi njene parametre. Pri izvedenih analizah rekonstrukcije strukture vzorcev pen je bilo tako potrebo zaradi prenizke uporabljene ločljivosti pri računalniški tomografiji vzorcev iz skupin  $S_3$  in  $S_4$  (posledica manjših celic pri teh vzorcih) povečati barvni prag pri segmentaciji zajetih 2D slik. Povečanje barvnega pragu bi lahko bilo vzrok za večje izračunane standardne odklone opazovanih geometrijskih in topoloških lastnosti, ki so nakazovali na bolj neurejeno strukturo vzorcev iz skupin  $S_3$  in  $S_4$  v primerjavi z vzorci iz skupin  $S_1$  in  $S_2$ . Ugotovitve o višji stopnji neurejenosti je potrdila tudi primerjava rezultatov statistične analize rekonstruirane strukture realne pene z rezultati statističnih analiz računalniških modelov. Izkazalo se je namreč dejstvo, da imajo vzorci z manjšimi celicami iz skupin  $S_3$  in  $S_4$  bolj neurejeno strukturo kot vzorci z večjimi celicami (preglednica 4.2). Zaradi prenizke uporabljene ločljivosti med tomografijo pa na podlagi teh rezultatov ni mogoče z gotovostjo trditi ali večja neurejenost v teh vzorcih dejansko obstaja, ali pa je posledica nepravilno izbranih parametrov uporabljene avtomatizirane metode.

Primerjava Kelvinovega in Weaire-Phelanovega računalniškega modela z vzorci aluminijevih odprto-celičnih pen je pokazala, da modeli osnovani na Weaire-Phelanovi delitvi prostora bolje opisujejo strukturo realnih pen. Pokazalo se je tudi veliko odstopanje lastnosti analiziranih pen od naključnih modelov pen (stopnja neurejenosti  $a > 0,5$ ). Obe ugotovitvi potrjujeta, da trde pene niso naključne strukture, ampak da na njihov nastanek močno vpliva fizikalno ozadje procesa penjenja. Ta ugotovitev skupaj z dejstvom, da se realne pene razlikujejo od idealiziranih teoretičnih pen vzpodbuja k uporabi računalniških modelov, ki so v osnovi neurejeni in izhajajo iz Weaire-Phelanove delitve prostora. Vendar so do sedaj takšno delitev prostora za pripravo računalniškega modela pene uporabili le Daxner et al. [82], ki so proučevali mehanske lastnosti metaliziranih urejenih odprto-celičnih pen. Ostali avtorji so uporabljali urejene [83] ali neurejene Kelvinove modele [5, 76, 77, 78] in metode z neurejeno razporeditvijo začetnih točk [70, 72, 73, 74] (poglavje 4.1.1).

Izvedena primerjava med strukturama računalniških modelov in strukturo vzorcev odprto-celičnih gradiv je bila narejena na podlagi lastnosti celic, ki so vezane na velikost in obliko njenih osnovnih gradnikov. Posledično primerjava zelo dobro oceni podobnost geometrijskih in topoloških lastnosti obravnavanih struktur na nivoju celic, medtem ko je za primerjavo na nivoju celotne strukture potrebno upoštevati še prostorski položaj celic. Ta v analizi ni bil neposredno upoštevan, vendar analizirane lastnosti celic posredno že vključujejo informacije o medsebojni razdalji med celicami (velikost celic) in razporeditvi sosednjih celic (topologija oken in notranji koti med robovi celic), ne upoštevajo pa njihove razporeditve v prostoru.

Tako je za razliko od vzorcev odprto-celičnih gradiv v strukturi neurejenih računalniških modelov opaziti vzporedne ravnine plasti celic, ki vedno sovpadajo s smermi koordinatnih osi. Te plasti v ravninah so posledica postopka priprave neurejenih računalniških modelov odprto-celičnih gradiv z uporabo začetnih točk Voronojeve delitve prostora na položajih ravnotežnih modelov, ki so orientirani v smereh koordinatnih osi.



## 5 EKSPERIMENTALNI PREIZKUSI ODPRTO-CELIČNIH GRADIV

Z namenom verifikacije in validacije razvitih računalniških modelov neurejenih odprto-celičnih struktur so bili uporabljeni eksperimentalni enoosni tlačni preizkusi kovinskih celičnih gradiv. Preizkusi so bili izvedeni na računalniško vodenem servo-hidravličnem preizkusnem stroju INSTRON 8801 (največja sila približno  $\pm 50$  kN) na Fakulteti za elektrotehniko, strojništvo in ladjedelništvo v Splitu (slika 5.1) [84].

### 5.1 Način preizkušanja

Za primerjavo poteka deformacij in mehanizmov porušitve odprto-celičnih gradiv so bili izvedeni tlačni kvazi-statični in dinamični preizkusi. Za kvazi-statične preizkuse so bili uporabljeni vzorci, opisani v poglavju 3, za dinamične preizkuse pa so bili uporabljeni dodatni preizkušanci, in sicer trije z nizko relativno gostoto (skupina  $S_1$ ) in trije z normalno relativno gostoto (skupina  $S_2$ ). Ti preizkušanci (označeni od  $V_6$  do  $V_8$ ) niso bili izrezani iz enakih plošč kot preizkušanci za kvazi-statične preizkuse, njihove lastnosti pa podaja preglednica 5.1. Iz preglednice je opazna nekoliko večja razlika v relativni gostoti



Slika 5.1: Računalniško voden servo-hidravlični stroj INSTRON 8801

**Preglednica 5.1:** Izmerjene lastnosti vzorcev odprto-celične pene

Skupina	Vzorec	Velikost celic [ppi]	Dolžina [mm]	Širina [mm]	Višina [mm]	Masa [g]	$\rho_r$ [%]
$S_1$	$V_6$	10	41,30	40,70	39,50	8,77	4,89
	$V_7$		40,60	40,60	40,00	8,56	4,81
	$V_8$		41,00	40,50	39,90	8,96	5,01
	<b>Povprečje</b>		<b>40,97</b>	<b>40,6</b>	<b>39,80</b>	<b>8,76</b>	<b>4,90</b>
$S_2$	$V_6$	10	40,40	39,70	38,05	12,39	7,12
	$V_7$		40,60	39,90	37,70	10,51	6,02
	$V_8$		40,30	40,20	38,00	12,32	6,99
	<b>Povprečje</b>		<b>40,43</b>	<b>39,93</b>	<b>40,13</b>	<b>11,74</b>	<b>6,71</b>

dodatnih vzorcev iz skupine  $S_2$ . Preizkušanci so bili enoosno tlačno obremenjeni pri sobni temperaturi  $T_s = 21^\circ\text{C}$  s konstantno hitrostjo obremenjevanja. Potek obremenjevanja in zajem izmerjenih podatkov sta bila vodena računalniško. Frekvenca zajemanja podatkov je bila 10 Hz, pri čemer sta bila sila obremenjevanja  $F_t$  in pomik glave preizkuševalnega stroja  $s$  merjena neprekinjeno v celotnem času preizkusa.

Vpetje preizkušanca v preizkuševalni stroj prikazuje slika 5.2. Ker so bili izvedeni tlačni preizkusi, sta za vpetje preizkušanca zadostovali glavi z ravno delovno površino. Zaradi visokega koeficienta trenja med jeklom in aluminijem, ki znaša okrog  $\mu_{je,al} = 0,35$  [85],



**Slika 5.2:** Položaj preizkušancev glede na zgornjo oporno in spodnjo delovno glavo pred preizkušanjem (levo) in po preizkušanju (desno)



namreč med preizkušanjem ne pride do premika vzorcev. Obremenitev je na preizkušance prenašala spodnja delovna glava, medtem ko je zgornja glava služila kot podpora. Hitrost pomika med kvazi-statičnim obremenjevanjem je bila izračunana na podlagi izbrane inženirske deformacijske hitrosti obremenjevanja  $\dot{\epsilon}_{e,sta} = 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  in velikosti preizkušanca. Inženirsko deformacijsko hitrost  $\dot{\epsilon}_e$  podaja naslednja enačba:

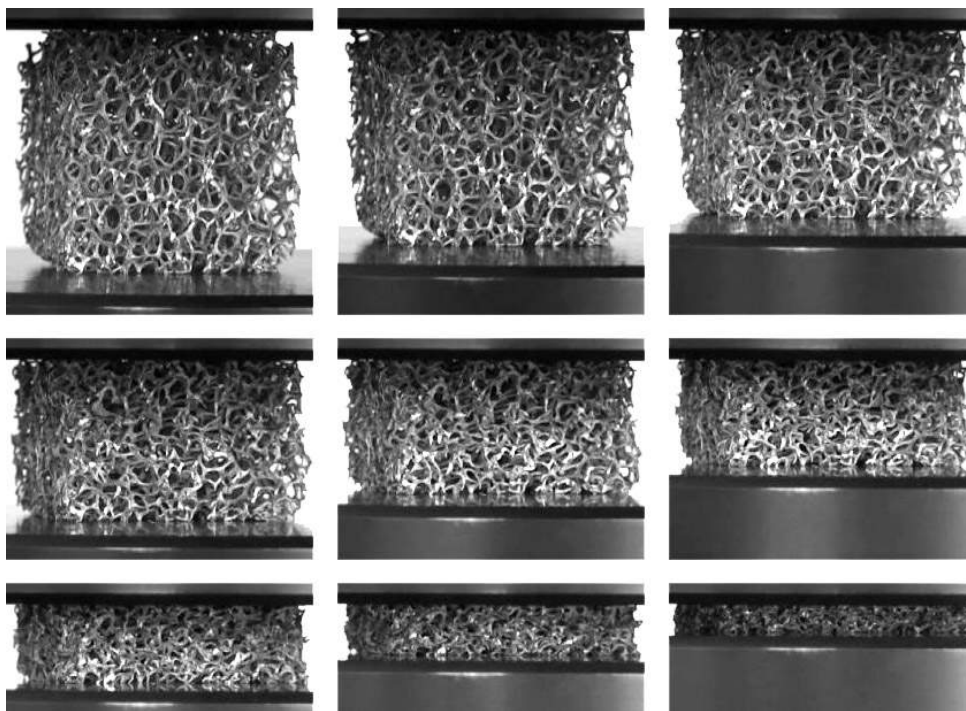
$$\dot{\epsilon}_e = \frac{s}{h_0}, \quad (5.1)$$

kjer  $s$  predstavlja pomik glave preizkuševalnega stroja in  $h_0$  začetno višino preizkušanca (preglednica 3.2 in 5.1). Tako je bila hitrost kvazi-statičnega obremenjevanja pri preizkušancih iz skupin  $S_1$  in  $S_2$  enaka  $\dot{s}_{1,2} = 0,2 \text{ mm/s}$ , medtem ko je pri preizkušancih iz skupin  $S_3$  in  $S_4$  znašala  $\dot{s}_{3,4} = 0,1 \text{ mm/s}$ . Pri dinamičnih preizkusih je bila uporabljena največja hitrost obremenjevanja dosegljiva na uporabljenem preizkuševalnem stroju, ki znaša  $\dot{s}_{max} = 284 \text{ mm/s}$ . Inženirska deformacijska hitrost med dinamičnim obremenjevanjem je tako znašala  $\dot{\epsilon}_{e,din} = 7,11 \text{ s}^{-1}$ . Obremenjevanje vzorca je bilo prekinjeno, ko je sila dosegla največjo silo preizkuševalnega stroja  $F_{t,max} = 50 \text{ kN}$ .

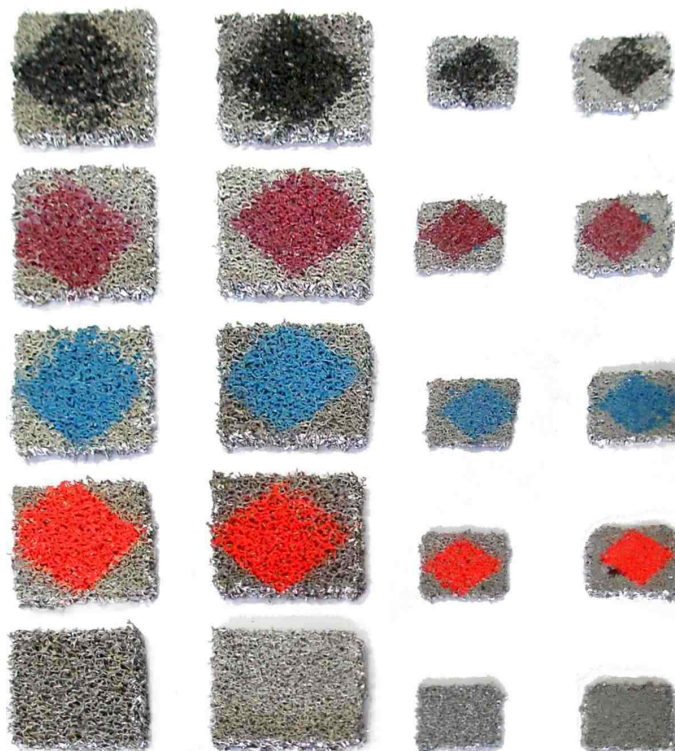
## 5.2 Rezultati preizkušanja

Poteki deformiranja preizkušancev so si medsebojno zelo podobni, zato je na sliki 5.3 prikazan le potek deformiranja enega izmed preizkušancev (preizkušanec  $V_1$  in skupine  $S_1$ ). Slika prikazuje devet stopenj deformiranja preizkušanca med tlačno obremenitvijo od stopnje deformacije 0 % do 90 %, pri čemer je korak med posameznimi stopnjami konstanten. Preizkušance po tlačnih preizkusih prikazuje slika 5.4. Ker je bilo obremenjevanje vzorca prekinjeno, ko je sila dosegla vrednost  $F_{t,max} = 50 \text{ kN}$ , se končne višine preizkušancev po preizkusu razlikujejo, s tem pa se razlikujejo tudi njihove povprečne končne deformacije. Tako znaša povprečna končna deformacija vzorcev v odvisnosti od skupin (1, 2, 3 in 4)  $\bar{\epsilon}_{f,1} = 92,31 \%$ ,  $\bar{\epsilon}_{f,2} = 91,12 \%$ ,  $\bar{\epsilon}_{f,3} = 92,36 \%$  in  $\bar{\epsilon}_{f,4} = 90,38 \%$ . Iz primerjave teh vrednosti z relativnimi gostotami posameznih skupin vzorcev je razvidna pričakovana obratno-sorazmerna odvisnost med končno deformacijo in relativno gostoto. Namreč večja kot je relativna gostota celičnega gradiva, višjo togost ima gradivo in s tem pri enaki sili nižjo končno deformacijo.

Sam proces in mehanizem deformiranja vzorcev je težko opaziti na slikah, posnetih med preizkušanjem, saj je na njih vidna le zunanja mejna plast celic. Bolj do izraza pride mehanizem porušitve odprto-celičnih vzorcev pri ogledu video posnetkov, a je opazovanje kljub temu omejeno na zunanost gradiva. Dodatno je oteženo opazovanje poteka deformiranja pri dinamičnih preizkusih zaradi same hitrosti obremenjevanja. Vendar analiza



**Slika 5.3:** Potek deformiranja preizkušanca  $V_1$  iz skupine vzorcev  $S_1$ ; prikazane so stopnje deformacije od 0 do 90 % s konstantnim korakom



**Slika 5.4:** Vzorci aluminijeve odprto-celične pene po preizkušanju; povprečna končna deformacija vzorcev v odvisnosti od skupin (1, 2, 3 in 4) znaša  $\bar{\epsilon}_{f,1} = 92,31 \%$ ,  $\bar{\epsilon}_{f,2} = 91,12 \%$ ,  $\bar{\epsilon}_{f,3} = 92,36 \%$  in  $\bar{\epsilon}_{f,4} = 90,38 \%$

posnetkov pokaže, da se preizkušanci ne deformirajo enakomerno po celotni prostornini, ampak da pride do njihove deformacije v ločenih, ozkih plasteh. Gre za plasti celic, v katerih se zaradi manjše lokalne togosti najhitreje pojavi plastična deformacija. Najprej se dve takšni plasti pojavita na stiku s podporno in obremenitveno ploščo, nato pa nastanejo še druge takšne plasti znotraj preizkušanca. Plasti ležijo v ravninah, katerih normala sovpada s smerjo obremenjevanja.

Odvisnosti inženirske napetosti  $\sigma_e$  od inženirske deformacije  $\varepsilon_e$  so bile določene s pomočjo tlačne sile  $F_t$  in pomika glave  $s$ , merjene med preizkusom. Določene so bile za vsak preizkušane posebej glede na začetno velikost njegovega preseka prečno na smer obremenitve  $A_0$  in glede na začetno višino preizkušanca  $h_0$  (preglednica 3.2 in 5.1) po enačbah 5.2 in 5.3.

$$\sigma_e = \frac{F_t}{A_0} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_e = \frac{s}{h_0} \quad (5.3)$$

Tako dobljene odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije so bile uporabljene za izračun odvisnosti povprečne inženirske napetosti za vsako skupino vzorcev posebej (slika 5.9), ki so bili kasneje uporabljeni za primerjavo rezultatov z računalniškimi modeli. Za primerjavo rezultatov so bili izračunani še modul elastičnosti  $E$ , tangenti modul  $E_t$  in gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U$ , katerih vrednosti povzema preglednica 5.2.

Vrednost tangentnega modula je bila izbrana, saj odraža hitrost zgoščevanja celičnega gradiva ob tlačni deformaciji v tako imenovanem delu konstantnih napetosti, medtem ko gostota z deformacijo absorbiranega dela poda celosten pogled na togost obravnavanega gradiva. Tangenti modul je močno odvisen od velikosti prereza robov celic in velikosti praznin med njimi, saj se med deformacijo začnejo robovi celic medsebojno dotikati in zapolnjevati praznine med njimi. Velikost prerezov in praznin pa je neposredno povezana z relativno gostoto gradiva. Višja relativna gostota pri gradivu z enako velikimi celicami namreč pomeni debelejša robova celic, zaradi česar so praznine med njimi manjše. Tako je tangenti modul neposredno povezan z relativno gostoto celičnega gradiva.

Tangenti modul je bil izračunan za območje inženirskih deformacij od  $\varepsilon_e = 20\%$  do  $50\%$ , medtem ko je bila gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  izračunana do inženirske deformacije  $50\%$  s pomočjo enačbe 5.4.

$$U = \int_{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5.4)$$

Kot napetost  $\sigma$  in deformacija  $\varepsilon$  v enačbi 5.4 sta bili uporabljeni inženirska napetost  $\sigma_e$  in inženirska deformacija  $\varepsilon_e$ , vrednost integrala pa je bila izračunana s pomočjo Reimannove vsote [86], ki jo podaja naslednja enačba:

$$S = \sum_{k=1}^n f(x_k) \Delta x_k, \quad (5.5)$$

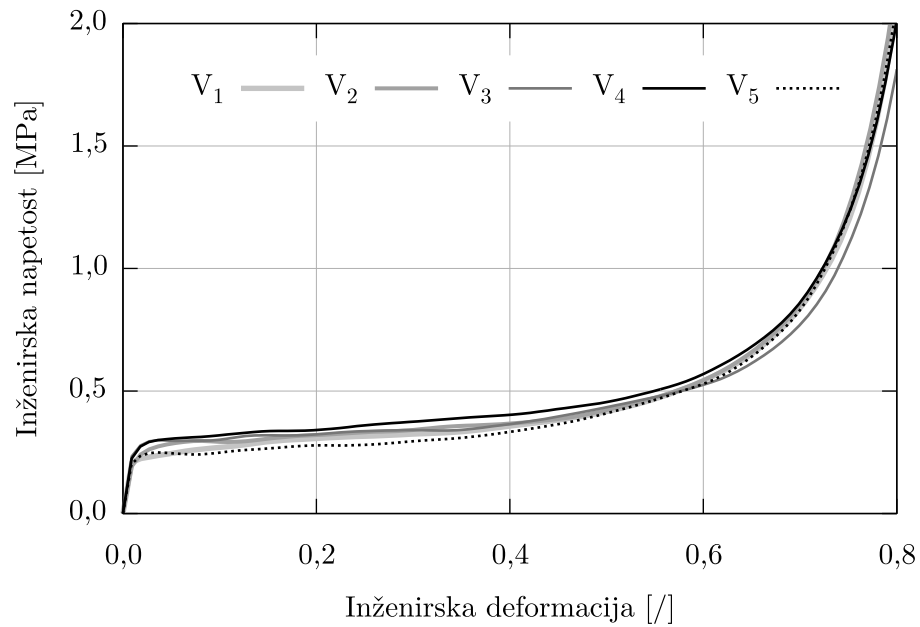
kjer za dani primer funkcija  $f$  predstavlja inženirsko napetost, neodvisna spremenljivka  $x$  pa inženirsko deformacijo. Število korakov  $n$  je bilo določeno s pomočjo velikosti koraka  $\Delta x_k$ , ki je bila konstantna in je znašala  $\Delta x_k = 1 \times 10^{-3}$ .

### Kvazi-statični preizkusi

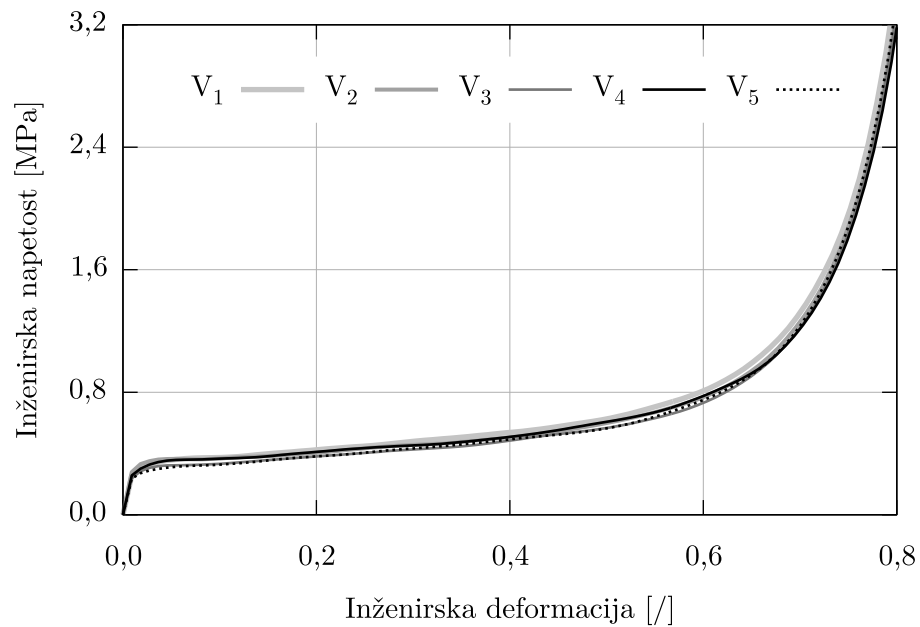
Kvazi-statične odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij na slikah od 5.5 do 5.8 imajo za celična gradiva značilno obliko krivulj z elastičnim, prehodnim in konstantnim delom ter s ponovno rastjo togosti pri visoki stopnji deformacije. Kljub neurejeni celični strukturi testiranih vzorcev odstopanja znotraj posameznih skupin niso velika, razen odstopanj pri skupini  $S_3$ . To kaže na dejstvo, da so bili ostali vzorci odprto-celičnih pen ustrezne velikosti glede na velikost njihovih celic.

Izjema je le skupina  $S_3$ , katere odvisnost inženirskih napetosti od inženirskih deformacij prikazuje slika 5.7. Iz slike je razvidno nihanje napetosti med tlačno deformacijo po koncu elastičnega dela krivulje, to je nad inženirsko deformacijo  $\varepsilon_e = 1$  %. Neposredna primerjava nihanja napetosti posameznih vzorcev pokaže, da imajo krivulje napetosti približno enako število nihajev do območja ponovne rasti togosti, kar nakazuje, da nihanje ni naključno. Navadno je vzrok takšnega nihanja napetosti deformiranje strukture po plasteh. Takšna porušitev strukture je lahko posledica prisotnosti visoke stopnje urejenosti v strukturi celičnega gradiva ali posledica nižjega števila celic v strukturi. Analiza strukture vzorcev skupine  $S_3$  v poglavju 3 in njena primerjava z računalniškimi modeli je pokazala, da je struktura vzorcev skupine  $S_3$  podobno neurejena kot struktura vzorcev preostalih skupin. Na drugi strani primerjava velikosti povprečnih premerov celic in njihovih deležev glede na povprečne višine vzorcev podanih v poglavju 3.3.4 pokaže, da je relativna velikost celic največja ravno v skupini  $S_3$ , kjer znaša 18,28 %. Število celic po višini in v prečnem preseku vzorcev je torej najmanjše v skupini  $S_3$  in predstavlja vzrok za porušitev strukture po plasteh.

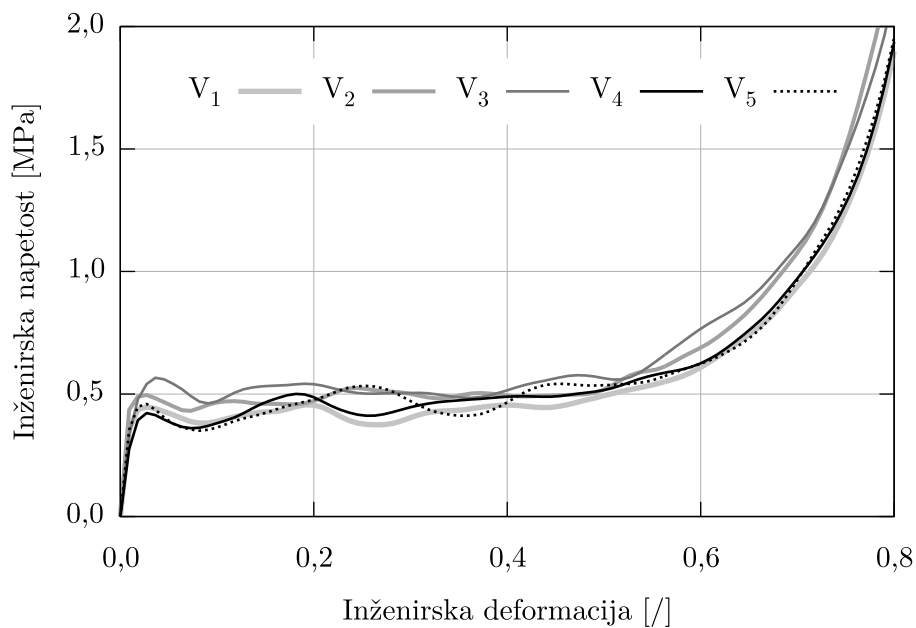
Primerjava odvisnosti povprečnih inženirskih napetosti od inženirskih deformacij (slika 5.9) skupaj z izračunanimi mehanskimi lastnostmi podanimi v preglednici 5.2 pokaže razlike med izmerjenimi lastnostmi vzorcev posameznih skupin. Iz odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij je razviden velik vpliv relativne gostote na togost



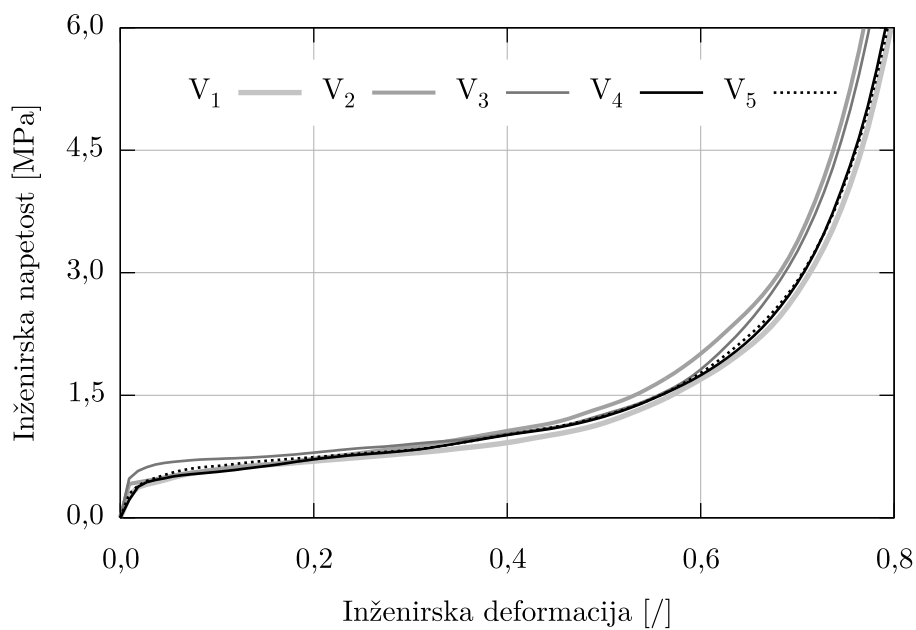
**Slika 5.5:** Kvazi-statična odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za preizkušance iz skupine  $S_1$  ( $\bar{\rho}_r = 5,03$  %)



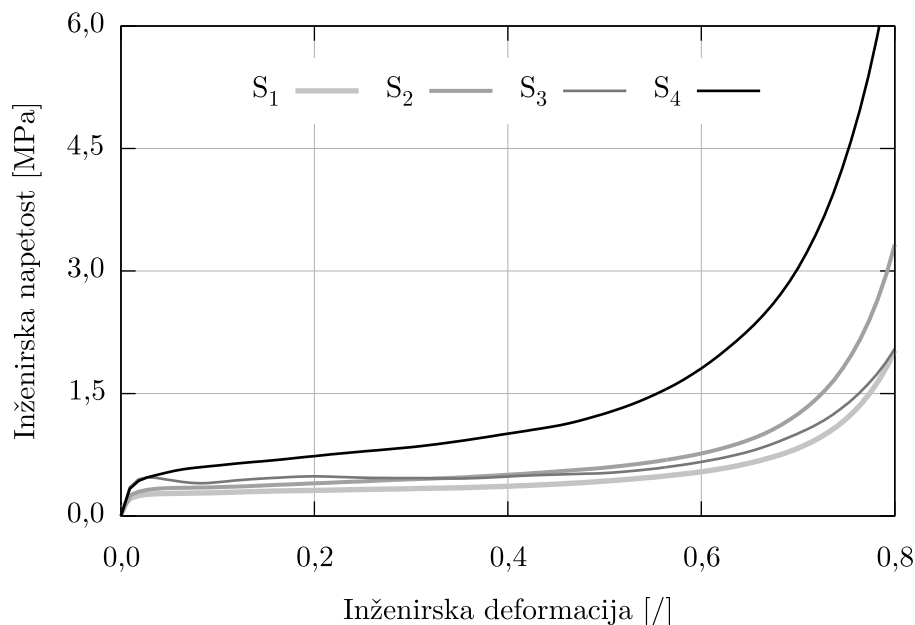
**Slika 5.6:** Kvazi-statična odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za preizkušance iz skupine  $S_2$  ( $\bar{\rho}_r = 6,10$  %)



**Slika 5.7:** Kvazi-statična odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za preizkušance iz skupine  $S_3$  ( $\bar{\rho}_r = 5,43$  %)



**Slika 5.8:** Kvazi-statična odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za preizkušance iz skupine  $S_4$  ( $\bar{\rho}_r = 12,01$  %)



**Slika 5.9:** Povprečne kvazi-statične odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije vseh štirih skupin od  $S_1$  do  $S_4$

celičnega gradiva. Večja kot je relativna gostota vzorcev skupine, višje so napetosti pri enaki stopnji deformacije. Manjše odstopanje je razvidno pri skupini  $S_3$  pri deformacijah nižjih od 50 %, saj se nihanje napetosti pri posameznih vzorcih skupine pozna tudi na nihanju njihovih povprečnih vrednosti.

Podobne ugotovitve pokaže tudi primerjava iz eksperimentov določenih mehanskih lastnosti preizkušancev. Posebej primerjava vrednosti tangenta modula  $E_t$  in primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U$ . Iz preglednice 5.2 je razvidno, da so vrednosti tangenta modula in vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela pričakovano premo-sorazmerne z relativno gostoto celičnega gradiva. Izjema je ponovno skupina vzorcev  $S_3$  zaradi že omenjenega nihanja inženirske napetosti.

S pomočjo izmerjenih modulov elastičnosti vzorcev aluminijeve odprto-celične pene, podanih v preglednici 5.2, je mogoče izvesti izračun korekcijskega koeficienta  $\alpha$  za odprto-celična gradiva po enačbi 2.2 za vrednosti povprečnih modulov elastičnosti  $\bar{E}$  posameznih skupin. S predpostavko, da je osnovni material celičnega gradiva industrijsko čist aluminij z modulom elastičnosti  $E_{al} = 70$  MPa [87], in da je v skladu s preglednico 2.2 eksponent v enačbi 2.2 enak  $n = 2$  so izračunane vrednosti korekcijskega koeficienta v odvisnosti od skupine vzorcev podane v preglednici 5.3.

V primerjavi z literaturo, kjer Ashby et al. [2] navajajo vrednosti korekcijskega koeficienta za odprto celična gradiva med 0,1 in 4,0 (preglednica 2.2), dosega preizkušena pena spodnjo mejo podanih vrednosti korekcijskega koeficienta. To pomeni, da gre za peno z nizkim relativnim modulom elastičnosti, lahko pa je vzrok teh rezultatov tudi

**Preglednica 5.2:** Kvazi-statične lastnosti preizkušancev: modul elastičnosti  $E$ , tangentni modul  $E_t$  (od  $\varepsilon = 20\%$  do  $50\%$ ) in gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  (do  $\varepsilon = 50\%$ )

Skupina	Vzorec	$E$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
$S_1$ ( $\bar{\rho}_r = 5,03\%$ )	$V_1$	23,74	0,36	156,70
	$V_2$	21,93	0,34	164,82
	$V_3$	26,76	0,36	167,87
	$V_4$	25,77	0,38	179,95
	$V_5$	23,31	0,43	146,18
	<b>Povprečje</b>	<b>24,30</b>	<b>0,37</b>	<b>163,10</b>
$S_2$ ( $\bar{\rho}_r = 6,10\%$ )	$V_1$	29,70	0,68	227,01
	$V_2$	32,26	0,66	218,56
	$V_3$	27,34	0,62	204,06
	$V_4$	29,00	0,66	218,42
	$V_5$	27,03	0,59	204,31
	<b>Povprečje</b>	<b>29,06</b>	<b>0,64</b>	<b>214,47</b>
$S_3$ ( $\bar{\rho}_r = 5,43\%$ )	$V_1$	40,97	0,10	211,54
	$V_2$	48,36	0,05	241,27
	$V_3$	39,36	0,05	257,04
	$V_4$	32,12	0,05	222,02
	$V_5$	41,75	0,24	227,10
	<b>Povprečje</b>	<b>40,51</b>	<b>0,10</b>	<b>231,79</b>
$S_4$ ( $\bar{\rho}_r = 12,01\%$ )	$V_1$	32,29	1,52	371,96
	$V_2$	46,43	2,13	409,82
	$V_3$	54,97	1,54	432,74
	$V_4$	25,35	1,76	388,72
	$V_5$	38,82	1,75	402,09
	<b>Povprečje</b>	<b>38,82</b>	<b>1,74</b>	<b>401,07</b>

**Preglednica 5.3:** Vrednosti korekcijskega koeficienta  $\alpha$

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
Korekcijski koeficient $\alpha$	0,14	0,11	0,20	0,04



način priprave uporabljenih preizkušancev, katerih zunanje površine po izrezovanju niso bile dodatno obdelane. Neravne površine preizkušancev namreč povzročijo, da celična struktura ni enakomerno obremenjena po celotnem prerezu, predvsem v ozkem začetnem elastičnem delu deformacije, kjer se določa modul elastičnosti. Posebej je to opazno pri celičnih gradivih, kjer je linearni elastični del deformacije zelo ozek, saj gradivo hitro preide v prehodni del deformacije, kjer že nastopi delna plastična deformacija robov celic vzorca. Zaradi neenakomerne porazdelitve zunanje obremenitve so nekateri deli vzorca pene bolj obremenjeni od ostalih in dosežejo višje stopnje lokalnih deformacij. Zaradi tega je tudi globalna deformacija vzorca pri enaki obremenitvi večja in posledično je določen modul elastičnosti nižji od dejanskega.

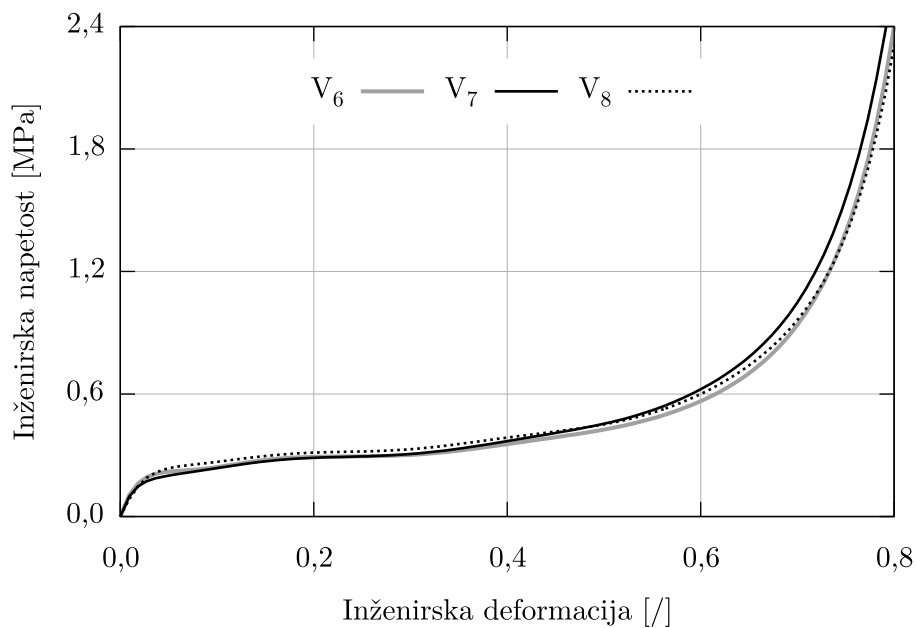
### Dinamični preizkusi

Odvisnost inženirskih napetosti od inženirskih deformacij dinamičnih eksperimentalnih preizkusov je predstavljena na slikah 5.10 in 5.11. Slika 5.10 prikazuje odvisnost napetosti od deformacij za vzorce iz skupine  $S_1$ , medtem ko slika 5.11 prikazuje odvisnost napetosti od deformacij za vzorce iz skupine  $S_2$ . Podobno kot pri kvazi-statičnih preizkusih imajo tudi odvisnosti inženirske napetosti dinamičnih preizkusov za celična gradiva značilno obliko z vsemi štirimi deformacijskimi področji. Opazno je dobro sovpadanje krivulj posameznih vzorcev iz skupine  $S_1$ , v skupini  $S_2$  pa ima vzorec  $V_7$  nekoliko nižjo togost od preostalih dveh vzorcev  $V_6$  in  $V_8$ .

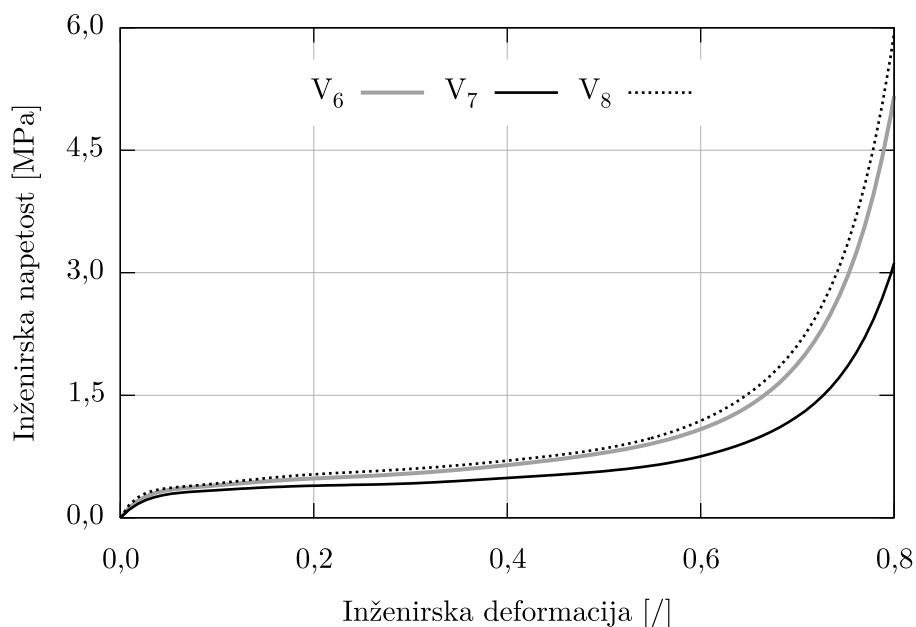
Mehanske lastnosti vzorcev, določene s pomočjo dinamičnih eksperimentalnih preizkusov, podaja preglednica 5.4. Iz preglednice je razvidno, da je modul elastičnosti tista vrednost, ki najbolj odstopa od vzorca do vzorca. Vzrok je velik vpliv zunanje oblike vzorcev,

**Preglednica 5.4:** Lastnosti vzorcev med dinamičnim preizkušanjem: modul elastičnosti  $E$ , tangenti modul  $E_t$  (od  $\varepsilon = 20\%$  do  $50\%$ ) in gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  (do  $\varepsilon = 50\%$ )

Skupina	Vzorec	$E$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
$S_1$ ( $\bar{\rho}_r = 4,90\%$ )	$V_6$	17,08	0,41	152,70
	$V_7$	13,84	0,49	154,00
	$V_8$	8,81	0,39	164,53
	<b>Povprečje</b>	<b>13,24</b>	<b>0,43</b>	<b>157,08</b>
$S_2$ ( $\bar{\rho}_r = 6,71\%$ )	$V_6$	16,06	1,00	263,93
	$V_7$	12,55	0,56	207,08
	$V_8$	18,14	0,97	287,38
	<b>Povprečje</b>	<b>15,58</b>	<b>0,84</b>	<b>252,79</b>



**Slika 5.10:** Odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za dinamične preizkuse vzorcev iz skupine  $S_1$  ( $\bar{\rho}_r = 4,90$  %)



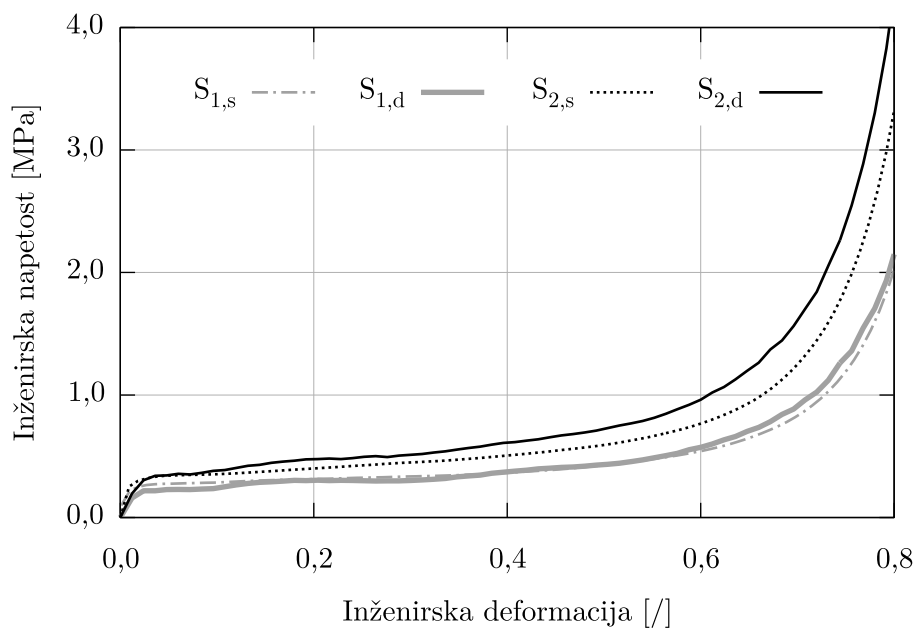
**Slika 5.11:** Odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za dinamične preizkuse vzorcev iz skupine  $S_2$  ( $\bar{\rho}_r = 6,71$  %)

posebej zgornje in spodnje mejne plasti celic, ki sta v stiku z obremenitvenima ploščama. Ti dve mejni plasti sta namreč tisti, v katerih se pojavi začetna deformacija vzorca, ki določa modul elastičnosti. Tako na modul elastičnosti vpliva manjše število celic, in zato so razlike v njegovih vrednostih večje.

Neposredna primerjava rezultatov kvazi-statičnih in dinamičnih eksperimentalnih preizkusov vzorcev iz skupin  $S_1$  in  $S_2$  je prikazana na sliki 5.12. Iz slike je razviden velik vpliv relativne gostote na odvisnost inženirskih napetosti od inženirskih deformacij, tako pri kvazi-statičnih kot tudi pri dinamičnih preizkusih. Višja kot je relativna gostota, višja je tudi togost odprto-celičnega gradiva, kar pokaže tudi primerjava vrednosti z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$ .

Primerjava odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije za vzorce iz iste skupine in z različno hitrostjo obremenjevanja ( $S_{1,s}$  v primerjavi s  $S_{1,d}$  in  $S_{2,s}$  v primerjavi s  $S_{2,d}$ ) pokaže vpliv inženirske deformacijske hitrosti na lastnosti aluminijevih odprto-celičnih gradiv. Razvidno je, da ima gradivo pri višji inženirski deformacijski hitrosti nižjo togost v elastičnem območju, kar potrjuje tudi primerjava modulov elastičnosti  $E$  (preglednica 5.2 in 5.4). Od elastičnega območja naprej je vpliv inženirske deformacijske hitrosti na vzorce iz skupine  $S_1$  zanemarljiv, medtem ko je razlika pri vzorcih iz skupine  $S_2$  večja. Neposredna primerjava odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije vseh vzorcev iz skupine  $S_2$  pokaže, da le napetosti dinamično preizkušene vzorca  $V_7$  sovpadajo z napetostmi kvazi-statično preizkušenih vzorcev ( $V_1$  do  $V_5$ ), medtem ko napetosti vzorcev  $V_6$  in  $V_8$  odstopajo. Vzrok teh razlik je za okrog 17 % višja relativna gostota vzorcev  $V_6$  in  $V_8$  v primerjavi z vsemi drugimi vzorci iz skupine  $S_2$ . Zaradi tega se pojavi tudi večja razlika med povprečnimi odvisnostmi inženirskih napetosti kvazi-statično in dinamično obremenjenih preizkušancev iz skupine  $S_2$ . Tako bi bilo zaradi razlike v gostoti primerneje v skupini  $S_2$  za povprečno odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije upoštevati le inženirsko napetost vzorca  $V_7$ .

Na podlagi takšne primerjave kvazi-statično in dinamično določenih odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije je tako težko zaslediti vpliv dinamičnih obremenitev na lastnosti odprto-celične aluminijeve pene. Vzroki so v nizki vztrajnostni masi aluminijeve pene in v nizki občutljivosti aluminija na deformacijsko hitrost [88, 89]. Ob upoštevanju Cowper-Symondsove enačbe (enačba 6.6) za aluminij in hitrosti obremenjevanja, uporabljene v dinamičnih preizkusih, sledi, da je dinamična meja tečenja za aluminij višja od njegove statične meje tečenja za 18,19 %. Vendar preizkušena odprto-celična pena vsebuje le največ 6,26 % aluminija, zaradi česar je vpliv osnovnega materiala na obnašanje celičnega gradiva pri takšni hitrosti obremenjevanja tako nizek, da ga je s preizkusi na neurejenih gradivih izjemno težko potrditi.



**Slika 5.12:** Primerjava odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije za kvazi-statične (s) in dinamične preizkuse (d) vzorcev iz skupin  $S_1$  in  $S_2$

## 6 RAČUNALNIŠKE SIMULACIJE OBNAŠANJA NEUREJENIH ODPRTO-CELIČNIH GRADIV POD VPLIVOM TLAČNIH OBREMENITEV

Računalniške simulacije predstavljajo zelo pomembno orodje za reševanje zahtevnih praktičnih problemov v inženirstvu in znanosti. Temeljijo na preslikavi realnih fizikalnih problemov v diskretno obliko matematičnih zapisov. Računalniške simulacije predstavljajo alternativno orodje znanstvenim, dragim, časovno zahtevnim eksperimentalnim preizkusom v laboratorijih. Numerična orodja omogočajo vpogled in razpolagajo s celotnimi informacijami, ki jih včasih ni možno izmeriti oziroma jih je izredno zahtevno določiti z eksperimentalnimi meritvami, kar je eden od vzrokov za vse pogostejšo uporabo računalniških simulacij v primerjavi s preizkusi. S tem so računalniške simulacije, ki predstavljajo vmesni člen med eksperimentalnimi modeli in teoretičnimi predpostavkami ter napovedmi, postale nepogrešljive za vrednotenje razvitih teorij, saj omogočajo vpogled v eksperimentalne meritve ter interpretiranje ali celo odkritje novih fizikalnih fenomenov.

Za reševanje statičnih in dinamičnih problemov s pomočjo računalniških simulacij je bilo razvitih več vrst numeričnih metod. Med njih spada tudi metoda končnih elementov, ki je od svoje prve uporabe v industriji do danes postala glavno orodje inženirjev in znanstvenikov za izvajanje numeričnih simulacij [90]. Danes imajo numerični analitiki na voljo veliko število raznovrstnih programov za numerične analize, ki jih lahko uporabljajo že na osebnih računalnikih in manj zmogljivih delovnih postajah, kar je bilo še pred nekaj deset leti nepredstavljivo.

Okvirno vse aproksimacijske metode temeljijo na dejstvu, da je mogoče vsak problem s kompleksnimi robnimi pogoji in lastnostmi razdeliti na manjše enote (elemente), s končnimi dimenzijami. Zaradi majhnosti teh elementov je mogoče realne poteke njihovih notranjih parametrov (pomike, temperature, napetosti) aproksimirati z enostavnejšimi funkcijami. Rešitev celotnega problema se na koncu sestavi iz rešitev spremenljivk posameznih elementov.

Tehnike reševanja časovno spremenljivih problemov se delijo na dve skupini, in sicer na implicitne metode in na eksplicitne integracijske metode. Pri implicitnih metodah reševanja je najprej s pomočjo iteracij doseženo globalno ravnotežje na koncu časovnega koraka, iz katerega se nato izračunajo spremenljivke elementov. Pri eksplicitnih metodah pa je ravno obratno. Pogoji globalnega ravnotežja so izpolnjeni že na začetku časovnega koraka, zaradi tega se spremenljivke elementov izračunajo direktno, brez potrebe po izračunu globalnega ravnotežja. To prednost eksplicitnih metod pred implicitnimi močno zmanjša zahteva po manjših časovnih korakih, da se ohrani stabilnost reševanja dinamičnega problema.

Z eksplicitnimi numeričnimi analizami se učinkovito rešujejo predvsem dinamični problemi, ki vsebujejo veliko nelinearnosti in hitrih prehodnih pojavov. Obremenitve so lahko nezvezne z velikimi spremembami amplitude, ki povzročajo velike vztrajnostne sile. (balistični preizkus, nalet avtomobila v oviro). Ker ni potrebe po računanju globalnih togostnih matrik ali zadovoljevanju pogojev ravnotežja na koncu časovnega koraka, je v eksplicitne analize lažje vključiti kontakte, ki so posledica tako velikih deformacij, da pride telo v kontakt s samim seboj. Omogočajo tudi reševanje problemov z materiali, ki vključujejo ekstremno plastičnost, pojave utrjevanja in mehčanja, porušitev materiala in materialov s krhkim lomom.

Obstoječi konstitutivni modeli celičnih gradiv, ki so danes vključeni v različnih sistemih za inženirske računalniške simulacije, ne morejo upoštevati vpliva geometrijske neurejenosti na spremembo makroskopskih lastnosti celičnega gradiva ob istočasnem upoštevanju različnih deformacijskih hitrosti oziroma ob upoštevanju dinamičnih obremenitev. Zaradi tega so bili razviti geometrijski modeli neurejenih celičnih gradiv, katerih geometrija omogoča upoštevanje vpliva neurejenosti na njihove lastnosti. Vendar večina teh modelov daje dobre rezultate le do tiste stopnje deformacije modela, pri kateri pride do medsebojnega kontakta med posameznimi robovi celic. Obstoječi modeli namreč notranjega kontakta ne upoštevajo, zato je njihova uporaba omejena predvsem na analizo elastičnih lastnosti celičnih gradiv s pomočjo statičnih simulacij [4, 5, 6, 7, 91].

Nezmožnost simuliranja visokih stopenj deformacije celičnih gradiv z obstoječimi numeričnimi modeli odpravlja razviti model neurejenih odprto-celičnih gradiv, opisan v poglavju 6.2. Osnovan je na rešetkastih modelih celičnih gradiv in omogoča tudi izvajanje simulacij z različnimi deformacijskimi hitrostmi. Simuliranje visokih stopenj deformacij odprto-celičnih gradiv zahteva upoštevanje notranjih kontaktov med robovi celic celičnega gradiva, sposobnost simuliranja različnih deformacijskih hitrosti pa uporabo ene od tehnik reševanja časovno spremenljivih problemov. Zaradi visoke stopnje nelinearnosti modela celičnega gradiva na račun prisotnosti robne in materialne nelinearnosti je bila izbrana tehnika eksplicitne numerične integracije v okviru programskega paketa LS-DYNA [92].

V poglavju 6.2 opisan numerični model neurejenega odprto-celičnega gradiva je bil osnovan na rešetkastih modelih celičnih gradiv z namenom diskretizacije razvitih 3D računalniških modelov. Vendar pa zaradi tega pristopa omogoča tudi diskretizacijo računalniških modelov odprto-celičnih gradiv rekonstruiranih iz zajetih 3D slik, ki omogočajo validacijo uporabljene metode numeričnega modeliranja. 3D slike so bile namreč zajete na vzorcih, ki so bili kasneje tudi eksperimentalno preizkušeni s pomočjo kvazi-statičnih in dinamičnih preizkusov. Tako primerjava rezultatov teh eksperimentalnih preizkusov z rezultati simulacij, ki so izvedene z rekonstruiranimi numeričnimi modeli odprto-celičnih gradiv, omogoča neposredno validacijo uporabljenega načina numeričnega modeliranja, saj imajo preizkušanci in modeli enako geometrijo in topologijo.

Po validaciji numeričnega modeliranja z uporabo rekonstruiranih modelov odprto-celičnih gradiv je bila izvedena še primerjava med rezultati eksperimentalnih preizkusov in rezultati simulacij izvedenimi z diskretiziranimi Voronojevimi modeli. Kot osnova za Voronojevo delitev prostora je bil uporabljen neravnotežen model osnovan na Weaire-Phelanovih celicah. Pri tem je bila upoštevana stopnja neurejenosti  $a$ , ki je bila določena s pomočjo primerjave statistično določenih geometrijskih in topoloških lastnosti v poglavju 4.5. Tako validirani modeli so bili uporabljeni za parametrične simulacije vpliva hitrosti obremenjevanja na obnašanje aluminijevih odprto-celičnih gradiv.

## 6.1 Teoretične osnove eksplicitnih dinamičnih simulacij

Metoda eksplicitnih dinamičnih analiz se uporablja predvsem za simulacije nelinearnih dinamičnih problemov, ki jih opisuje parcialna diferencialna enačba dinamičnega ravnotežja. Reševanje te enačbe poteka s prevedbo v sistem navadnih diferencialnih enačb drugega reda [93], s pomočjo principa virtualnega dela in prostorske diskretizacije z metodo končnih elementov. V tako dobljen sistem enačb gibanja se doda še faktor dušenja, da se lahko upoštevajo vplivi globalnega dušenja ali da se zmanjšajo vplivi frekvenc višjih redov, ki so posledica diskretizacije dinamičnega problema. Ponavadi je uporabljeno dušenje v obliki viskozne dušenja (dušenje premo-sorazmerno s hitrostjo). Končno obliko enačbe dinamičnega ravnotežja podaja naslednja enačba:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{f}_{int} = \mathbf{f}_{ext}, \quad (6.1)$$

kjer je  $\mathbf{M}$  globalna masna matrika,  $\mathbf{C}$  globalna matrika viskozne dušenja,  $\mathbf{f}_{int}$  vektor notranjih in  $\mathbf{f}_{ext}$  vektor zunanjih sil.  $\ddot{\mathbf{x}}$  in  $\dot{\mathbf{x}}$  predstavljata vektor pospeškov oziroma vektor hitrosti v določenem časovnem intervalu.

Za popolno diskretizacijo dinamičnega problema je potrebno izvesti še neposredno časovno integracijo enačbe 6.1 za določitev odvisnosti vektorja pomikov od časa  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ , pri čemer mora biti ravnotežje sistema zagotovljeno v vsakem časovnem trenutku. V eksplicitnih dinamičnih analizah se za integracijo uporabljajo eksplicitne integracijske metode, največkrat metoda srednjih odstopkov (*angl.: central difference method*) [94]. Po izvedeni diagonalizaciji globalne masne matrike  $\mathbf{M}$  in matrike dušenja  $\mathbf{C}$  nastane iz sistema enačb za vsako posamezno prostostno stopnjo ločena algebrajska enačba, ki vsebuje le pomike, hitrosti in vztrajnostne sile pripadajoče prostostne stopnje. Zaradi ločenih enačb se lahko analiza ustavi v poljubnem časovnem koraku in se od tam tudi nadaljuje, kar omogoča enostavno poseganje v parametre simulacije tudi med njenim izvajanjem.

### 6.1.1 Stabilnost časovne integracije

Stabilnost eksplicitne numerične analize je odvisna od lastnih frekvenc, ki nastopajo v rešitvi, in od sistema enačb, ki ga je potrebno rešiti v enem časovnem koraku. Lastne frekvence sistema se določijo s pomočjo rešitve homogenega dela enačbe 6.1, iz katere lahko izpustimo tudi člen dušenja [95]. Izračunane lastne vrednosti tako dobljenega sistema ob upoštevanju pogojev za stabilnost rešitve dajo enačbo za velikost stabilnega časovnega koraka v obliki [95]:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega}, \quad (6.2)$$

kjer je  $\omega$  lastna frekvenca sistema. Razmerje med stabilnim časovnim korakom  $\Delta t$  in lastno frekvenco sistema  $\omega$  je obratno-sorazmerno. Za velikost časovnega koraka je torej merodajna najvišja lastna frekvenca, saj višja kot je lastna frekvenca, manjši je stabilen časovni korak. Izračun najvišje lastne frekvence sistema je odvisen od števila vozlišč (njihovih prostostnih stopenj) in gostote mreže končnih elementov. Posledično je od teh faktorjev odvisna tudi velikost stabilnega časovnega koraka. Za sistem z dušenjem se povezava med stabilnim časovnim korakom in lastno frekvenco sistema zapiše kot:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega} \left( \sqrt{1 + \zeta^2} - \zeta \right), \quad (6.3)$$

kjer je  $\zeta$  brezdimenzijski faktor dušenja. Prisotnost dušenja v sistemu torej zmanjša dolžino stabilnega časovnega koraka.

### 6.1.2 Izračun časovnega koraka

Metoda izračuna stabilnega časovnega koraka, opisana v prejšnjem poglavju, je računsko zelo zahtevna, posebej pri modelih z velikim številom končnih elementov. Geometrija analizirane konstrukcije se med analizo spreminja, zato se spreminja tudi njena najvišja lastna frekvenca. Spememba lastne frekvence pa pomeni, da se spremeni tudi dolžina stabilnega časovnega koraka. Zaradi tega je potrebno pri zgoraj predstavljeni metodi stabilni časovni korak izračunati za vsak korak analize posebej. To skupaj z dejstvom, da je metoda računsko zahtevna pomeni neekonomičnost te metode.

Dober približek za stabilni časovni korak je mogoče določiti tudi s podrobnejšo analizo posameznega končnega elementa v mreži [95]. Zapisati je potrebno gibalno enačbo za



končni element in izračunati lastne vrednosti dobljenega sistema ob upoštevanju pogojev za stabilnost rešitve. Najvišja lastna frekvenca končnega elementa tako znaša:

$$\omega = \frac{2c}{l_{min}}, \quad (6.4)$$

kjer je  $l_{min}$  najmanjša dimenzija končnega elementa in  $c$  predstavlja hitrost širjenja napetostnih valov po elementu. Hitrost širjenja napetostnih valov  $c$  je odvisna od elastičnega modula in gostote materiala elementa ter se izračuna kot  $c = \sqrt{E/\rho}$ . Enačba 6.4 za približek najvišje lastne frekvence se sedaj uporabi v enačbi 6.2 za izračun stabilnega časovnega koraka končnega elementa in sledi enačba za izračun zgornje meje časovnega koraka:

$$\Delta t \leq \frac{l_{min}}{c}. \quad (6.5)$$

Tudi za ravninske in volumske elemente se enačbe za izračun stabilnega časovnega koraka zapišejo v odvisnosti od lastnosti končnega elementa. Vendar pri teh tipih končnih elementov njihova karakteristična dolžina izhaja iz njihove površine (ravninski elementi) oziroma njihovega volumna (volumski elementi). Pri lupinskih ravninskih končnih elementih je njihova karakteristična dolžina določena s pomočjo dolžin njihovih robov, dolžin njihovih diagonal ali s pomočjo njihove površine, medtem ko je karakteristična dolžina pri volumskih heksagonalnih in prizmatičnih končnih elementih ponavadi izražena kot razmerje njihovega volumna in površine njihove največje mejne ploskve. Pri volumskih končnih elementih tetraedričnih oblik se za izračun karakteristične dolžine uporabi njihov najkrajši rob. Pri ravninskih in volumskih končnih elementih se pri izračunu hitrosti širjenja napetostnega vala upošteva še vpliv stisljivosti s Poissonovim številom  $\nu$ .

### 6.1.3 Vpliv deformacijske hitrosti na trdnostne lastnosti gradiv

Med procesom obremenjevanja gradivo zaradi svoje deformacije akumulira zunanje delo. Pri tem je količina absorbiranega dela odvisna od hitrosti deformacije. Za večino gradiv velja, da se s povišanjem deformacijske hitrosti višajo tudi trdnostne lastnosti gradiv. Vpliv deformacijske hitrosti je odvisen od lastnosti gradiva in temperature, pri čemer je vpliv temperature na trdnostne lastnosti gradiva obraten. Pod posebnimi pogoji je vpliv hitrosti lahko tako velik, da se začne gradivo obnašati, kot bi imelo lastnosti superplastičnosti, pri čemer so možne natezne deformacije tudi do 1000 % [96].

Deformacijska hitrost je definirana kot  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ , torej je odvisna od stopnje deformacije in časa, v katerem se deformacija izvrši. Njen vpliv na trdnostne lastnosti gradiv podaja več empiričnih konstitutivnih modelov, med katerimi se najpogosteje uporabljajo potenčni zakon, Cowper-Symodsov model in Johnson-Cookov model [47]. Za računalniške simulacije vpliva deformacijske hitrosti na trdnostne lastnosti neurejenih odprto-celičnih gradiv je bil uporabljen Cowper-Symodsov model, ki ga podaja enačba:

$$\sigma_y = \sigma_{y,sta} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right], \quad (6.6)$$

kjer je  $\sigma_y$  dinamična meja tečenja,  $\sigma_{y,sta}$  statična meja tečenja ter  $C$  in  $p$  predstavljata Cowper-Symodsova koeficienta za obravnavano gradivo. Cowper-Symodsove koeficiente za nekatera konstrukcijska gradiva podaja preglednica 6.1.

**Preglednica 6.1:** Vrednosti Cowper-Symodsovih koeficientov

Material	$C$ [ $s^{-1}$ ]	$p$
konstrukcijsko jeklo	40,4	5,0
aluminijeve zlitine	6500,0	4,0
nerjaveče jeklo (304)	120,0	9,0
$\alpha$ - Titan (Ti 50A)	100,0	10,0

#### 6.1.4 Kontakti

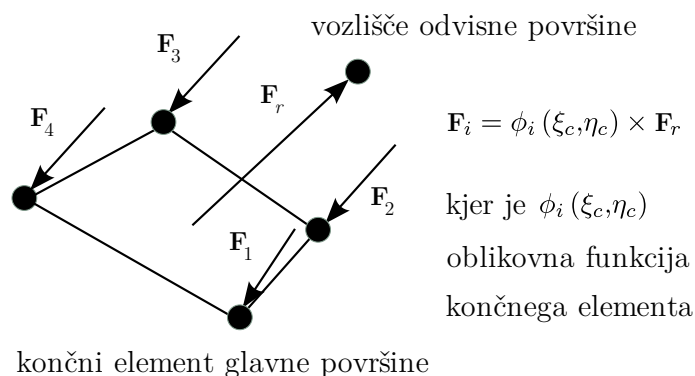
V mehaniki trdnin je kontakt med telesi zelo pogost pojav, saj je eden glavnih mehanizmov prenosa sile s telesa na telo. Kontakt je še posebej pogost pri udarnih obremenitvah, kjer nastopajo zelo velike deformacije ob velikih deformacijskih hitrostih. Začetki proučevanja kontaktov segajo do da Vincija, Coloumba in kasneje Hertza. Sila trenja, ki deluje v nasprotni smeri drsenja telesa, se v najenostavnejši obliki zapiše s Coloumbovim zakonom:

$$|\mathbf{F}_t| = \mu |\mathbf{F}_n|, \quad (6.7)$$

kjer je  $\mathbf{F}_t$  vektor sile trenja,  $\mathbf{F}_n$  normalna komponenta vektorja kontaktne sile in  $\mu$  koeficient trenja [130]. Zaradi kompleksnosti problema je kontakt še vedno predmet mnogih teoretičnih in eksperimentalnih študij. Pri določevanju in opazovanju kontakta se pri eksperimentu pojavljajo problemi, saj je mesto kontakta zakrito s telesoma v kontaktu.

Tako se lahko vrednotijo le posledice kontakta. K mehaniki kontakta bistveno vplivajo tudi vrsta gradiva, oblika in hrapavost površin ter vrsta obremenitve. Zaradi opisanega je v numeričnih modelih nujno potrebno upoštevati določene poenostavitve. Vrste kontaktov se razlikujejo po vplivih, ki so oziroma niso prisotni pri kontaktu: vpliv trenja, mazanja in kotaljenja, upoštevanje ločevanja, vpliv vrste in smeri obremenitve, vpliv oblike in hrapavosti kontaktnih površin ter vpliv elastičnosti kontakta [97].

Najpomembnejši del reševanja kontaktnih problemov v računalniških simulacijah je zadovoljivo modeliranje samega kontakta, s čimer je v računalniški model vpeljana dodatna nelinearnost - robna nelinearnost. Kontaktni algoritmi v večini primerov zahtevajo delitev površin v kontaktu na odvisne površine (*angl.: slave*) in glave površine (*angl.: master*). Pri odvisnih površinah v kontaktu sodelujejo njihova vozlišča, medtem ko pri glavnih površinah sodelujejo njihovi elementi. V primeru, da računalniški algoritem zazna možnost kontakta v numeričnem modelu, je potrebno uporabiti kontaktne modele, ki preprečujejo prodiranje in hkrati prenašajo obremenitve z enega telesa na drugo telo. Najpogostejša modela za reševanje kontaktov sta metoda kinematičnih omejitev in metoda penetracije, ko je vsaj eno vozlišče odvisnega telesa v notranjosti glavnega telesa. Ne glede na model, po katerem se izračunajo kontaktne sile, se le-te priredijo vozliščem odvisne površine in elementom glavne površine v nasprotujočih si smereh. Sila, ki se priredi vsakemu vozlišču končnega elementa, se izračuna iz reakcijske sile s pomočjo oblikovne funkcije končnega elementa, glede na mesto kontakta na njem (slika 6.1).

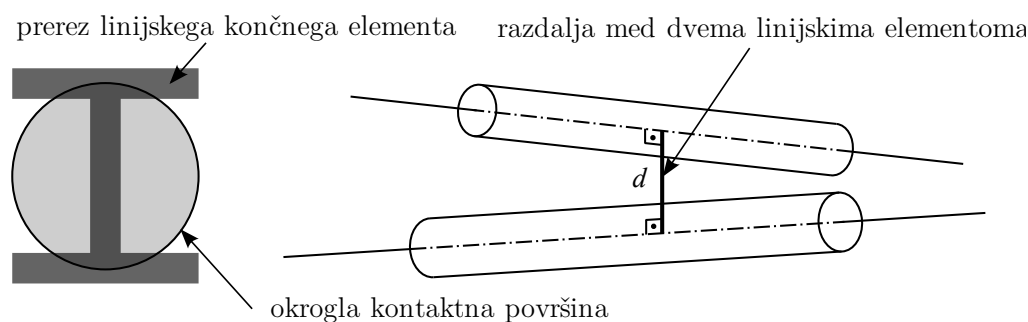


**Slika 6.1:** Porazdelitev vektorja kontaktne reakcijske sile vozlišča odvisne površine  $\mathbf{F}_r$  na vsa štiri vozlišča končnega elementa glavne površine

Metoda kinematičnih omejitev vpelje dodatno omejitev med odvisne in glavne površine, s katero prepreči preveliko zblizanje oziroma penetracijo površin med seboj. Metoda ves čas sledi najbližjim delom odvisne in glavne površine tako, da spremlja njihovo medsebojno razdaljo. Kontakt se pojavi, ko ta razdalja pade pod določeno mejno vrednost. Če je pri tem že prišlo do penetracije (velike relativne hitrosti), se metoda vrne v prejšnji korak analize, zmanjša časovni korak in ponovi postopek [95]. Glede na relativne hitro-

sti in vztrajnosti vozlišč ter elementov v kontaktu se nato izračunajo sile, ki preprečijo penetracijo.

Kazenska metoda (*angl.: penalty method*) za razliko od metode kinematičnih omejitev ni iterativna. Reakcijske sile ta metoda določi s pomočjo stopnje penetracije in s pomočjo ocene togosti materiala v kontaktu, ki izhaja iz materialnih lastnosti vozlišč in elementov v kontaktu. Večja kot je stopnja penetracije in večji kot je modul elastičnosti materialov v kontaktu, večja je reakcijska sila.



**Slika 6.2:** Kontaktna površina linijskega končnega elementa s prerezom v obliki I profila (levo) in najkrajša razdalja med dvema linijskima končnima elementoma  $d$  (desno)

Pri medsebojnem kontaktu linijskih elementov je kot kontaktna površina v veliki večini primerov izbran valj, ne glede na dejansko obliko prereza linijskega nosilca (slika 6.2 levo). Premer valja kontaktne površine je enak kvadratnemu korenu površine najmanjšega kvadra, ki je očrtan prerezu linijskega končnega elementa. Razlog je poenostavitev in večja hitrost kontaktnega algoritma, saj ni potrebno slediti spremembam orientacije prereza linijskega elementa med simulacijo. Kontakt je določen z iskanjem najkrajše razdalje med sosednjimi linijskimi elementi. Ko je najkrajša razdalja poznana, je potrebno preveriti, ali se prekrivajo kontaktne površine izbranih linijskih elementov (slika 6.2 desno). V primeru, da se kontaktni površini dveh linijskih elementov prekrivata, se izračuna kontaktna sila. Mesto delovanja kontaktne sile sta točki na linijskih elementih, ki določata najkrajšo razdaljo med njima in se izračunata z rešitvijo sistema dveh linearnih vektorskih enačb [98].

## 6.2 Računalniški model neurejenega odprto-celičnega gradiva

Za vrednotenje rezultatov numeričnih simulacij so bili najprej opravljene tlačni eksperimentalni preizkusi odprto-celičnih aluminijevih pen, opisanih v poglavju 3. Za lažjo in čim bolj neposredno primerjavo eksperimentalnih rezultatov z rezultati numeričnih modelov neurejenega odprto-celičnega gradiva so bili enakih zunanjih oblik in na enak način izdelani in obremenjeni tudi numerični modeli eksperimentalno preizkušanih vzorcev

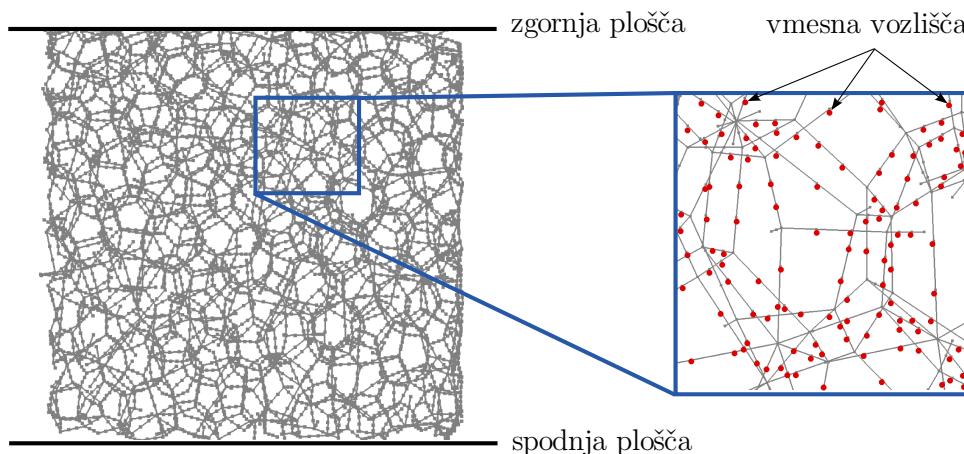
odprto-celičnih gradiv. Tako so imeli vsi računalniški modeli, analizirani v nadaljevanju, zunanjo obliko kocke z dolžino roba  $L$ .

Pri pripravi modela neurejenega odprto-celičnega gradiva z uporabo Voronojeve delitve prostora pride do nastanka zelo kratkih robov celic na mestih njihovih stičišč. Ti robovi so posledica geometrijske delitve prostora osnovane na naključno izbranih začetnih točkah Voronojeve delitve in so krajši tudi od svoje debeline pri določeni relativni gostoti. Tako kratkih robov v strukturi realne pene ni, saj bi se že med njeno proizvodnjo zlili s stičišči robov, zato so bili iz modela odstranjeni s pomočjo metode glajenja mreže. Stopnja glajenja je bila določena s pomočjo parametričnih simulacij, opisanih v poglavju 6.2.2.

V poglavju 4 je bil opisan postopek priprave Voronojevih modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv, kjer je za končno obliko modela potrebno podati reprezentativno velikost celice  $d_c$ , parameter neurejenosti  $a$  in obliko ter velikost končnega modela pene. Za izvedbo numeričnih simulacij je bilo tako najprej potrebno izbrati ustrezno velikost modela celičnega gradiva, ki je bila določena glede na število plasti celic v modelu  $N_c = L/d_c$  (poglavje 6.2.3). Veliko število plasti celic v modelu  $N_c$  namreč pomeni daljše računske čase simulacij, medtem ko se pri prenizkem številu celic pojavi velik vpliv odrezanih mejnih celic na nosilnost celotnega modela.

Voronojevi rešetkasti modeli vsebujejo informacije o položajih stičiščnih točk in njihovih medsebojnih povezavah, katere predstavljajo robove celic rešetkastih modelov. Na osnovi teh informacij je iz rešetkastega modela zgrajen numerični model neurejenega odprto-celičnega gradiva tako, da so robovi Voronojevih celic modelirani s pomočjo enega ali več linijskih končnih elementov (slika 6.3). Potrebno število končnih elementov po dolžini roba celice je bilo določeno s pomočjo parametričnih simulacij, katerih rezultati so podani v poglavju 6.2.4. V stičiščih robov celic so bila vozlišča linijskih končnih elementov združena v eno samo vozlišče tako, da se preko njih prenaša vseh šest prostostnih stopenj [91].

Simulacije so bile izvedene s pomočjo programskega paketa LS-DYNA, ki vsebuje devet različnih tipov Euler-Bernoullijevih linijskih končnih elementov, medtem ko Timoshenkovi linijskih elementov ni na voljo [99]. Med temi elementi je bil za uporabo v modelu neurejenega odprto-celičnega gradiva izbran linijski končni element Hughes-Liu [100], zaradi njegove učinkovitosti in možnosti njegove uporabe v kontaktu med linijskimi elementi. Sama formulacija tega končnega elementa omogoča poljubno izbiro oblike prereza končnega elementa, kljub temu pa za obliko prereza ni bila izbrana značilna oblika prereza robov celic odprto-celičnih gradiv (trikotnik s konkavnimi stranicami). Narejena je bila namreč poenostavitev geometrije prereza, in sicer je bila za obliko prereza izbrana oblika kroga. Razlog za poenostavitev je pomanjkanje podatkov o natančni obliki, orientaciji in velikosti dejanskega prereza robov celic. Te podatke bi bilo mogoče dobiti z analizo posnetega 3D modela realnega celičnega gradiva, vendar bi bilo potrebno za zajem 3D slike uporabiti zelo visoko ločljivost, ki jo dosegajo le mikro-tomografi.



**Slika 6.3:** Računalniški model neurejenega odprto-celičnega gradiva, kjer je na desni strani prikazan povečan izrez mreže linijskih končnih elementov s poudarjenimi vmesnimi vozlišči vzdolž robov celic

Velikost prereзов linijskih končnih elementov je bila enaka za vse robove celic odprto-celičnega gradiva. Določena je bila s pomočjo njihovega polmera  $r_b$ , ki je bil izračunan iz izbrane relativne gostote modeliranega celičnega gradiva  $\rho_r$ , skupne dolžine vseh linijskih končnih elementov modela  $l_{tot}$  in prostornine zunanje kocke modela  $V = L^3$ , po enačbi:

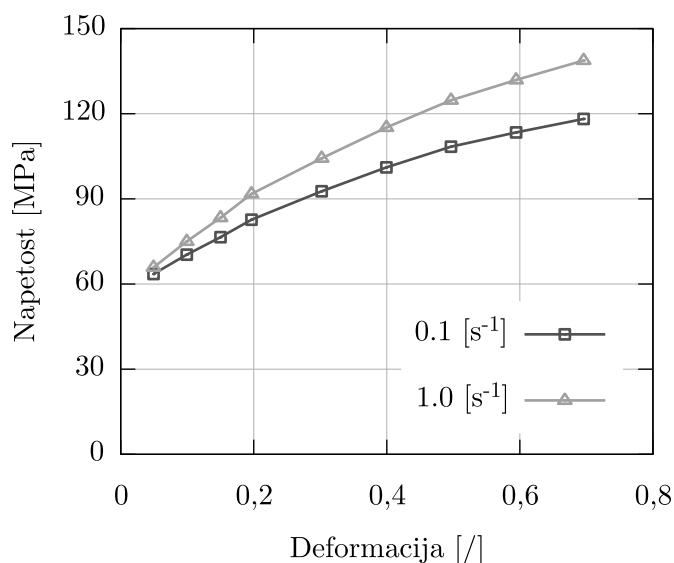
$$r_b = \sqrt{\frac{\rho_r V}{l_{tot} \pi}}. \quad (6.8)$$

Tlačno obremenjevanje modelov neurejenega odprto-celičnega gradiva v simulacijah je bilo izvedeno s pomočjo dveh dodatnih plošč (slika 6.3), ki sta bili modelirani s togimi ploščinskimi elementi. Prva plošča je bila postavljena pod model celičnega gradiva za podporo in je bila nepomično vpeta v vseh smereh. Druga plošča, ki je bila uporabljena za obremenjevanje, je bila postavljena nad model celičnega gradiva in nepomično vpeta v smereh prečno na smer obremenjevanja. Med ploščama in modelom celičnega gradiva je bil uporabljen kontakt z enakim statičnim in dinamičnim koeficientom trenja  $\mu_{je,al} = 0,35$  [85], medtem ko je bil med linijskimi elementi celičnega gradiva uporabljen kontakt z enotnim koeficientom trenja  $\mu_{al} = 1,0$  [85].

Obe plošči sta bili v simulacijah uporabljeni tudi kot merilni telesi. In sicer so bile na podporni plošči merjene reakcijske sile, na plošči za obremenjevanje pa so bili merjeni pomiki. S pomočjo skupne reakcijske sile v podporni plošči  $F_{tot}$  in površine začetnega preseka preizkušanca  $A_0$  so bile izračunane inženirske napetosti  $\sigma_e = F_{tot}/A_0$ , medtem ko so bile inženirske deformacije  $\varepsilon_e$  izračunane s pomočjo pomikov obremenitvene plošče  $s$  in začetne višine preizkušanca  $h_0$  kot  $\varepsilon_e = s/h_0$ .

Lastnosti osnovnega materiala modelov neurejenega odprto-celičnega gradiva so bile zaradi možnosti primerjave rezultatov simulacij z rezultati eksperimentov izbrane na podlagi osnovnega materiala eksperimentalno preizkušenih vzorcev, ki so bili narejeni iz aluminija EN AW-1070. Mehanske lastnosti aluminija EN AW-1070 so praktično enake lastnostim aluminija EN AW-1050, ki vsebuje vsaj 99,5 % čistega aluminija, saj gre v obeh primerih za tako imenovano skupino aluminijev srednje čistosti [101]. Vendar je slednji v industriji bolj razširjen in zato obstaja o njegovih mehanskih lastnostih tudi več natančnejših podatkov. Tako so Berski et al. [102] eksperimentalno izmerili lastnosti aluminija EN AW-1050 pri deformacijskih hitrostih  $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$  in  $1,0 \text{ s}^{-1}$  in osmih različnih temperaturah s pomočjo tlačnega preizkusa. Izmerjeno odvisnost mehanskih lastnosti aluminija od obeh deformacijskih hitrosti pri  $20^\circ\text{C}$  prikazuje slika 6.4. Na podlagi teh podatkov je bil za model osnovnega materiala razvitih numeričnih modelov izbran Cowper-Symondsov konstitutivni model (enačba 6.6) z bilinearno elasto-plastično karakteristiko. Modul elastičnosti je znašal  $E = 70 \text{ MPa}$ , meja tečenja  $\sigma_y = 59 \text{ MPa}$  in tangentni modul  $E_t = 84 \text{ MPa}$ , medtem ko sta bila Cowper-Symondsova koeficienta za aluminij izbrana iz preglednice 6.1. Za gostoto aluminija je bila uporabljena vrednost  $\rho_{al} = 2700 \text{ kg/m}^3$ .

Vendar je bil Cowper-Symondsov konstitutivni model uporabljen le v dinamičnih simulacijah, medtem ko je bil v kvazi-statičnih simulacijah uporabljen od deformacijske hitrosti neodvisen materialni model z enakimi materialnimi lastnostmi. Zaradi poenostavitve so bile kot kvazi-statične simulacije izvedene parametrične simulacije, namenjene določitvi ustreznih parametrov razvitega numeričnega modela (poglavja od 6.2.2 do 6.2.4).



**Slika 6.4:** Odvisnost napetosti tlačnega preizkusa aluminija EN AW-1050 od deformacije; prikazani sta odvisnosti napetosti pri deformacijski hitrosti  $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$  in  $1,0 \text{ s}^{-1}$  ter temperaturi  $20^\circ\text{C}$  [102]

Za izvedbo simulacij je bila uporabljena računalniška gruča, sestavljena iz 20 osebnih računalnikov s procesorji Intel Pentium IV 3.2 GHz. Vsak računalnik je imel na razpolago 1 GB lastnega pomnilnika, 120 GB diskovnega prostora in 1 Gb mrežno povezavo. Gručo je poganjal operacijski sistem Linux, simulacije pa so bile izvajane paralelno (angl.: *Massive parallel processing*) s programskim paketom LS DYNA MPP verzije 971 [92].

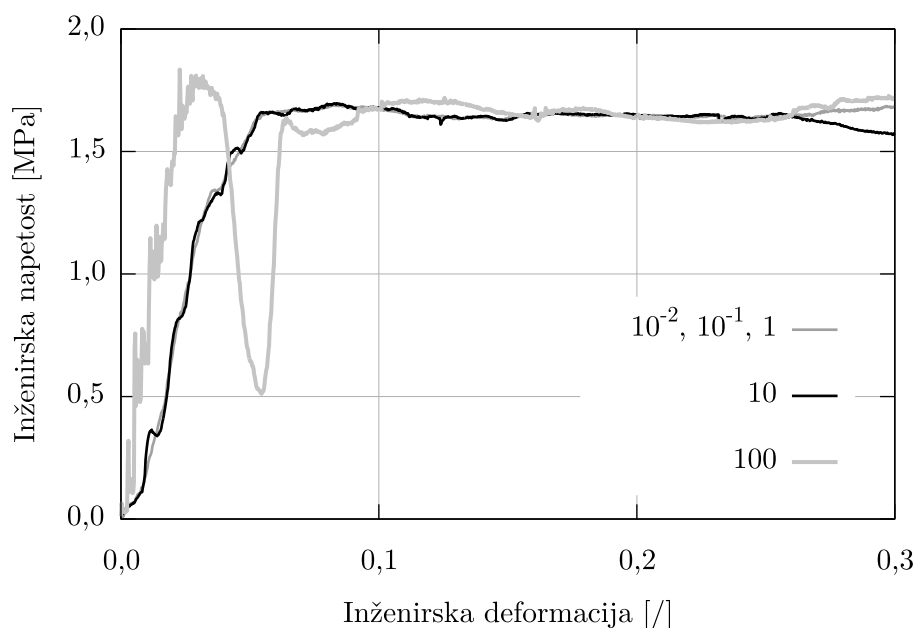
### 6.2.1 Hitrost obremenjevanja v kvazi-statičnih simulacijah

Pred izvedbo parametričnih simulacij je bilo potrebno določiti hitrost obremenjevanja v kvazi-statičnih simulacijah. Zaradi uporabljene eksplicitne integracijske sheme ima namreč hitrost obremenjevanja velik vpliv na čas trajanja simulacij. Višja kot je hitrost obremenjevanja, krajši je čas potreben za izvedbo simulacije, saj je dolžina stabilnega časovnega koraka neodvisna od hitrosti obremenjevanja. Zaradi tega je za izvajanje kvazi-statičnih simulacij z eksplicitno integracijsko shemo potrebno uporabiti postopek dinamične relaksacije [103]. Za razliko od klasičnega postopka dinamične relaksacije (povečanje gostote in dušenja), je bil uporabljen postopek določitve tiste najvišje hitrosti obremenjevanja, katere vpliv je na obnašanje modela odprto-celičnega gradiva (zaradi visoke deformacijske hitrosti) še zanemarljiv.

Zaradi vpliva velikosti modela na najvišjo še sprejemljivo hitrost obremenjevanja je bila le-ta preračunana v inženirsko deformacijsko hitrost (enačba 5.1), določena pa je bila na podlagi simulacij z različnimi hitrostmi obremenjevanja. Uporabljene so bile inženirske deformacijske hitrosti od  $\dot{\epsilon}_e = 0,01 \text{ s}^{-1}$  do  $100 \text{ s}^{-1}$  z enakim eksponentnim korakom na simulacijah istega vzorca Weaire-Phelanovih modelov z relativno gostoto  $\rho_r = 12 \%$  in stopnjo neurejenosti  $a = 0,2$ . Cowper-Symondsov model je bil zaradi simuliranja kvazi-statičnih razmer zamenjan za materialni model, ki je neodvisen od deformacijske hitrosti. Zaradi časa izvedbe simulacij so bile le-te izvedene do inženirske deformacije modela  $\epsilon_e = 30 \%$ .

Rezultati simulacij so prikazani na sliki 6.5 v obliki odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije. Izkazalo se je, da odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije popolnoma sovpadajo do inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e = 1 \text{ s}^{-1}$  in se razlike pokažejo šele pri višjih hitrostih obremenjevanja. Vzrok za takšno obnašanje je neodvisnost konstitutivnega modela osnovnega materiala, uporabljenega za kvazi-statične simulacije, od deformacijske hitrosti. Tako ostane masa (vztrajnost) modela odprto-celičnega gradiva edini dejavnik, ki vpliva na njegovo togost. Vendar je masa odprto-celičnih gradiv zelo nizka (to je ena od prednosti celičnih gradiv), zato je njen vpliv na obnašanje modela pod tlačnimi obremenitvami neopazen do inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e = 10 \text{ s}^{-1}$ . Zaradi tega je bila za vse simulacije kvazi-statičnega obremenjevanja izbrana inženirska deformacijska hitrost  $\dot{\epsilon}_e = 1 \text{ s}^{-1}$ .





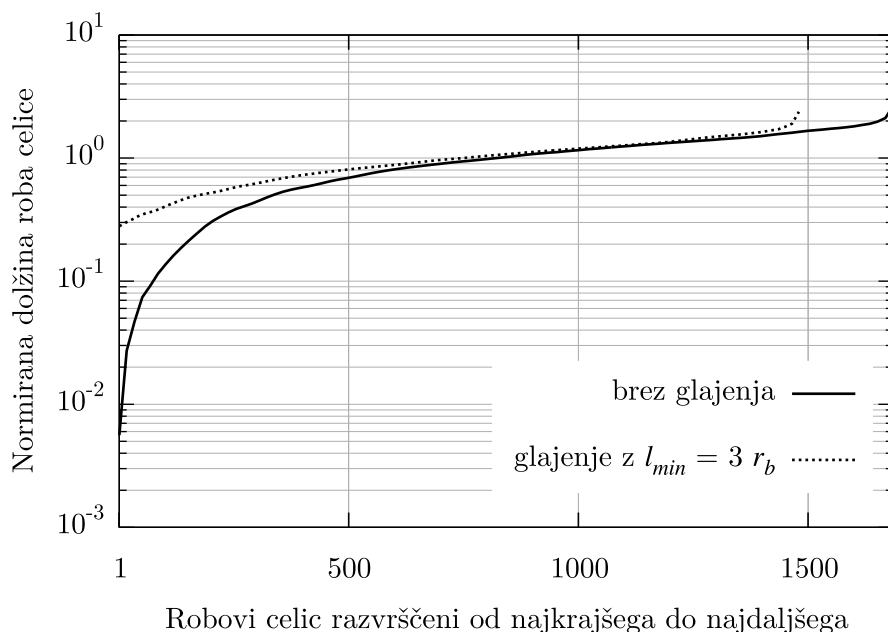
**Slika 6.5:** Odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije za različne inženirske deformacijske hitrosti; najnižje tri inženirske deformacijske hitrosti zaradi popolnega ujemanja prikazuje le ena krivulja

### 6.2.2 Glajenje mreže

Pred določitvijo potrebnega števila plasti celic in določitvijo delitve robov celic na več končnih elementov je bilo izvedeno glajenje rešetkastega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva, saj ima le-to največji vpliv na čas izvajanja simulacij. V rešetkastem modelu odprto-celičnega gradiva pripravljenim brez glajenja so namreč prisotni robovi celic, ki so nekaj velikostnih stopenj krajši od povprečja (slika 6.6). Zaradi tako kratkih robov celic so kratki tudi končni elementi uporabljeni za njihovo diskretizacijo, kar močno zniža dolžino stabilnega časovnega koraka (enačba 6.5) in podaljša čas izvajanja eksplicitne numerične simulacije.

Glajenje mreže je bilo izvedeno pred diskretizacijo modela odprto-celičnega gradiva tako, da so bili iz modela odstranjeni vsi robovi celic, katerih dolžina je bila krajša od predhodno izbrane mejne dolžine roba celice  $l_{min}$ . Po odstranitvi kratkega roba iz modela sta bili njegovi stičišči združeni v eno samo stičišče s položajem na sredini odstranjenega roba. Podvojeni robovi celic med istima vozliščema, ki se pojavijo kot posledica združevanja stičišč robov, so bili iz modela odstranjeni.

Ustrezna vrednost mejne dolžine roba celice  $l_{min}$  je bila določena s pomočjo parametričnih simulacij obnašanja modelov neurejenega odprto-celičnega gradiva pod vplivom tlačnih obremenitev. Zaradi fizikalne povezave med velikostjo preseka in dolžino najkrajšega roba celice v realni peni, je bila mejna dolžina roba celice  $l_{min}$  izražena kot večkratnik polmera krožnega preseka roba  $r_b$ , določenega po enačbi 6.8. Tako je bil analiziran vpliv mejnih



**Slika 6.6:** Potek s povprečno vrednostjo normiranih dolžin robov modela neurejenega odprto-celičnega gradiva; razvidna je prisotnost več velikostnih razredov krajših robov pri modelu brez glajenja

dolžin roba celice od  $l_{min} = 0 r_b$  do  $5 r_b$  na dveh skupinah vzorcev Weaire-Phelanovih modelov z relativnima gostotama  $\rho_r = 5,0 \%$  in  $12,0 \%$  ter enako stopnjo neurejenosti  $a = 0,2$ .

Zaradi uporabe naključnosti pri pripravi modelov je bilo za vsako mejno dolžino roba celice  $l_{min}$  pripravljenih in analiziranih 20 numeričnih modelov odprto-celične pene. Po končnih simulacijah je bila najprej za vsak model posebej izračunana odvisnost inženirskih napetosti od inženirske deformacije, nato pa še povprečna odvisnost za vseh 20 analiziranih modelov. Iz povprečnih odvisnosti je bila za primerjavo med modeli izračunana še gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50} \%$  (enačba 5.4).

Primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela je podana v preglednici 6.2. Iz preglednice je razvidno, da s povečevanjem mejne dolžine roba celice padata tako čas simulacije kot tudi gostota absorbiranega dela. Ta pada, saj kratki linijski končni elementi, ki jih pri višjih vrednostih mejne dolžine roba celice ni, predstavljajo dodatno togost v modelu odprto-celičnega gradiva. Opazna je tudi višja gostota z deformacijo absorbiranega dela pri skupini modelov z višjo relativno gostoto.

Primerjava rezultatov med skupinama modelov z različno relativno gostoto pokaže, da sta si odvisnosti relativne vrednosti gostote absorbiranega dela in časa simulacije od mejne dolžine roba celice zelo podobni. Vendar podobni nista le odvisnosti, ampak tudi same relativne vrednosti. Na podlagi teh ugotovitev zadostuje izbira le ene mejne dolžine roba celice za vse vrednosti relativne gostote med 5 in 12 %. Glede na relativno nizko odsto-

**Preglednica 6.2:** Primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  in časa potrebnega za izvedbo simulacije  $t_s$  v odvisnosti od relativne gostote  $\rho_r$  in mejne dolžine roba celice  $l_{min}$

$\rho_r$ [%]	$l_{min}$ [ $r_b$ ]	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$\Delta U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$\Delta U_{50\%}$ [%]	$t_s$ [h]	$t_s$ [%]
5,0	0	993,02	0,00	0,00	421	100,00
	1	975,05	17,97	1,81	84	19,95
	2	971,67	21,35	2,15	18	4,28
	3	955,68	37,34	3,76	8	1,90
	4	931,55	61,47	6,19	6	1,43
	5	871,87	121,15	12,20	5	1,19
12,0	0	1754,93	0,00	0,00	415	100,00
	1	1717,55	37,38	2,13	79	19,04
	2	1690,88	64,05	3,65	22	5,30
	3	1669,11	85,82	4,89	14	3,37
	4	1611,90	143,03	8,15	10	2,41
	5	1519,59	235,34	13,41	6	1,45

panje rezultatov ( $\Delta U_{50\%} = 3,76$  oziroma  $4,89$  %) ob močno skrajšanem času simulacije ( $t_s = 1,90$  oziroma  $3,37$  %) je bila za vse nadaljnje simulacije izbrana mejna dolžina roba celice  $l_{min} = 3 r_b$ .

Razporeditev dolžin robov celic enega od rešetkastih modelov brez in z uporabo glajenja z izbrano mejno dolžino roba celice  $l_{min} = 3 r_b$  prikazuje slika 6.6. Robovi celic so bili razvrščeni po velikosti, njihove dolžine pa normirane s povprečno dolžino vseh robov v modelu (tako vrednost  $10^0$  predstavlja povprečno dolžino vseh robov modela). Iz slike je razvidno zelo podobno odstopanje od povprečne vrednosti daljših robov celic pri obeh modelih. Večja razlika je opazna pri robovih krajših od povprečja, kjer najkrajši rob modela brez glajenja od povprečja odstopa kar za 2.5 velikostni stopnji, medtem ko je odstopanje pri glajenem modelu podobno odstopanju od povprečja daljših robov. Opazno je tudi manjše skupno število robov pri glajenem modelu, zaradi 191 robov krajših od izbrane mejne dolžine roba celice, ki so bili iz modela odstranjeni.

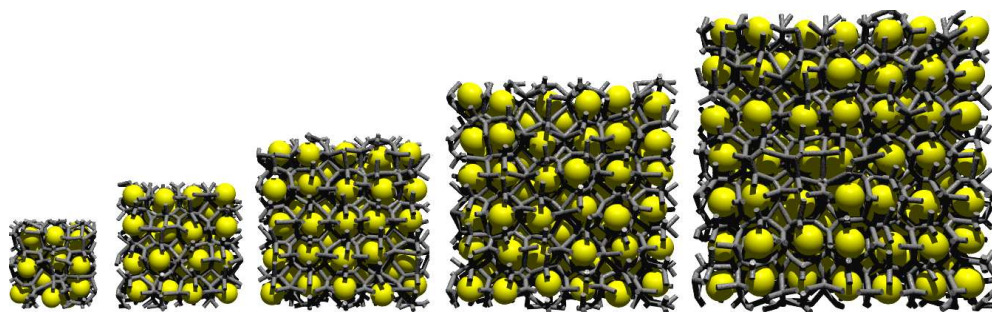
### 6.2.3 Potrebno število plasti celic v modelu

Najmanjše potrebno število plasti celic v modelu neurejenega odprto-celičnega gradiva je bilo izbrano na osnovi vpliva odrezanih mejnih celic na mehanske lastnosti celotnega gradiva. Vpliv je bil določen s pomočjo parametričnih numeričnih simulacij obnašanja

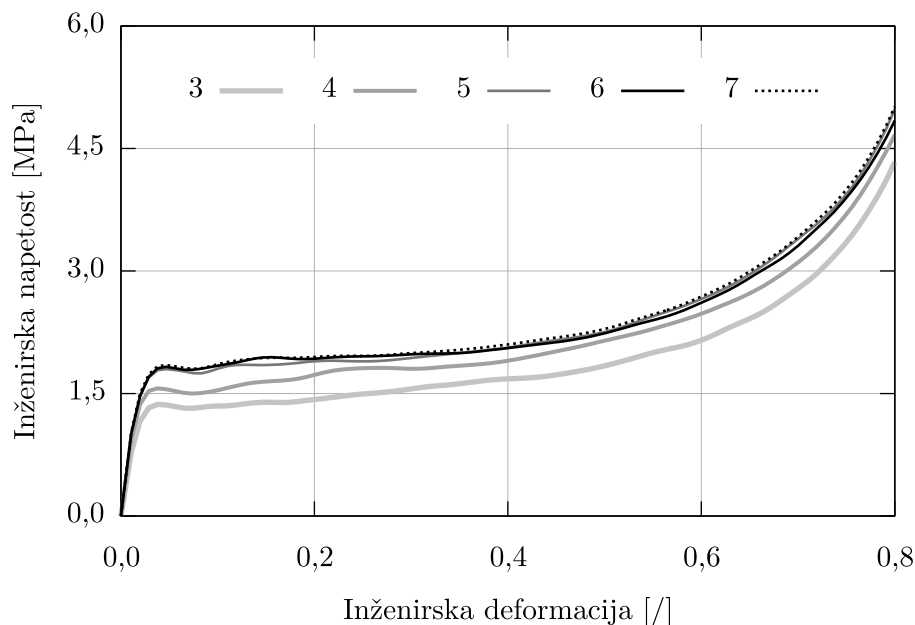
modelov odprto-celičnega gradiva pod vplivom tlačnih obremenitev. Analiziranih je bilo pet različnih modelov, katerih število plasti celic je znašalo od  $N_c = 3$  do 7 (slika 6.7). Modeli so bili pripravljene na osnovi Weaire-Phelanovega modela s stopnjo neurejenosti  $a = 0,25$  in relativno gostoto  $\rho_r = 5,00$  %. Zaradi uporabe naključnosti pri pripravi modelov je bilo za izračun povprečnih rezultatov uporabljenih 20 numeričnih modelov odprto-celične pene za vsako izbrano število plasti celic  $N_c$ .

Slika 6.8 prikazuje odvisnost povprečnih inženirskih napetosti od inženirskih deformacij za modele z različnim številom plasti celic. Iz slike je razvidno, da se z večanjem števila plasti celic v modelu pričakovano povečuje tudi nosilnost neurejenega odprto-celičnega gradiva. Vzrok je v deležu odrezanih robnih celic v modelu, katere imajo zaradi svoje nepovezane strukture močno zmanjšano nosilnost. Pri manjšem številu plasti celic v modelu je namreč delež odrezanih robnih celic največji, z naraščanjem števila plasti celic v modelu pa delež odrezanih celic pada, s čimer se nosilnost modela povečuje. Iz slike je razvidno predvsem večje odstopanje inženirske napetosti pri modelih s tremi in štirimi plastmi celic, medtem ko inženirske napetosti pri modelih preostalih velikosti sovpadajo.

Primerjavo med modeli različnih velikosti natančneje podaja preglednica 6.3. Za primerjavo je bila uporabljena vrednost gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  oziroma njena razlika  $\Delta U_{50\%}$  v primerjavi z največjim analiziranim modelom s sedmimi plastmi celic. Na izbiro ustreznega števila plasti celic v modelu ne vpliva le kvaliteta rezultatov simulacije, ampak tudi čas, potreben za njeno izvedbo  $t_s$ . Zaradi tega so v preglednici 6.3 za primerjavo podane tudi absolutne in relativne vrednosti časa, potrebnega za izvedbo simulacij na enem računalniku iz opisane gruče. Primerjava relativnih vrednosti pokaže, da je najugodnejša izbira števila plasti celic  $N_c = 5$ , saj ima ob relativno nizkem odstopanju rezultatov  $\Delta U_{50\%} = 2,56$  % kar sedemkrat krajši čas izvajanja simulacije v primerjavi z največjim analiziranim modelom. Tako so bili za vse nadaljnje simulacije uporabljeni modeli velikosti  $5 \times 5 \times 5$  celic.



**Slika 6.7:** Računalniški modeli neurejenega odprto-celičnega gradiva uporabljeni za določitev potrebnega števila plasti celic v modelu v velikosti od  $3 \times 3 \times 3$  celice do velikosti  $7 \times 7 \times 7$  celic



**Slika 6.8:** Povprečne odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije za simulacije z velikostjo modelov od  $3 \times 3 \times 3$  celice do velikosti  $7 \times 7 \times 7$  celic

**Preglednica 6.3:** Primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  in časa potrebnega za izvedbo simulacije  $t_s$  v odvisnosti od uporabljenega števila plasti celic  $N_c$  v modelu

$N_c$	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$\Delta U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$\Delta U_{50\%}$ [%]	$t_s$ [h]	$t_s$ [%]
3	746,81	231,21	23,64	1,78	0,96
4	871,53	106,49	10,89	10,05	5,43
5	952,95	25,07	2,56	27,57	14,91
6	964,72	13,30	1,36	66,91	36,17
7	978,02	0,00	0,00	185,01	100,00

#### 6.2.4 Potrebno število linijskih končnih elementov po dolžini roba celice

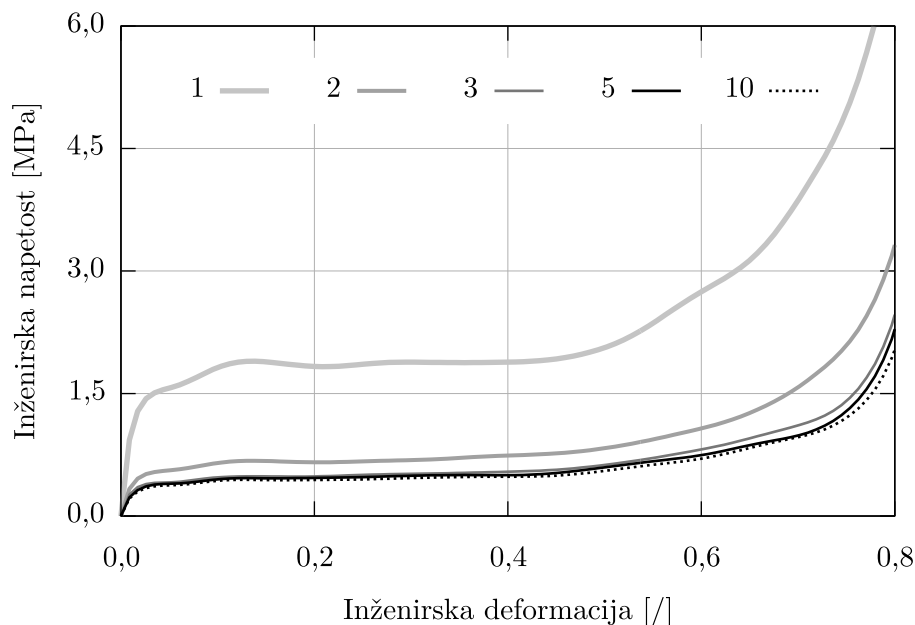
Zaradi omejenosti pri izbiri ustreznega tipa linijskih končnih elementov za diskretizacijo računalniškega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva, je bilo potrebno robove celic deliti na več končnih elementov. En sam linijski končni element namreč ne more opisati kompleksnega upogiba robov celic, ki predstavljajo najpomembnejši mehanizem deformiranja odprto-celičnega gradiva. Izbira potrebnega števila linijskih končnih elementov po dolžini roba celice predstavlja, podobno kot izbira potrebnega števila plasti celic, kompromis med natančnostjo rezultatov in računskim časom simulacije.

Ustrezna delitev je bila izbrana na podlagi parametričnih numeričnih simulacij obnašanja modelov odrto-celičnega gradiva pod vplivom tlačnih obremenitev. V analizah je bilo uporabljenih 5 različnih stopenj delitev roba celice  $N_{ke}$ , in sicer delitev na 1, 2, 3, 5 in 10 linijskih končnih elementov. Modeli so bili pripravljene na osnovi Weaire-Phelanovega modela s stopnjo neurejenosti  $a = 0,30$  in relativno gostoto  $\rho_r = 5,00$  %. Zaradi uporabe naključnosti pri pripravi modelov je bilo, podobno kot v poglavju 6.2.3, za izračun povprečnih rezultatov uporabljenih 20 numeričnih modelov za vsako stopnjo delitve roba celice.

Vendar v delitev niso bili vključeni vsi robovi celic v modelu, ampak so bili deljeni le dovolj dolgi robovi. Vzrok je v dolžini stabilnega časovnega koraka, ki je neposredno odvisna od dolžine najkrajšega linijskega končnega elementa v modelu (enačba 6.5) in obratno-sorazmerno vpliva na čas izvajanja simulacije. Tako bi delitev vseh robov celic zmanjšala dolžino stabilnega časovnega koraka in posledično povečala čas izvedbe simulacije. Zaradi tega so bili deljeni le tisti robovi celic, katerih končni elementi po delitvi niso krajši od najkrajšega nedeljenega roba celice. S tem je bil časovni korak tako pripravljenega modela enak kot v primeru, kjer vsak rob celice predstavlja en končen element. Delno je tak način delitve robov celic skladen tudi z mehanizmom njihove deformacije. Krajši robovi celic imajo namreč enostavnejšo obliko deformacije kot daljši robovi, zato za njen opis zadostuje tudi manjše število končnih elementov.

Slika 6.9 prikazuje odvisnost povprečnih inženirskih napetosti od inženirskih deformacij za modele z različno deljenimi robovi celic. Iz slike je razvidno, da z večanjem števila končnih elementov po dolžini roba celice nosilnost modela pada. Pri enaki inženirski deformaciji so namreč inženirske napetosti pri modelih z višjo stopnjo delitve robov nižje. Vzrok je neustrezno visoka nosilnost modelov z manjšo stopnjo delitve robov, predvsem modelov z delitvijo robov na enega oziroma dva končna elementa. Pri teh modelih uporabljeno število končnih elementov ne zadostuje za opis deformiranja robov neurejenega odrto-celičnega gradiva. Eden oziroma dva končna elementa namreč ne moreta opisati večkratne upogibne deformacije robov med tlačno deformacijo celotnega modela. Glavni mehanizem deformiranja celične strukture v takšnih modelih tako ni zajet, zaradi česar imajo takšni modeli višjo togost od modelov s tremi in več elementi po dolžini roba celice.

Primerjavo med modeli z različno stopnjo deljenosti robov celic natančneje podaja preglednica 6.4. Za primerjavo je bila uporabljena vrednost gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  oziroma njena razlika  $\Delta U_{50\%}$  v primerjavi z modelom, katerega robovi so bili deljeni na 10 končnih elementov. Za izbiro ustrezne stopnje delitve robov pa je potrebno upoštevati tudi čas, potreben za izvedbo simulacij  $t_s$ . Zaradi tega so v preglednici 6.4 podane tudi absolutne in relativne vrednosti časa, potrebnega za izvedbo simulacij na enem računalniku iz opisane gruče. Primerjava relativnih vrednosti pokaže, da je najugodnejša izbira delitev robov na tri končne elemente, saj ima ob relativno nizkem odstopanju



**Slika 6.9:** Povprečne odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije za simulacije modelov z robovi celic deljenimi na  $N_{ke} = 1, 2, 3, 5$  in 10 linijskih končnih elementov

**Preglednica 6.4:** Primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  in časa potrebnega za izvedbo simulacije  $t_s$  v odvisnosti od stopnje delitve roba celice  $N_{ke}$  v modelu

$N_{ke}$	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$\Delta U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	$\Delta U_{50\%}$ [%]	$t_s$ [h]	$t_s$ [%]
1	821,67	597,75	266,96	14	16,09
2	338,11	114,20	51,00	44	50,57
3	246,33	22,42	10,01	57	65,51
5	236,44	12,52	5,59	68	78,16
10	223,91	0,00	0,00	87	100,00

rezultatov  $\Delta U_{50\%} = 10,01$  % skoraj za polovico krajši čas izvajanja simulacije v primerjavi z modelom z najvišjo stopnjo delitve robov. Tako so bili za vse nadaljnje simulacije uporabljeni modeli, pri katerih je bila stopnja deljenosti robov enaka  $N_{ke} = 3$ .

### 6.3 Validacija numeričnega modeliranja odprto-celičnih gradiv

Po določitvi vseh potrebnih parametrov za pripravo modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv je bila izvedena validacija modeliranja odprto-celičnih gradiv z rešetkastimi modeli. Validacija je bila narejena na podlagi primerjave rezultatov numeričnih simulacij

z eksperimentalnim preizkušanjem. Pri tem so bili uporabljeni modeli odprto-celičnih gradiv, pripravljene na podlagi rekonstruirane strukture s tomografom zajetih 3D slik. Zgrajeni so bili na podlagi rekonstruiranih rešetkastih modelov na enak način kot modeli pripravljene na osnovi Voronojeve delitve prostora (poglavje 6.2). Tako je bila geometrija in topologija pripravljene numeričnih modelov enaka geometriji in topologiji eksperimentalno preizkušenih vzorcev. Zaradi enake strukture modelov in preizkušancev je mogoče uporabo rešetkastih modelov v simulacijah obnašanja odprto-celičnih gradiv validirati z neposredno primerjavo rezultatov simulacij takšnih modelov z rezultati eksperimentov.

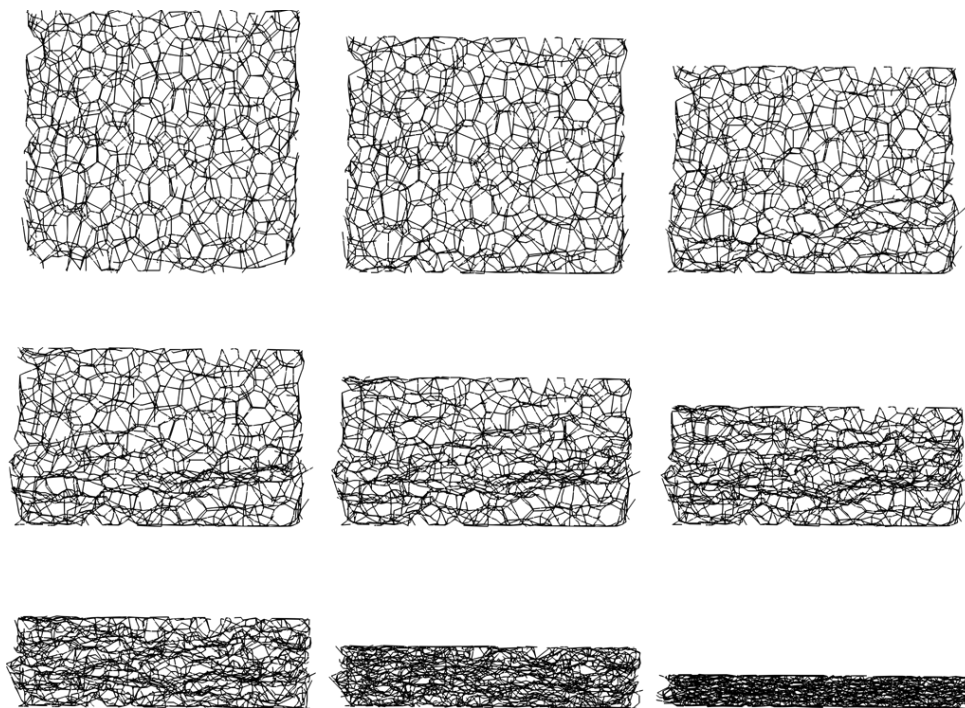
Za validacijo modelov neurejenega odprto-celičnega gradiva so bili izbrani vsi preizkušanci, katerih struktura je bila pred preizkušanjem posneta z računalniško tomografijo (preglednica 3.2) in so bili uporabljeni v kvazi-statičnih eksperimentalnih preizkusih. Na podlagi rekonstruiranih rešetkastih modelov vzorcev (od  $V_1$  do  $V_5$ ) iz vseh štirih skupin so bili pripravljene ustrezni numerični modeli, kjer je bila za vsak numerični model upoštevana njemu pripadajoča relativna gostota. Modeli so bili nato uporabljeni v simulacijah tlačnega obremenjevanja, s pomočjo katerih so bile izračunane povprečne krivulje inženirske napetosti v odvisnosti od inženirske deformacije za vsako skupino preizkušancev posebej. Hitrost obremenjevanja je bila izračunana iz velikosti vzorcev in najvišje inženirske deformacijske hitrosti, ki je še primerna za kvazi-statične simulacije (poglavje 6.2.1) in je znašala  $\dot{s} = 40$  mm/s.

Poteki deformiranja modelov v simulacijah so medsebojno zelo podobni, zato je na sliki 6.10 prikazan le potek deformiranja modela odprto-celičnega vzorca  $V_1$  iz skupine  $S_1$ . Slika prikazuje devet stopenj deformiranja modela med tlačno obremenitvijo od stopnje deformacije 0 % do 90 %, pri čemer je korak med posameznimi stopnjami konstanten. Deformacijo vzorca med eksperimentalnim preizkusom prikazuje slika 5.3. Da je potek deformiranja modela med simulacijo bolj razviden, je na sliki prikazan le tanek vertikalni sloj celotnega modela, katerega debelina znaša okrog  $1/6$  debeline celotnega modela.

Zaradi uporabe metode tanjšanja volumna med rekonstrukcijo vzorcev odprto-celičnih gradiv, robovi zunanji celic vzorca niso bili le stanjšani, ampak tudi skrajšani. Vendar vsi robovi mejnih celic niso bili skrajšani za enako vrednost, zato je bila zunanja oblika modela odprto-celičnega gradiva spremenjena. Rezultat te neenakomerne spremembe dolžine robov celic je, da so na začetku simulacije v stiku s podporno in obremenitveno ploščo le najdaljši robovi zunanji celic. Tako je začetne elastične deformacije modelov relativno malo, saj se hitro pojavi prehod v plastično deformacijo.

Področje plastične deformacije modela odprto-celičnega gradiva se prične z lokalno plastično deformacijo zunanji robov celic. Zunanje mejne celice so bile namreč med pripravo vzorcev prerezane, zaradi česar je bila njihova togost močno zmanjšana. Tako se v robovih teh celic pojavijo prve plastične deformacije. Temu sledi plastična deformacija celotnega modela s formacijo plastičnih con in sesedanjem celic v ozkih, lokalnih pasovih. Podobne



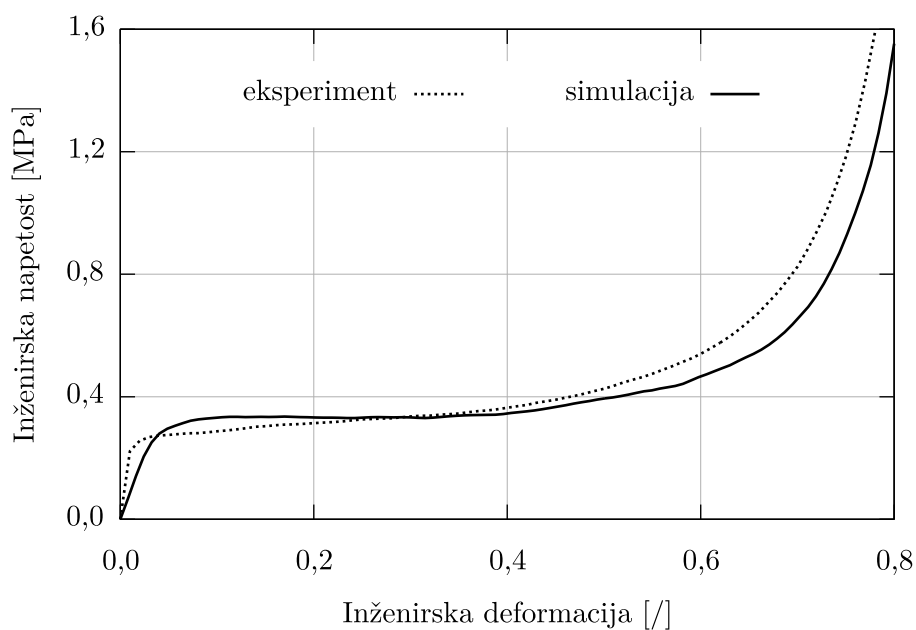


**Slika 6.10:** Potek deformiranja numeričnega modela odprto-celičnega gradiva pripravljenega na osnovi vzorca  $V_1$  iz skupine vzorcev  $S_1$ ; prikazane so stopnje deformacije od 0 do 90 % s konstantnim korakom

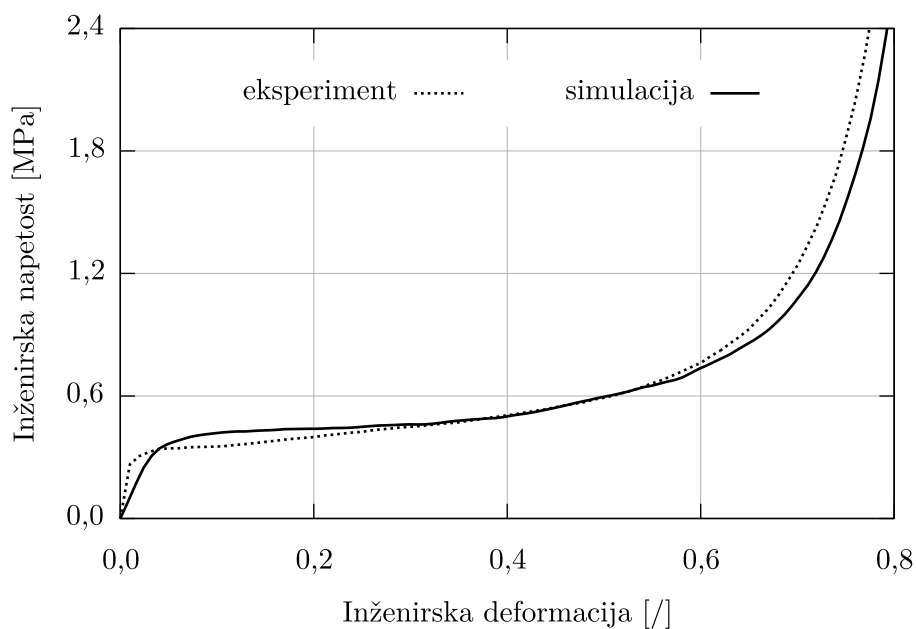
mehanizme deformiranja sta opisala že Silva in Gibson [73] na 2D Voronojevih modelih odprto-celičnih gradiv, pojavili pa so se tudi med eksperimentalnim preizkušanjem vzorcev (poglavje 5.2).

Primerjava oblike povprečnih krivulj odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije med simulacijami in eksperimenti je prikazana na slikah od 6.11 do 6.14. Vrednosti modula elastičnosti, tangentnega modula in gostote z deformacijo absorbiranega dela pa so podane v preglednici 6.5. Iz odvisnosti inženirskih napetosti v vseh skupinah je opazno, da napetosti pri simulacijah v elastičnem področju in v področju konstantne napetosti rastejo počasneje kot pri preizkusih, medtem ko v področju ponovne rasti togosti rastejo hitreje. Opazno je tudi, da so razlike med simulacijami in eksperimenti največje pri skupini  $S_4$ , ki ima najvišjo povprečno relativno gostoto.

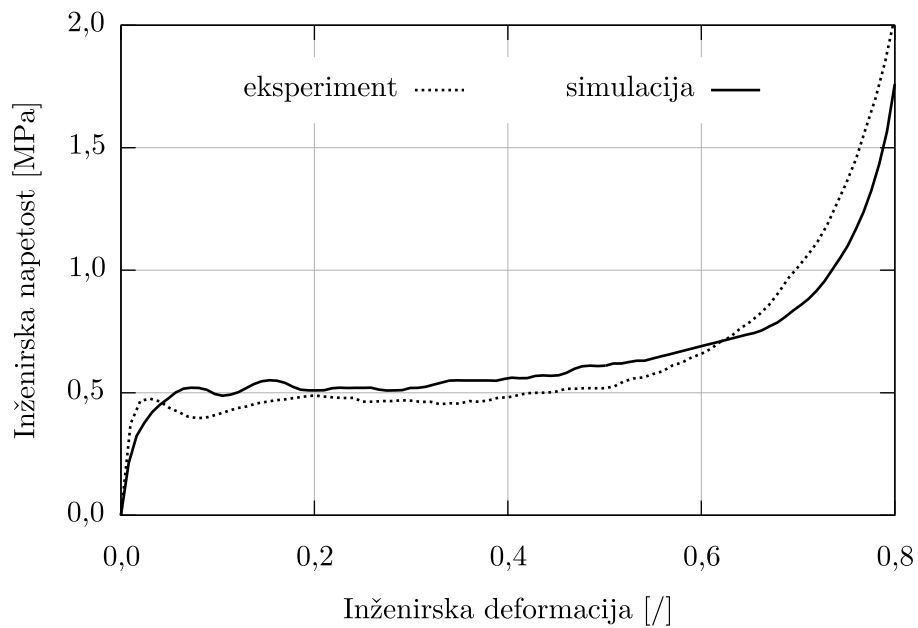
Velike razlike v modulu elastičnosti so posledica odstopanja geometrije modelov od geometrije preizkušancev zaradi spremembe dolžine robov celic med rekonstrukcijo rešetkastega modela. Le-te namreč povzročijo, da zunanjo obremenitev prevzame manj robov mejnih celic hkrati. Zaradi tega je manjši nosilni prerez modela odprto-celičnega gradiva in je za enako stopnjo inženirske deformacije potrebna manjša zunanja sila oziroma inženirska napetost. Razlike v področju konstantne napetosti so pri skupinah  $S_1$  in  $S_2$  zanemarljive in kažejo na dobro ujemanje med simulacijami in eksperimenti (primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$ ), medtem ko so razlike pri skupinah  $S_3$  in  $S_4$



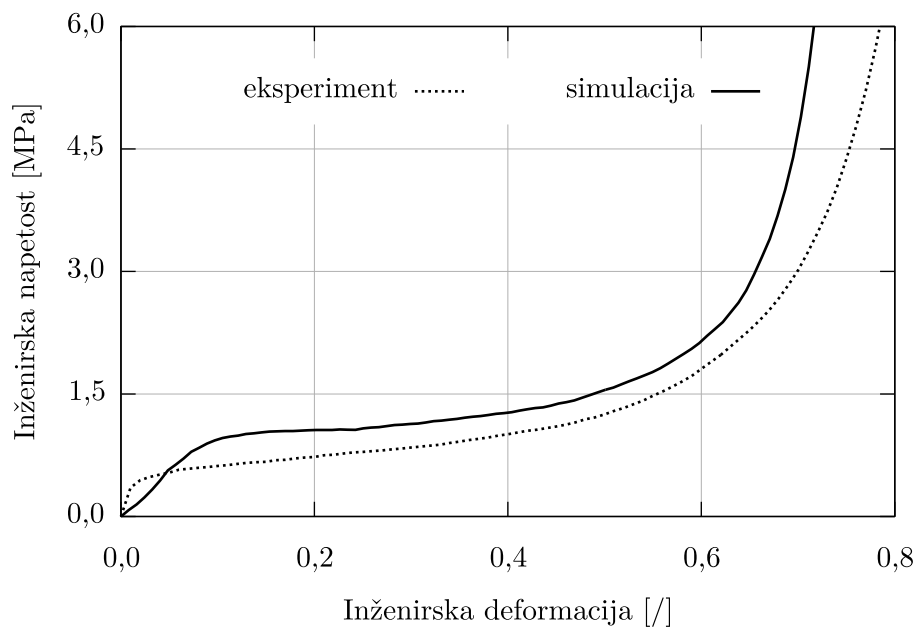
**Slika 6.11:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za rekonstruirane modele iz skupine  $S_1$



**Slika 6.12:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za rekonstruirane modele iz skupine  $S_2$



**Slika 6.13:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za rekonstruirane modele iz skupine  $S_3$



**Slika 6.14:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za rekonstruirane modele iz skupine  $S_4$

**Preglednica 6.5:** Mehanske lastnosti rekonstruiranih modelov: modul elastičnosti  $E$ , tangentni modul  $E_t$  (od  $\varepsilon = 20\%$  do  $50\%$ ) in gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  (do  $\varepsilon = 50\%$ )

Skupina		$E$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]
$S_1$	simulacija	8,56	0,21	164,31
	eksperiment	24,30	0,37	163,10
$S_2$	simulacija	10,34	0,52	224,57
	eksperiment	29,06	0,64	214,47
$S_3$	simulacija	17,34	0,34	261,70
	eksperiment	40,51	0,10	231,79
$S_4$	simulacija	9,55	1,63	529,39
	eksperiment	38,82	1,74	401,07

večje. Količina z deformacijo absorbiranega dela je namreč v primerjavi s preizkusi pri modelih iz skupine  $S_3$  višja za okrog 13 %, medtem ko je pri modelih iz skupine  $S_4$  višja kar za okrog 32 % kljub majhnemu odstopanju v vrednosti tangentnega modula.

Nekoliko večje razlike se pojavijo tudi v področju ponovne rasti togosti, kjer je hitrost naraščanja napetosti v primerjavi s preizkusi višja pri simulacijah. V tem področju začne togost celičnega gradiva rasti zaradi naraščajočega števila kontaktov med sosednjimi robovi celic, preko katerih se prenaša zunanja obremenitev. V simulacijah pride do kontakta med linijskimi končnimi elementi, katerih preseki pa ostajajo med simulacijami po obliki in velikosti nespremenjeni. Odsotnost prečne deformacije linijskih končnih elementov predstavlja dodatno togost v modelu in pospešuje rast napetosti v območju ponovne rasti togosti.

Vzrok nekoliko večjega odstopanja rezultatov simulacij v primerjavi s preizkusi pri skupini  $S_3$  je premalo število plasti celic pri vzorcih iz te skupine. Že rezultati eksperimentalnih preizkusov kažejo nihanje inženirske napetosti v odvisnosti od inženirske deformacije, ki je v simulacijah še bolj izrazito, neposredna primerjava rezultatov pa je tako otežena. Kljub temu s simulacijami dobljena odvisnost povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije dobro sovпада z napetostmi med preizkusom.

Največja razlika med rezultati eksperimentalnih preizkusov in rezultati simulacij je prisotna pri vzorcih iz skupine  $S_4$ . Razlika je predvsem posledica razporeditve osnovnega materiala v vzorcih iz te skupine. Povprečna relativna gostota vzorcev iz skupine  $S_4$  je namreč skoraj 2,4 krat višja kot povprečna relativna gostota vzorcev iz skupine  $S_3$ , pri enaki nazivni velikosti celic 20 ppi. Tako visoka relativna gostota je rezultat dodatnega

materiala na stičiščih robov celic vzorcev skupine  $S_4$  (slika 3.3). To dejstvo v pripravi numeričnih modelov ni bilo upoštevano, saj je bil ves material razporejen na robove celic. Zaradi tega so imeli uporabljeni linijski končni elementi večji presek (enačba 6.8) in s tem višjo nosilnost, ki se kaže kot povišana togost modelov celičnega-gradiva iz skupine  $S_4$  v primerjavi z eksperimentalnimi preizkusi.

Velik vpliv polmera linijskega končnega elementa na togost celičnega gradiva je posledica dejstva, da ta odvisnost ni linearna. Glavna mehanizma porušitve robov celic sta namreč uklon in upogib. Nosilnost linijskega končnega elementa pri uklonu je premo-sorazmerna z  $r_b^4$ , medtem ko je nosilnost pri upogibu premo-sorazmerna z  $r_b^3$ . Tako za omenjeno 32 % višjo togost v modelih iz skupine  $S_4$  pri upogibu zadostuje povečanje polmera linijskega elementa za 9,7 %, medtem ko je ta vrednost pri uklonu še nižja in znaša 7,2 %.

## Sklep

Primerjava rezultatov simulacij neurejenih odprto-celičnih gradiv pod tlačnimi obremenitvami z eksperimentalnimi preizkusi je pokazala dobro ujemanje oblik krivulj inženirskih napetosti v odvisnosti od inženirskih deformacij. Krivulje dobljene s pomočjo simulacij imajo namreč, tako kot eksperimentalno izmerjene krivulje, vsa štiri značilna območja deformiranja celičnih gradiv. In sicer začetno elastično deformacijo, prehodno območje, območje konstantne napetosti in ponovno rast togosti. Podrobnejša analiza krivulj pokaže razlike med krivuljami, dobljenimi s pomočjo simulacij in eksperimentov. Največje razlike v obliki krivulj se pojavijo v elastičnem delu, kjer imajo analizirani modeli odprto-celičnih gradiv nižjo togost od preizkušancev, kar je posledica spremembe geometrije med pripravo modelov. Razlike v obliki krivulj na območju konstantne napetosti so zanemarljive, medtem ko v področju ponovne rasti togosti na nosilnost modelov vplivajo uporabljeni linijski končni elementi brez deformacije v prečni smeri glede na njihovo dolžino.

Absolutno gledano so razlike med simulacijami in eksperimenti pri skupinah  $S_1$ ,  $S_2$  in  $S_3$  majhne na celotnem, širokem področju inženirske deformacije od  $\varepsilon_e = 0$  % do 80 %. Ob upoštevanju vseh poenostavitev, ki so bile uvedene pri pripravi modela neurejenega odprto-celičnega gradiva in upoštevanju dejstva, da so bile materialne lastnosti osnovnega materiala modela povzete po literaturi, so te razlike zanemarljive. Večje so razlike pri skupini  $S_4$ . Relativna gostota vzorcev iz skupine  $S_4$  je namreč tako visoka, da se v strukturi vzorcev že pojavljajo majhna okna celic, ki so zaprta in tvorijo odebeljena stičišča robov celic. Takšna razporeditev osnovnega materiala odstopa od predpostavke, da so robovi celic konstantnega prereza vzdolž njihove celotne dolžine, ki je bila uporabljena za pripravo analiziranih modelov. To odstopanje v veliki meri vpliva na večje razlike med simulacijami in eksperimenti pri skupini  $S_4$ . Dodatno na rezultate vpliva tudi velikost vzorcev iz skupin  $S_3$  in  $S_4$ , oziroma debelina robov njihovih celic. Med rekonstrukcijo teh vzorcev je bilo

namreč potrebno dvigniti barvni prag za segmentacijo, zaradi česar geometrija modelov bolj odstopa od geometrije vzorcev kot v skupinah  $S_1$  in  $S_2$ .

Za izboljšanje rezultatov simulacij numeričnih modelov iz skupin  $S_3$  in  $S_4$  bi bilo potrebno med zajemanjem 3D slik z računalniškim tomografom uporabiti višjo ločljivost, oziroma za zajemanje slik uporabiti računalniški mikro-tomograf. Na ta način bi bilo mogoče izvesti rekonstrukcijo strukture odprto-celičnih gradiv, katere rezultat bi bili modeli neurejenih odprto-celičnih gradiv z natančnejšo geometrijo in topologijo. S pomočjo višje resolucije bi bilo mogoče analizirati tudi obliko in spremembo velikosti prerezov robov celic vzdolž njihove dolžine. Zaradi modeliranja strukture odprto-celičnih gradiv z rešetkastimi modeli, bi bilo mogoče spoznanja teh analiz zelo enostavno upoštevati in vključiti v model neurejenega odprto-celičnega gradiva.

## 6.4 Validacija Voronojevih modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv

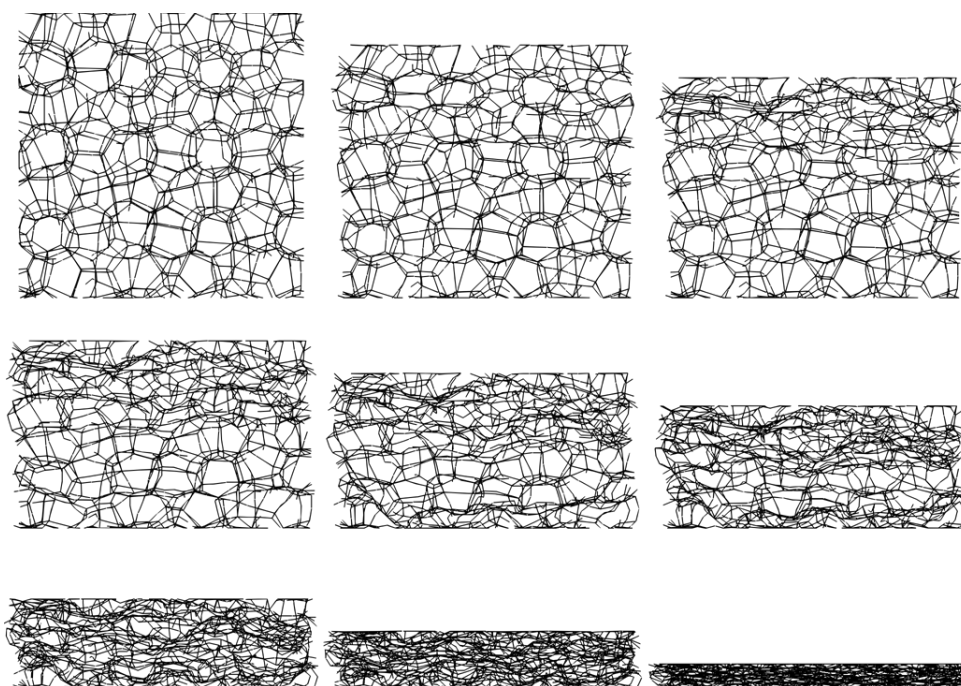
Modeliranje strukture neurejenih odprto-celičnih gradiv s pomočjo Voronojeve delitve prostora je opisano v poglavju 4. Osnovo za Voronojevo delitev prostora predstavljata Kelvinov in Weaire-Phelanov ravnotežni model, neurejenost strukture pa je bila dosežena s kontroliranim premikom začetnih točk po enačbi 4.4. S primerjavo statistično vrednotenih geometrijskih in topoloških lastnosti Voronojevih modelov in lastnosti rekonstruiranih vzorcev aluminijevih pen je ugotovljeno, da je najprimernejši za modeliranje teh vzorcev Weaire-Phelanov model s stopnjo neurejenosti  $a = 0,18$ .

V poglavju 6.3 je bil uspešno validiran razvit numerični model za diskretizacijo rešetkastih modelov odprto-celičnih pen. Zato je bil uporabljen tudi v tem poglavju za validacijo Weaire-Phelanovih modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv, ki se po geometriji in topologiji najbolj približajo preizkušnim vzorcem aluminijeve pene. Tako je bila validacija Weaire-Phelanovih modelov izvedena s primerjavo rezultatov eksperimentalnega preizkušanja in simulacij Weaire-Phelanovih modelov vseh štirih skupin preizkušancev od  $S_1$  do  $S_4$ . Narejene so bile primerjave rezultatov kvazi-statičnih in dinamičnih preizkusov.

Za vsako skupino preizkušancev je bilo zaradi uporabe naključnosti pri pripravi modelov analiziranih 20 Weaire-Phelanovih modelov odprto-celičnega gradiva, katerih relativna gostota je ustrezala povprečni relativni gostoti modelirane skupine. Povprečna velikost celic v modelih je bila izbrana tako, da je bila enaka povprečni velikosti celic posameznih skupin, določenih med rekonstrukcijo (poglavje 3.3.4). Modeli so imeli obliko kocke, katere stranica je bila izračunana iz velikosti celic in izbranega števila plasti celic  $N_c = 5$ . Glajenje rešetkastega modela je bilo izvedeno z mejno dolžino roba  $L_{min} = 3r_b$ , robovi celic pa so bili razdeljeni na največ  $N_{ke} = 3$  linijske končne elemente. Pri dinamičnih

simulacijah je bil vpliv deformacijske hitrosti na lastnosti osnovnega materiala upoštevan z uporabo Cowper-Symondsovega konstitutivnega modela, medtem ko je bil pri kvazi-statičnih simulacijah uporabljen od deformacijske hitrosti neodvisen materialni model.

Tako pripravljene modeli so bili uporabljeni v simulacijah kvazi-statičnega in dinamičnega tlačnega obremenjevanja, s pomočjo katerih so bile izračunane povprečne krivulje inženirske napetosti v odvisnosti od inženirske deformacije za vsako skupino preizkušancev posebej. Hitrost obremenjevanja je bila izračunana iz velikosti vzorcev in izbrane inženirske deformacijske hitrosti. Za kvazi-statične simulacije je bila izbrana inženirska deformacijska hitrost  $\dot{\epsilon}_{e,sta} = 1 \text{ s}^{-1}$  (poglavje 6.2.1), za dinamične simulacije pa inženirska deformacijska hitrost, ki je bila enaka inženirski deformacijski hitrosti uporabljeni v dinamičnih preizkusih  $\dot{\epsilon}_{e,din} = 7,11 \text{ s}^{-1}$ .



**Slika 6.15:** Potek deformiranja Weaire-Phelanovega modela odprto-celičnega gradiva iz skupine modelov  $S_1$ ; prikazane so stopnje deformacije od 0 do 90 % s konstantnim korakom

Primerjava deformiranja Weaire-Phelanovih modelov odprto-celičnega gradiva med kvazi-statičnimi in dinamičnimi simulacijami je pokazala, da je deformiranje pri obeh načinih obremenjevanja praktično enako kljub veliki razliki v hitrosti obremenjevanja. Tako je na sliki 6.22 prikazan le potek deformiranja enega izmed Weaire-Phelanovih modelov med dinamično simulacijo. Slika prikazuje devet stopenj deformiranja modela od deformacije 0 % do 90 % s konstantnim korakom med stopnjami. Da je potek deformiranja modela bolj razviden, je na sliki prikazan le tanek vertikalni sloj celotnega modela v debelini  $1/6$  modela.

Deformacija se začne z elastično deformacijo po celotnem modelu, nato se hitro pojavi

plastična deformacija robov odrezanih celic, ki so v stiku z podporno in obremenitveno ploščo. Te celice so bile namreč med pripravo modela prerezane, kar močno zmanjša njihovo nosilnost in predstavlja oslabitev strukture v modelu. Temu sledi plastična deformacija celotnega modela s formacijo plastičnih con in sesedanjem celic v ozkih, lokalnih pasovih. Podobni mehanizmi deformiranja so bili prisotni tudi pri simulacijah rekonstruiranih modelov in vzorcih aluminijeve pene med preizkusi ter opisani v literaturi [73].

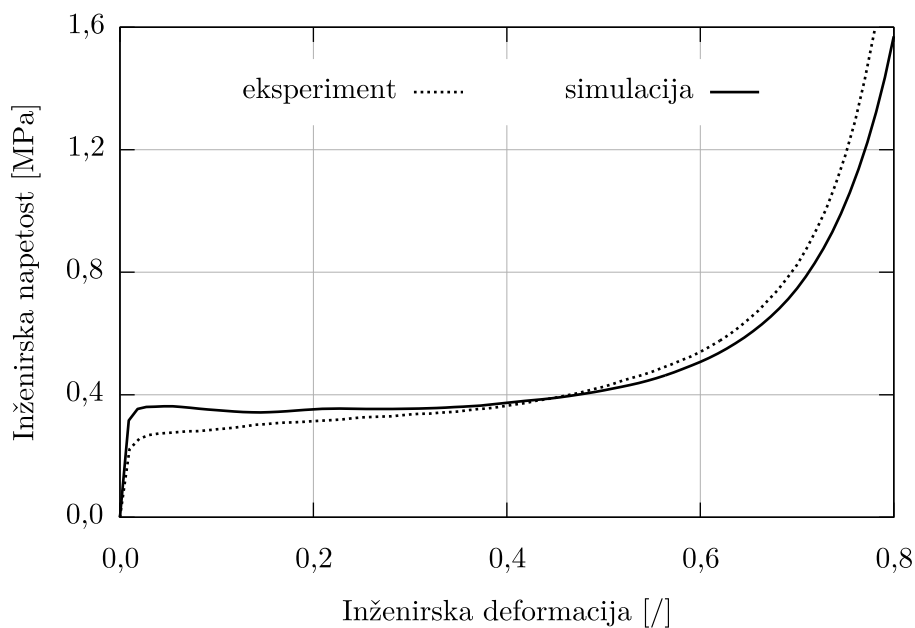
#### 6.4.1 Rezultati kvazi-statičnih simulacij

Odvisnost inženirskih napetosti od inženirskih deformacij za kvazi-statične simulacije prikazuje slike od 6.16 do 6.19. Vrednosti modula elastičnosti, tangenta modula in gostote z deformacijo absorbiranega dela so podane v preglednici 6.6. Iz odvisnosti inženirskih napetosti pri simulacijah vseh skupin je opazno, da napetosti pri simulacijah v elastičnem področju dosti hitreje rastejo in dosežejo tudi večje vrednosti kot v eksperimentalnih preizkusih. Nato se v območju konstantnih napetosti hitrost naraščanja napetosti močno zmanjša, na prehodu v območje ponovne rasti togosti pa se napetosti začnejo približevati eksperimentalno izmerjenim vrednostim. Največje razlike med simulacijami in preizkusi se tako pojavijo v elastičnem območju in so prisotne v vseh skupinah, opazno pa je tudi večje odstopanje vrednosti napetosti v skupini  $S_4$  po celotnem področju deformacije.

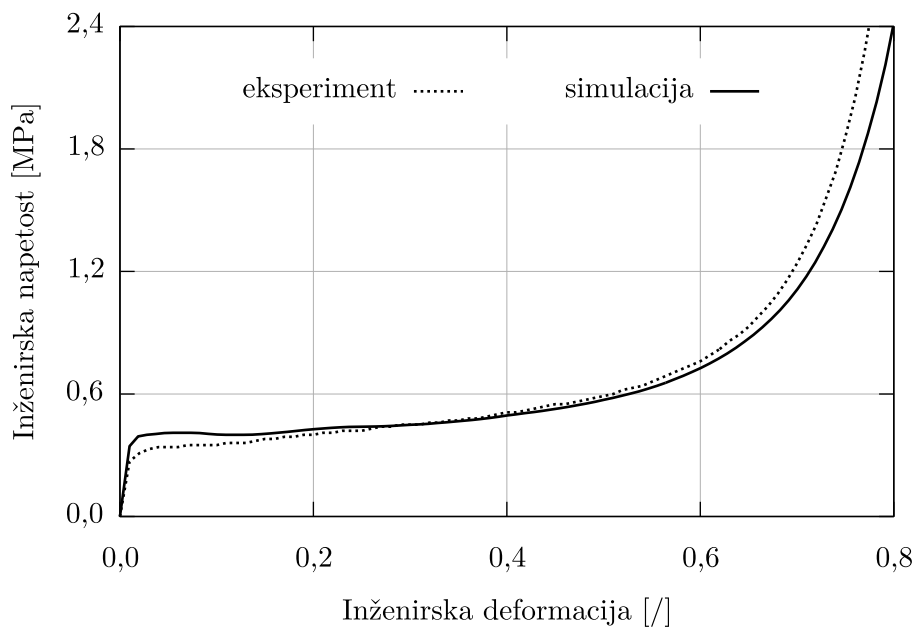
Primerjava vrednosti modula elastičnosti podanega v preglednici 6.6 pokaže, da imajo Weaire-Phelanovi modeli višjo togost v elastičnem področju kot preizkušeni vzorci. Višja togost je posledica načina diskretizacije modela, kjer imajo vsi končni elementi na robovih celic prereze enakih oblik in velikosti. Robovi celic eksperimentalno preizkušenih vzorcev imajo namreč robove različnih oblik in velikosti. Tako so v vzorcih prisotni tudi tanjši robovi celic, ki predstavljajo lokalno oslabljena področja, kjer se hitreje pojavi začetna plastična deformacija. In posledica hitrejšega nastanka lokalnih plastičnih con je nižja togost preizkušenih vzorcev v območju elastične deformacije v primerjavi z Weaire-Phelanovimi modeli. Takšen vpliv neenakomerne velikosti prerezov robov celic je poznan tudi iz literature [5, 104]. Dodatno na hitrejši pojav plastičnih con v strukturi realnih preizkušancev vplivajo v njih prisotne napake [70], kot so manjkajoči robovi celic, zapolnjena okna celic, deformirane celice in ostanki osnovnega materiala, ki v Weaire-Phelanovih modelih niso upoštevane.

Iz odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij je razvidno, da togost modelov v elastičnem področju najprej narašča do mejne vrednosti napetosti, nato se njena rast popolnoma ustavi ali začne celo padati. Takšno obnašanje nakazuje, da pride pri simulacijah do bolj izrazite porušitve prve, najšibkejše plasti celic v modelu, kar je značilno za bolj urejene strukture. V tem primeru se urejenost nanaša na velikosti in oblike

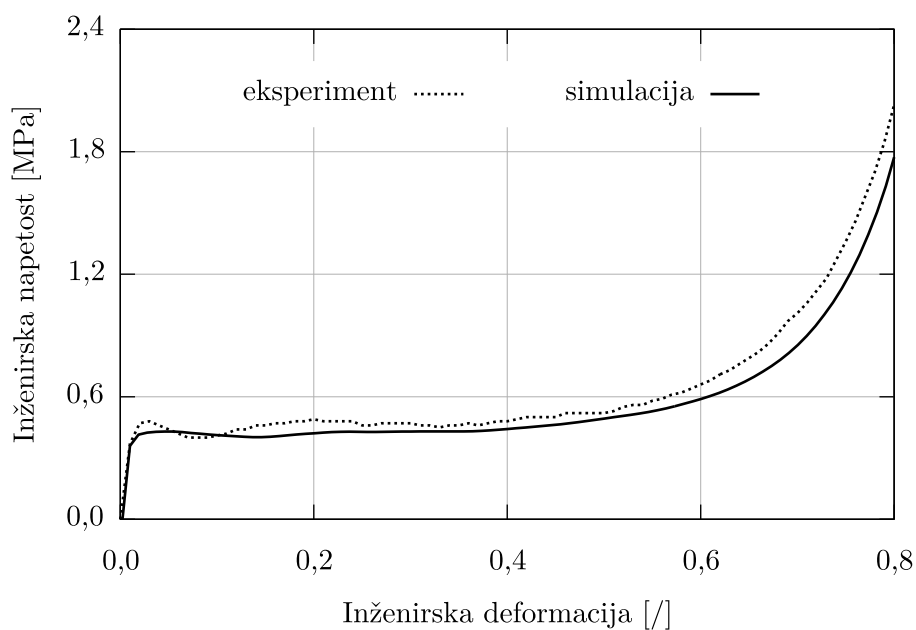




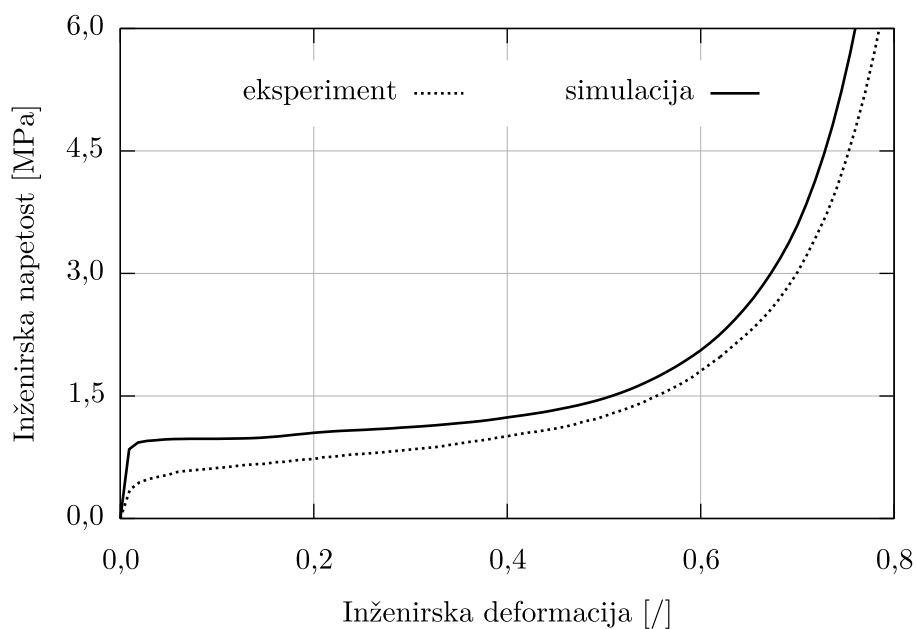
**Slika 6.16:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za Weaire-Phelanove modele iz skupine  $S_1$



**Slika 6.17:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za Weaire-Phelanove modele iz skupine  $S_2$



**Slika 6.18:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za Weaire-Phelanove modele iz skupine  $S_3$



**Slika 6.19:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za Weaire-Phelanove modele iz skupine  $S_4$

prerezov robov celic ter na urejenost modela v obliki vzporednih ravnin plasti celic zaradi načina priprave Weaire-Phelanovih modelov (poglavje 4.6).

Razlike v področju konstantne napetosti so pri skupinah  $S_1$  in  $S_2$  zanemarljive in kažejo na dobro ujemanje med Weaire-Phelanovimi modeli in preizkušanci (primerjava vrednosti gostote z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$ ), medtem ko so razlike pri skupinah  $S_3$  in  $S_4$  večje. Količina z deformacijo absorbiranega dela je namreč v primerjavi s preizkusi pri Weaire-Phelanovih modelih iz skupine  $S_3$  nižja za okrog 12 %, medtem ko je pri modelih iz skupine  $S_4$  višja kar za okrog 38 % kljub majhnemu odstopanju v vrednosti tangentnega modula.

Vzrok nekoliko večjega odstopanja rezultatov simulacij v primerjavi s preizkusi pri skupini  $S_3$  je premalo število plasti celic pri vzorcih iz te skupine. Že rezultati eksperimentalnih preizkusov in validacije numeričnega modela namreč kažejo nihanje inženirske napetosti pri tej skupini. Neposredna primerjava rezultatov je tako otežena, saj so bili Weaire-Phelanovi modeli dovolj veliki, da do tega pojava pri njih ni prišlo. Kljub temu s simulacijami dobljena odvisnost povprečne inženirske napetosti dobro sovпада s potekom inženirskih napetosti med preizkusom.

Največja razlika med rezultati eksperimentalnih preizkusov in rezultati simulacij z Weaire-Phelanovimi modeli je prisotna pri skupini  $S_4$ . Razlika je predvsem posledica razporeditve

**Preglednica 6.6:** Kvazi-statične in dinamične mehanske lastnosti Weaire-Phelanovih modelov: modul elastičnosti  $E$ , tangentni modul  $E_t$  in gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$

Skupina		$E$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$U_{50\%}$ [kJ/m <sup>3</sup> ]	
kvazi-statično	$S_1$ ( $\bar{\rho}_r = 5,03$ %)	simulacija	78,27	0,21	180,09
		eksperiment	24,30	0,37	163,10
	$S_2$ ( $\bar{\rho}_r = 6,10$ %)	simulacija	87,11	1,24	223,73
		eksperiment	29,06	0,64	214,47
	$S_3$ ( $\bar{\rho}_r = 5,43$ %)	simulacija	84,37	0,18	203,01
		eksperiment	40,51	0,10	231,79
	$S_4$ ( $\bar{\rho}_r = 12,01$ %)	simulacija	135,36	0,41	553,41
		eksperiment	38,82	1,74	401,07
dinamično	$S_1$ ( $\bar{\rho}_r = 4,90$ %)	simulacija	74,69	0,39	182,37
		eksperiment	13,24	0,43	157,08
	$S_2$ ( $\bar{\rho}_r = 6,71$ %)	simulacija	89,37	0,80	251,22
		eksperiment	15,58	0,84	252,79

osnovnega materiala v vzorcih iz te skupine. Največja poenostavitev pri opisanem postopku priprave numeričnih modelov je namreč predpostavka, da je velikost preseka roba celice konstantna po njegovi dolžini in da imajo vsi robovi celic enako velik presek, kar pa še posebej za vzorce iz skupine  $S_4$  ne drži, saj je njihova višja relativna gostota rezultat dodatnega materiala na stičiščih robov celic (slika 3.3).

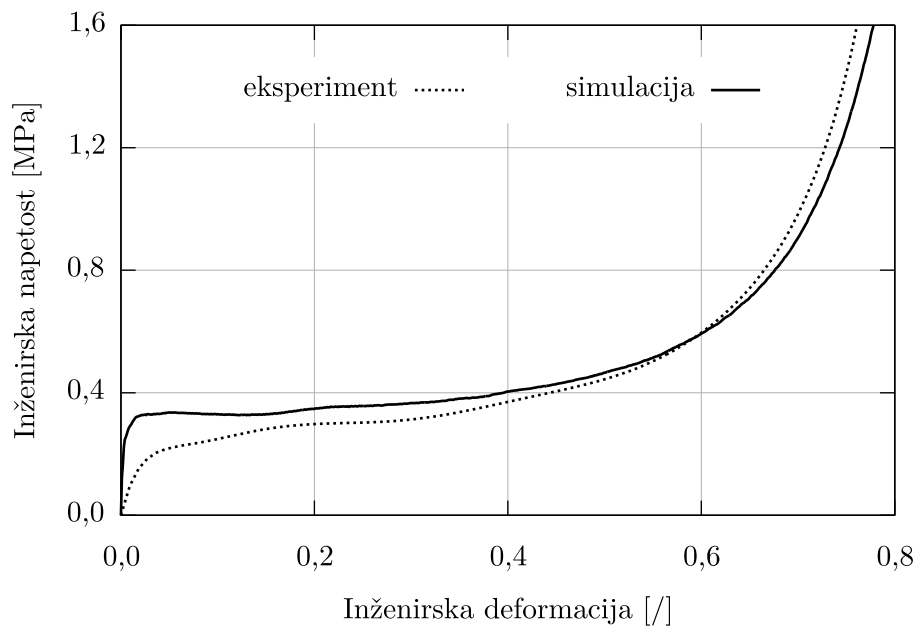
Tudi v področju ponovne rasti togosti se pojavijo nekoliko večje razlike med simulacijami in preizkusi. Hitrost naraščanja napetosti pri simulacijah je namreč v primerjavi s preizkusi do stopnje deformacije 80 % nižja, nato pa začne hitro naraščati. Vzrok je že omenjena odsotnost prečne deformacije linijskih končnih elementov in uporaba kazenske kontaktne metode. Kazenska metoda, pri tako visoki stopnji deformacije modela odprto-celičnega gradiva, linijskih končnih elementov v kontaktu, ne more več razdružiti zaradi pomanjkanja prostora v okolici, zato se kontaktna sila iz časovnega koraka v časovni korak povečuje, kar vpliva na povečanje sile obremenjevanja.

#### 6.4.2 Rezultati dinamičnih simulacij

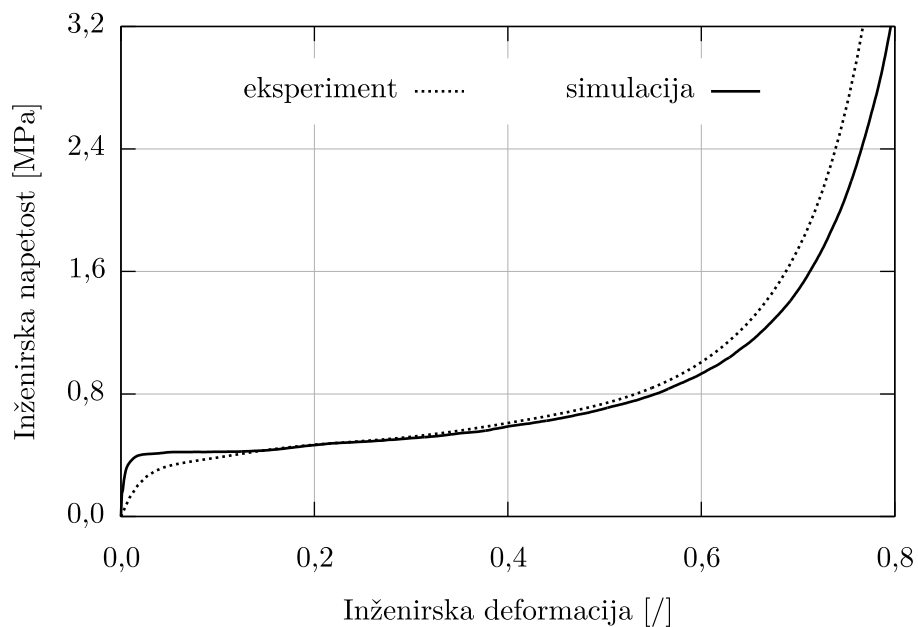
Weaire-Phelanovi modeli odprto-celičnih gradiv za dinamične simulacije so bili pripravljani na osnovi povprečne vednosti relativne gostote dodatnih preizkušancev iz skupin  $S_1$  in  $S_2$  (preglednica 5.1), tako je njihova relativna gostota znašala  $\rho_{r,1} = 4,90$  % oziroma  $\rho_{r,2} = 6,71$  %, zato rezultatov teh simulacij ni mogoče neposredno primerjati z rezultati kvazi-statičnih analiz. Potek deformiranja enega izmed modelov prikazuje slika 6.22, odvisnost inženirske napetosti od inženirske deformacije prikazujeta sliki 6.20 in 6.21, materialne lastnosti pa podaja preglednica 6.6.

Iz odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije obeh skupin dinamičnih simulacij je opazna velika podobnost z odvisnostmi napetosti pri kvazi-statičnih simulacijah. Napetosti pri dinamičnih simulacijah v elastičnem področju namreč dosti hitreje rastejo in dosežejo tudi večje vrednosti kot v dinamičnih eksperimentalnih preizkusih. V območju konstantnih napetosti se hitrost naraščanja napetosti zmanjša in napetosti se začnejo približevati eksperimentalno izmerjenim vrednostim na prehodu v območje ponovne rasti togosti. Največje razlike med dinamičnimi simulacijami in preizkusi se tako pojavijo v elastičnem območju in so prisotne v obeh skupinah, opazno pa je tudi podobno odstopanje vrednosti napetosti med obema skupinama dinamično simuliranih Weaire-Phelanovih modelov.

Primerjava vrednosti modula elastičnosti med preizkusi in simulacijami z dinamičnimi obremenitvami (preglednica 6.6) pokaže, da imajo Weaire-Phelanovi modeli višjo togost v elastičnem področju kot preizkušeni vzorci. Iz odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij pa je razvidno, da togost modelov najprej narašča do mejne vrednosti napetosti, nato se njena rast popolnoma ustavi. Takšno obnašanje je prisotno tudi pri



**Slika 6.20:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za Weaire-Phelanove modele iz skupine  $S_1$



**Slika 6.21:** Primerjava odvisnosti povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije med eksperimentom in simulacijo za Weaire-Phelanove modele iz skupine  $S_2$

kvazi-statičnih simulacijah, vzroki pa so enaka oblika in velikost prerezov linijskih končnih elementov na robovih celic ter urejenost modela v obliki vzporednih plasti celic zaradi načina priprave Weaire-Phelanovih modelov (podrobnejši opis v poglavju 6.4.1).

Primerjava tangentnega modula podanega v preglednici 6.6 pokaže, da so razlike v področju konstantne napetosti med simulacijo in eksperimentom pri obeh skupinah zanemarljive, kar kaže na dobro ujemanje rezultatov dinamičnih simulacij Weaire-Phelanovih modelov z dinamičnimi preizkusi. Odstopanje z deformacijo absorbiranega dela pri skupini  $S_1$  znaša 16 %, medtem ko je odstopanje pri skupini  $S_2$  še nižje in znaša manj kot 1 %. Vzrok odstopanja z deformacijo absorbiranega dela pri obeh skupinah je odstopanje v elastičnem območju.

Tudi v področju ponovne rasti togosti se pojavijo nekoliko večje razlike med dinamičnimi simulacijami in preizkusi. Hitrost naraščanja napetosti pri simulacijah je namreč v primerjavi s preizkusi do stopnje deformacije 80 % nižja, nato pa začne hitro naraščati. Vzrok je prečna togost linijskih končnih elementov in uporaba kazenske kontaktne metode, podobno kot pri kvazi-statičnih simulacijah.

Primerjava rezultatov opisanih dinamičnih in kvazi-statičnih simulacij je otežena zaradi različne gostote uporabljene v pripravi modelov. Kljub temu primerjava krivulj odvisnosti inženirskih napetosti kaže zelo podobne oblike s hitro rastjo togosti v elastičnem delu, ki se v prehodnem območju močno upočasni in se v območju konstantne napetosti skoraj ustavi. Nato sledi ponovna rast togosti ob zgoščevanju Weaire-Phelanovega modela odprto-celičnega gradiva.

Primerjava mehanskih lastnosti kvazi-statično in dinamično obremenjenih Weaire-Phelanovih modelov, ki so podane v preglednici 6.6 vodi do podobnih zaključkov. Izkaže se velik vpliv relativne gostote na togost modelov, in sicer višja kot je relativna gostota, višja je tudi togost Weaire-Phelanovega modela odprto-celičnih gradiv, kar se ujema tudi z rezultati eksperimentalnih preizkusov. Na drugi strani pa vpliva hitrosti obremenjevanja na Weaire-Phelanove modele iz opravljenih simulacij ni mogoče zaslediti. Vzrok je v nizki vztrajnostni masi odprto-celičnih gradiv in nizki občutljivosti aluminija na deformacijsko hitrost. Že v poglavju rezultatov dinamičnih preizkusov (poglavje 5.2) je bilo ugotovljeno, da je vpliv inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e = 7,11 \text{ s}^{-1}$  na aluminijeva odprto-celična gradiva zanemarljiv.

### 6.4.3 Zaključek

Primerjava rezultatov simulacij Weaire-Phelanovih modelov neurejenih odprto-celičnih gradiv pod tlačnimi obremenitvami z eksperimentalnimi preizkusi je pokazala zelo dobro ujemanje oblik krivulj odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije, tako za

kvazi-statične kot tudi za dinamične simulacije. Krivulje dobljene s pomočjo Weaire-Phelanovih modelov imajo namreč, tako kot krivulje eksperimentalnih preizkusov, vsa štiri značilna območja deformiranja celičnih gradiv.

Podrobnejša analiza odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij kvazi-statičnih in dinamičnih simulacij pokaže razlike med odvisnostmi dobljenimi s pomočjo simulacij in eksperimentov. Največje razlike se pojavijo v elastičnem delu, kjer imajo Weaire-Phelanovi modeli odprto-celičnih gradiv precej višjo togost od preizkušancev. Višja togost je posledica načina diskretizacije modela, kjer imajo vsi končni elementi na robovih celic prereze enakih oblik in velikosti. Robovi celic eksperimentalno preizkušanih vzorcev imajo namreč robove različnih oblik in velikosti. Tako so v vzorcih prisotni tudi tanjši robovi celic, ki predstavljajo lokalno oslABLJENA področja, kjer se hitreje pojavi začetna plastična deformacija. In posledica hitrejšega nastanka lokalnih plastičnih con je nižja togost preizkušanih vzorcev v območju elastične deformacije v primerjavi z Weaire-Phelanovimi modeli. Takšen vpliv neenakomerne velikosti prerezov robov celic je poznan tudi iz literature [5, 104]. Dodatno na hitrejši pojav plastičnih con v strukturi realnih preizkušancev vplivajo v njih prisotne napake [70], kot so manjkajoči robovi celic, zapolnjena okna celic, deformirane celice in ostanki osnovnega materiala, ki v Weaire-Phelanovih modelih niso upoštevane.

Iz odvisnosti inženirskih napetosti od inženirskih deformacij je razvidno, da togost modelov v elastičnem področju najprej narašča do mejne vrednosti napetosti, nato se njena rast popolnoma ustavi ali začne celo padati. Takšno obnašanje nakazuje, da pride pri simulacijah do bolj izrazite porušitve prve, najšibkejše plasti celic v modelu, kar je značilno za bolj urejene strukture. V tem primeru se urejenost nanaša na velikosti in oblike prerezov robov celic ter na urejenost modela v obliki vzporednih ravnin plasti celic zaradi načina priprave Weaire-Phelanovih modelov (poglavje 4.6).

Razlike v inženirskih napetostih na območju konstantne napetosti so zanemarljive tako za kvazi-statične kot tudi za dinamične simulacije. Izjema je skupina preizkušancev  $S_4$ , ki od ostalih skupin odstopa zaradi svoje strukture z odebeljenimi stičišči robov celic. Tudi v področju ponovne rasti togosti se rezultati dobro ujema, razlike se pokažejo le pri zelo visokih stopnjah deformacij zaradi uporabljenih linijskih končnih elementov brez deformacije v prečni smeri.

Absolutno gledano so razlike med simulacijami in eksperimenti pri skupinah  $S_1$ ,  $S_2$  in  $S_3$  majhne na celotnem, širokem področju inženirske deformacije od  $\varepsilon_e = 0\%$  do  $80\%$ . To velja tako za kvazi-statično obremenjevanje kot tudi za dinamično obremenjevanje. Ob upoštevanju vseh poenostavitev, ki so bile uvedene pri pripravi Weaire-Phelanovega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva in upoštevanju dejstva, da so bili materialni podatki za model povzeti po literaturi, so te razlike zanemarljive.

Primerjava rezultatov simulacij z različnimi relativnimi gostotami pokaže, da model neurejenih odprto-celičnih gradiv dobro opiše realne razmere. Vrednosti z deformacijo absorbiranega dela namreč kažejo, da višja kot je gostota celičnega gradiva, višja je tudi njegova togost. Premo-sorazmerna odvisnost je bila ugotovljena tudi med eksperimentalnimi preizkusi in je znana tudi že iz literature [2].

Kljub opravljenim kvazi-statičnim in dinamičnim simulacijam iz njih ni bilo mogoče opaziti vpliva deformacijske hitrosti na obnašanje odprto-celičnega gradiva. Vzrok je v nizki vztrajnostni masi odprto-celičnih gradiv in nizki občutljivosti aluminija na deformacijsko hitrost. Že v poglavju rezultatov dinamičnih preizkusov (poglavje 5.2) je bilo ugotovljeno, da je vpliv inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e = 7,11 \text{ s}^{-1}$  na aluminijeva odprto-celična gradiva zanemarljiv.

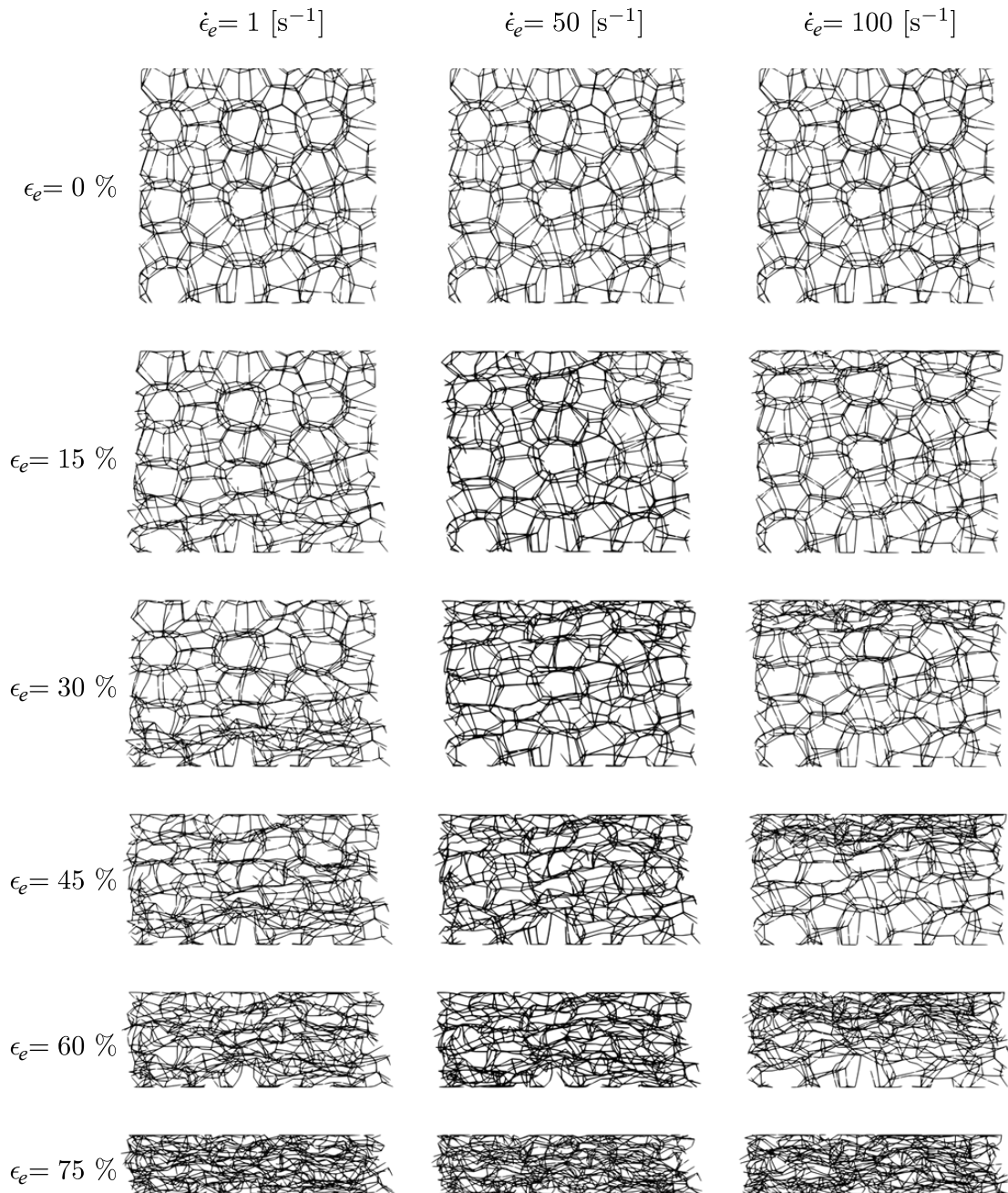
## 6.5 Vpliv deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti

Razviti numerični model neurejenega odprto-celičnega gradiva je bil po validaciji uporabljen za analizo vpliva deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti na mehanske lastnosti odprto-celičnega gradiva. Analizirane so bile štiri različne stopnje neurejenosti  $a = 0,1$  do  $0,4$  s korakom  $0,1$  in pet različnih inženirskih deformacijskih hitrosti, in sicer  $\dot{\epsilon}_e = 1, 10, 20, 50$  in  $100 \text{ s}^{-1}$ . Za vsako kombinacijo teh vrednosti je bila pripravljena ena skupina Weaire-Phelanovih modelov aluminijevih odprto-celičnih gradiv, ki je zaradi uporabe naključnosti pri pripravi modelov vsebovala 10 numeričnih modelov. Uporabljena je bila relativna gostota  $\rho_r = 5 \%$ .

Poteki deformiranja Weaire-Phelanovih modelov z različnimi stopnjami neurejenosti so medsebojno zelo podobni, zato je na sliki 6.22 prikazan le model s stopnjo neurejenosti  $a = 0,2$ . Na sliki so prikazani poteki deformiranja pri treh različnih hitrostih obremenjevanja, in sicer  $\dot{\epsilon}_e = 1, 50$  in  $100 \text{ s}^{-1}$ . Iz slike je razvidna velika razlika v načinu deformiranja modela v odvisnosti od inženirske deformacijske hitrosti. Pri najnižji hitrosti se plastične cone pojavijo na različnih, najšibkejših mestih modela, medtem ko pri najvišji inženirski deformacijski hitrosti pride do sesedanja celic tik pod obremenitveno ploščo. Tako je pri obeh nižjih hitrostih obremenjevanja pri modelu na sliki opaziti dve glavni plastični coni pri stopnji deformacije  $\epsilon = 45 \%$ , eno v zgornji in eno v spodnji tretjini modela, pri najvišji hitrosti obremenjevanja pa teh dveh con ni, obstaja le deformacijska cona ob obremenitveni plošči. Razlog takšnega poteka deformiranja je visoka inženirska deformacijska hitrost, pri kateri se zaradi mase modela pojavi velika vztrajnostna sila v smeri nasproti hitrosti, katera poviša togost modela.

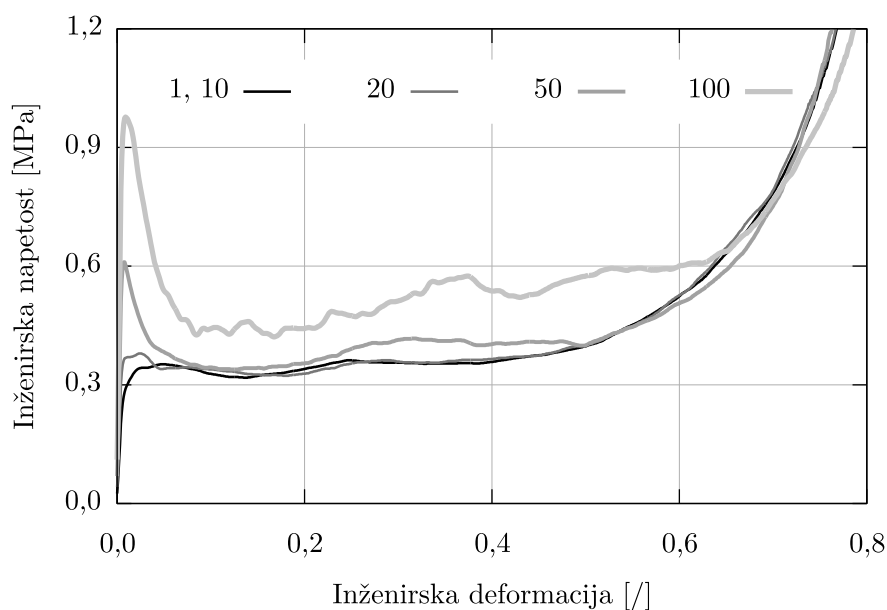
Vpliv inženirske deformacijske hitrosti na lastnosti odprto-celičnega gradiva je razviden iz slike 6.23, kjer so prikazane odvisnosti inženirske napetosti od inženirske deformacije pri vseh analiziranih inženirskih deformacijskih hitrostih. Krivulji napetosti pri hitrostih 1





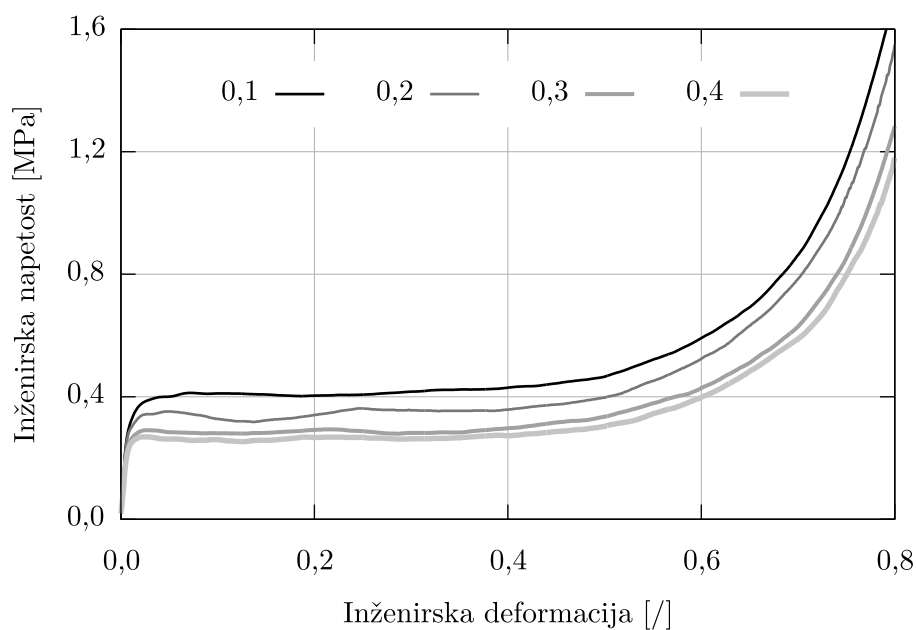
**Slika 6.22:** Potek deformiranja Weaire-Phelanovega modela stopnje neurejenosti  $a = 0,2$  v odvisnosti od inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e$  in inženirske deformacije  $\epsilon_e$

in  $10 \text{ s}^{-1}$  sta praktično enaki, zato sta na sliki prikazani z eno skupno krivuljo. Iz slike je razviden velik vpliv hitrosti obremenjevanja na togost odprto-celičnega gradiva. Predvsem opazna je razlika v prvem, elastičnem območju, nato pa razlika postopoma pada in nad stopnjo inženirske deformacije  $\varepsilon_e = 60 \%$  razlike izginejo. Razlika v prvem, elastičnem območju je predvsem posledica delovanja vztrajnostne sile na začetku obremenjevanja, medtem ko v področju konstantne napetosti vpliva tudi občutljivost osnovnega materiala celičnega gradiva na deformacijsko hitrost.

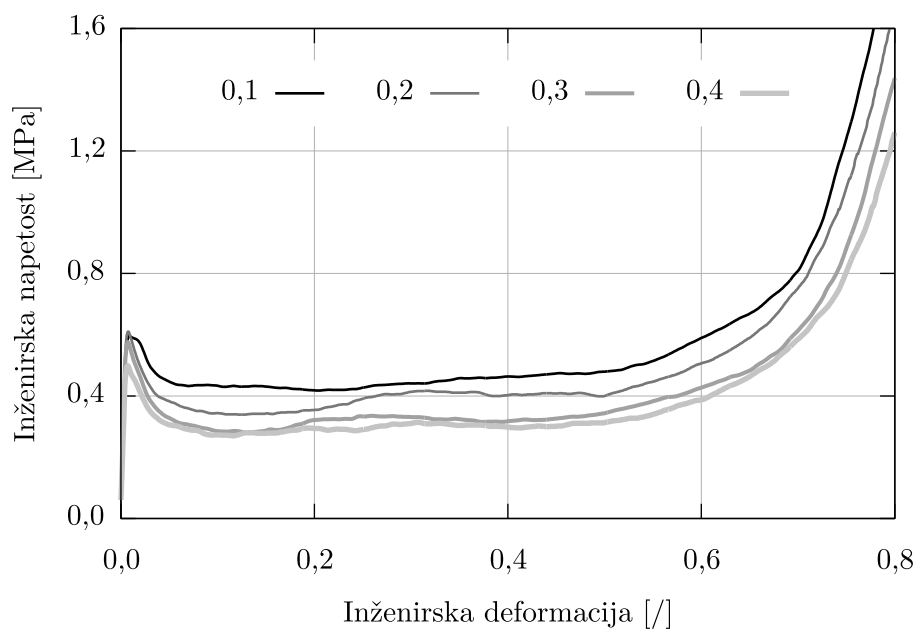


**Slika 6.23:** Odvisnost povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije za Weaire-Phelanov model pri analiziranih inženirskih deformacijskih hitrostih  $\dot{\varepsilon}_e$ ; stopnja neurejenosti  $a = 0,2$

Vpliv stopnje neurejenosti na obliko krivulje inženirske napetosti v odvisnosti od inženirske deformacije odprto-celičnega gradiva med tlačno deformacijo prikazujeta sliki 6.24 in 6.25. Krivulje inženirske napetosti pri ostalih inženirskih deformacijskih hitrostih vodijo do podobnih sklepov, zato niso prikazani. Iz slik je razvidno, da ima stopnja neurejenosti enak vpliv na lastnosti odprto-celičnega gradiva pri nizki in visoki deformacijski hitrosti. Namreč višja kot je neurejenost gradiva, nižja je njegova togost. Opazno je tudi, da so razlike med analiziranimi stopnjami neurejenosti na obeh slikah zelo podobne, večje so pri nižjih stopnjah neurejenosti in manjše pri višjih stopnjah neurejenosti. V elastičnem območju na sliki 6.25 so razlike med krivuljami napetosti manjše kot v preostalih območjih zaradi že omenjene vztrajnostne sile, katera ima največji vpliv prav na začetku deformiranja. Vzrok nižje togosti bolj neurejenih gradiv je večja razlika v velikostih in oblikah njihovih celic. Tako so tudi razlike med njihovimi nosilnostmi večje. Med deformiranjem takšne strukture celice z nižjo nosilnostjo hitreje popustijo in prenesejo svojo obremenitev na okoliške celice, kar posledično hitreje vodi do pojava sesedanja strukture v obliki ozkih lokalnih pasov.



**Slika 6.24:** Odvisnost povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije za Weaire-Phelanove modele pri analiziranih stopnjah neurejenosti  $a$ ; inženirska deformacijska hitrostih  $\dot{\epsilon}_e = 1$



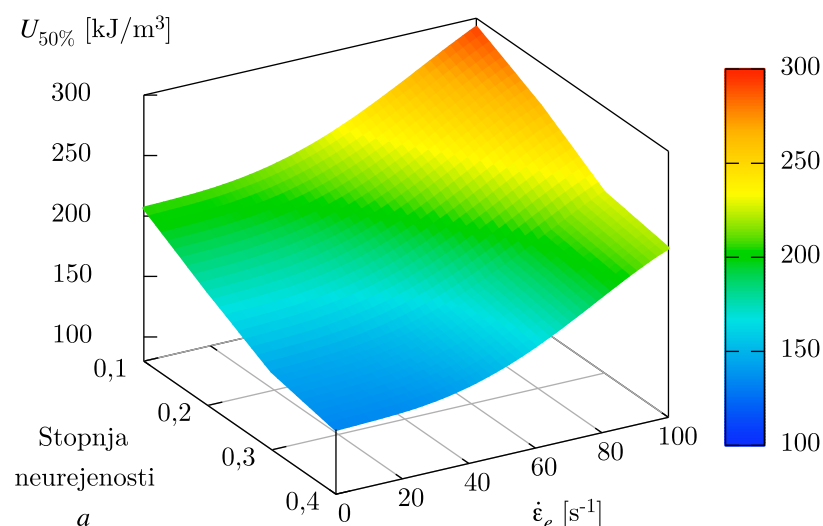
**Slika 6.25:** Odvisnost povprečne inženirske napetosti od inženirske deformacije za Weaire-Phelanove modele pri analiziranih stopnjah neurejenosti  $a$ ; inženirska deformacijska hitrostih  $\dot{\epsilon}_e = 50$

Za celovitejši vpogled vpliva deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv je bilo pri vseh izvedenih simulacijah izračunano z deformacijo absorbirano zunanje delo. Vrednosti absorbiranega dela so podane v preglednici 6.7 in grafično predstavljene na sliki 6.26. Iz preglednice in slike je razvidna obratno-sorazmerna odvisnost med stopnjo neurejenosti in z deformacijo absorbiranim delom ter premo-sorazmerna odvisnost med hitrostjo obremenjevanja in z deformacijo absorbiranim delom. Medtem ko je vpliv stopnje neurejenosti največji pri njenih nizkih vrednostih, vpliva hitrosti obremenjevanja pri nizkih vrednostih ni zaznati.

Vendar v tem primeru vrednosti inženirske deformacijske hitrosti, ki so brez večjega vpliva na obnašanje celičnega gradiva, znašajo do  $\dot{\epsilon}_e = 20 \text{ s}^{-1}$ , kar je v splošnem visoka inženirska deformacijska hitrost. V poglavju o rezultatih dinamičnih preizkusov (poglavje 5.2) je bil podan postopek za oceno vpliva deformacijske hitrosti na lastnosti osnovnega materiala celičnega gradiva po Cowper-Symondsovem modelu. Enak postopek uporabljen na primeru inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e = 20 \text{ s}^{-1}$  poda oceno, da je zaradi hitrosti obremenjevanja togost celičnega gradiva in s tem med deformacijo absorbirano delo više za dobrih 6 %. Vendar vrednosti v preglednici 6.7 tega vpliva ne potrjujejo. Vzrok je predpostavka uporabljena v oceni, da je celoten osnovni material celičnega gradiva obremenjen z enako deformacijsko hitrostjo. Vendar ta predpostavka ne drži. Zaradi strukture celičnega gradiva so dejanske deformacijske hitrosti v celičnem gradivu namreč nižje, kot je inženirska deformacijska hitrost, določena na podlagi hitrosti premikanja obremenitvene plošče in višine vzorca. Posledično je vpliv inženirske deformacijske hitrosti na lastnosti osnovnega materiala celičnega gradiva zanemarljiv in večji del vpliva inženirske deformacijske hitrosti na lastnosti samega celičnega gradiva predstavlja njegova masa.

**Preglednica 6.7:** Gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ ] v odvisnosti od inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e$  in stopnje neurejenosti  $a$

$\dot{\epsilon}_e$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	Stopnja neurejenosti $a$			
	0,1	0,2	0,3	0,4
1	206,76	174,33	144,84	133,48
10	207,43	175,21	145,70	134,42
20	208,95	177,08	147,29	135,78
50	225,89	196,52	164,18	152,87
100	292,68	264,25	229,33	219,98



**Slika 6.26:** Gostota z deformacijo absorbiranega dela  $U_{50\%}$  [kJ/m<sup>3</sup>] v odvisnosti od inženirske deformacijske hitrosti  $\dot{\epsilon}_e$  in stopnje neurejenosti

### Sklep

Poteki deformiranja odprto-celičnega gradiva pri različnih hitrostih obremenjevanja so pokazali njen vpliv na mehanizem porušitve celičnega gradiva. Pri nizkih hitrostih pride do pojava ločenih plastičnih con v obliki ozkih, lokalnih plasti celic, medtem ko pri visokih hitrostih obstaja le ena deformacijska plastična cona tik ob obremenitveni plošči. Takšno obnašanje 3D modela celičnega gradiva so na podlagi analiz z 2D Voronojevimi modeli in uporabo teorije širjenja napetostnih valov napovedali že Tan et al. [105]. Za 2D modele so namreč ugotovili, da ima največji vpliv na deformiranje pri nad-kritični hitrosti mikro-vztrajnost (vztrajnost posameznih robov celic), zaradi česar pride do pojava ene same plastične cone, lokalizirane na strani obremenitve. Rezultati predstavljene analize se tako dobro ujemajo z obstoječimi predpostavkami in jih dokazujejo tudi za prostorske modele neurejenih odprto-celičnih gradiv.

Analiza vpliva hitrosti obremenjevanja in stopnje neurejenosti na trdnostne lastnosti kovinskih odprto-celičnih gradiv med tlačno deformacijo je pokazala, da imata tako hitrost obremenjevanja kot tudi stopnja neurejenosti velik vpliv. Trdnostne lastnosti celičnega gradiva se namreč višajo z višanjem hitrosti obremenjevanja in nižanjem stopnje neurejenosti. Tako je za doseganje višje nosilnosti odprto-celičnih gradiv potrebno njihovo strukturo čim bolj približati ravnotežni strukturi pene.

Ta ugotovitev daje pomembne smernice proizvajalcem celičnih gradiv, kako povečati nosilnost celičnega gradiva tudi pri visokih deformacijskih stopnjah. Do sedaj je bilo namreč znano dejstvo, da imajo bolj urejene strukture višjo nosilnost pri nizkih stopnjah deformacije [106, 4], rezultati opravljene analize pa potrjujejo to relacijo tudi pri višjih deformacijskih stopnjah. Schulmeister et al. [7] so napovedali takšen vpliv stopnje neurejenosti pri

deformacijah do  $\varepsilon = 60 \%$ , na podlagi statičnih računalniških simulacij 3D Voronojevih modelov odprto-celičnih pen. Vendar so v svojih raziskavah uporabljali modele, v katerih kontakti niso bili upoštevani, zaradi česar niso mogli simulirati deformiranja celičnega gradiva v območju ponovne rasti togosti. Tako rezultati opravljene analize, v kateri so bili uporabljeni Weaire-Phelanovi modeli z upoštevanim notranjih kontaktov med robovi celic, potrjujejo predpostavko o vplivu neurejenosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv tudi za visoke stopnje deformacij v območju ponovne rasti togosti.

## 7 ZAKLJUČEK

### 7.1 Doseženi cilji in rezultati

Glavni cilj doktorske disertacije je bil razviti model neurejenih odprto-celičnih gradiv, kateri bi omogočal upoštevanje vpliva neurejenosti in različnih deformacijskih hitrosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv tudi pri velikih deformacijah ter tako združiti dve trenutno zelo aktualni področji v okviru inženirskih računalniških simulacij, in sicer področje modeliranja neurejenih celičnih gradiv in področje udarnih dinamičnih obremenitev.

Pred pripravo neurejenih modelov odprto-celičnih gradiv je bila izvedena obširna analiza geometrijske in topološke strukture realnih vzorcev odprto-celične aluminijeve pene m-pore, ki je služila kot osnova za kasnejšo izgradnjo modela. Analiza geometrije je bila narejena na osnovi sorazmernih rešetkastih modelov analiziranih vzorcev pene. Rešetkasti modeli so bili rekonstruirani iz 3D slik vzorcev pene, ki so bili narejeni s pomočjo računalniške tomografije. Zaradi velikega števila analiziranih vzorcev je bila za ta namen razvita programska oprema za avtomatizirano 3D analizo strukture odprto-celične pene.

S pomočjo razvite programske opreme je bilo analiziranih 20 vzorcev aluminijeve pene, v katerih je bilo prepoznanih skupno okrog 2000 celotnih celic, 40000 oken, 200000 notranjih kotov in 100000 robov. Na osnovi teh meritev je bila narejena statistična analiza, ki je dala pomemben vpogled v strukturo kovinskih pen. Izkazalo se je, da geometrijske lastnosti trdnih pen niso podobne teoretičnim, ampak imajo bogato in raznoliko porazdelitev osnovnih gradnikov. Porazdelitve volumnov celic in razmerij med najmanjšo in največjo prepoznano celico kažejo, da imajo analizirane pene močno različno velikost celic, saj niso ravnotežne strukture in se močno razlikujejo od urejenih struktur s tetrakaidekaedrično oziroma kubično osnovno celico, ki so služile kot osnova številnim raziskavam. Nadaljnje raziskave in modeliranje odprto-celičnih kovinskih pen morajo tako temeljiti na manj urejenih, bolj realnih strukturah, da bi izboljšali razumevanje odvisnosti makroskopskih lastnosti pen od njihove strukture, saj poenostavljeni modeli z reprezentativno enotsko celico težko opišejo njihove lastnosti.

Pridobljeni podatki statistične analize so bili uporabljeni za pripravo neurejenega modela odprto-celičnega gradiva, na osnovi Voronojeve delitve prostora. Uporabljena sta bila dva modela z urejeno razporeditvijo začetnih točk, in sicer model na osnovi Kelvinovih celic in model na osnovi Weaire-Phelanovih celic. Za določitev ustrezne stopnje neurejenosti  $a$  v obeh modelih je bila izvedena tudi statistična analiza geometrijskih in topoloških lastnosti obeh modelov.

Primerjava rezultatov statističnih porazdelitev geometrijskih lastnosti vzorcev aluminije-  
vih odprto-celičnih pen s Kelvinovim ter Weaire-Phelanovim modelom je bila izvedena

s pomočjo predlagane namenske funkcije. Rezultati primerjave so pokazali, da modeli osnovani na Weaire-Phelanovi delitvi prostora s stopnjo neurejenosti  $a = 0,2$  najboljše opišejo strukturo realnih pen. Pokazalo pa se je tudi pomembnejše dejstvo, da pri enaki stopnji neurejenosti Kelvinovega in Weaire-Phelanovega modela struktura slednjega bolje sovпада s strukturo analiziranih vzorcev, ne glede na vrednost stopnje neurejenosti.

Rezultati kažejo tudi veliko odstopanje lastnosti analiziranih pen od naključnih modelov pen, kar dokazuje, da trde pene niso popolnoma naključne strukture, ampak da na njihov nastanek močno vpliva fizikalno ozadje procesa penjenja. Ta ugotovitev skupaj z dejstvom, da se realne pene razlikujejo od idealiziranih teoretičnih pen, vzpodbuja k uporabi računalniških modelov, ki so v osnovi neurejeni in izhajajo iz Weaire-Phelanove delitve prostora. Vendar so do sedaj takšno delitev prostora za pripravo računalniškega modela pene uporabili le Daxner et al. [82], ki so proučevali mehanske lastnosti metaliziranih urejenih odprto-celičnih pen. Ostali avtorji so uporabljali urejene [83] ali neurejene Kelvinove modele [5, 76, 77, 78] in metode z neurejeno razporeditvijo začetnih točk [70, 72, 73, 74] (poglavje 4.1.1).

Z namenom validacije razvitega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva so bili izdelani kvazi-statični in dinamični eksperimentalni tlačni preizkusi vzorcev aluminijeve pene. Rezultati kvazi-statičnih preizkusov potrjujejo velik vpliv relativne gostote odprto-celičnega gradiva na njegove trdnostne lastnosti. Namreč višja kot je relativna gostota celičnega gradiva, višja je tudi njegova togost. Rezultati dinamičnih preizkusov to ugotovitev le potrdijo. Kljub veliki razliki v inženirski deformacijski hitrosti med obema načinoma obremenjevanja pa razlik v togosti celičnega gradiva med kvazi-statičnimi in dinamičnimi preizkusi ni bilo. Vzrok je predvsem v nizki vztrajnostni masi odprto-celičnih gradiv ter v nizki občutljivosti aluminija na deformacijsko hitrost [88, 89].

Na podlagi rešetkastega modela odprto-celičnega gradiva je bil razvit ustrezen numerični model, katerega validacija je bila izvedena s pomočjo primerjave rezultatov eksplicitnih dinamičnih simulacij in eksperimentov. Struktura modelov uporabljenih za validacijo je bila rekonstruirana iz vzorcev eksperimentalno preizkušene aluminijeve pene, tako so imeli računalniški modeli enako strukturo kot preizkušeni vzorci. Rezultati primerjave so pokazali dobro ujemanje oblik krivulj inženirskih napetosti v odvisnosti od inženirskih deformacij. Krivulje dobljene s pomočjo simulacij imajo namreč, tako kot eksperimentalno določene krivulje, vsa štiri značilna območja deformiranja celičnih gradiv, vključno z območjem ponovne rasti togosti pri višjih stopnjah deformacije. Razlike med simulacijami in eksperimenti so majhne na celotnem, širokem področju inženirske deformacije od  $\varepsilon_e = 0\%$  do  $80\%$ . Ob upoštevanju vseh poenostavitev, ki so bile uvedene pri pripravi modela neurejenega odprto-celičnega gradiva, in upoštevanju dejstva, da so bile materialne lastnosti osnovnega materiala modela povzete po literaturi, so te razlike zanemarljive.



Po validaciji numeričnega modela je bila izvedena še validacija modeliranja odprto-celičnih gradiv z Weaire-Phelanovim modelom, za pripravo katerih je bila uporabljena stopnja neurejenosti, pri kateri je struktura modela najbolj podobna strukturi vzorca. Za validacijo so bile narejene kvazi-statične in dinamične simulacije. Rezultati kvazi-statičnih simulacij kažejo dobro ujemanje med krivuljami in vrednostmi inženirskih napetosti v odvisnosti od inženirskih deformacij. Nekoliko večje so le razlike v elastičnem področju, kjer imajo Weaire-Phelanovi modeli odprto-celičnih gradiv višjo togost od preizkušancev. Vzrok je v idealizirani strukturi modelov, v kateri imajo vsi linijski končni elementi na robovih celic enake oblike in velikosti prereзов. Zaradi odsotnosti razlik med posameznimi robovi celic in odsotnosti ostalih napak v strukturi, ima idealizirana struktura višjo togost od realne strukture celičnih gradiv. Zaradi tega razviti računalniški model na osnovi Weaire-Phelanovih celic ne omogoča natančnega določanja modula elastičnosti odprto-celičnih gradiv. Vendar pa model zelo dobro napove obnašanje odprto-celičnega gradiva v območju konstantne napetosti in ponovne rasti togosti, kar opravičuje njegovo uporabo za izvajanje simulacij do velikih deformacij.

Vpliv deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti na obnašanje odprto-celičnih gradiv je bil narejen s pomočjo računalniških simulacij. Pokazal se je predvsem velik vpliv hitrosti obremenjevanja na mehanizem porušitve celičnega gradiva. Pri nizkih hitrostih obremenjevanja pride do pojava ločenih plastičnih con v obliki ozkih, lokalnih plasti celic, medtem ko pri visokih hitrostih obremenjevanja obstaja le ena deformacijska plastična cona tik ob obremenitveni plošči. Ti rezultati se ujemajo z obstoječimi opazovanji na podlagi simulacij 2D modelov in jih razširjajo tudi na prostorske modele neurejenih odprto-celičnih gradiv.

Analiza vpliva deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti na trdnostne lastnosti celičnega gradiva pokaže obratno-sorazmerna odvisnost med stopnjo neurejenosti in togostjo celičnega gradiva ter premo-sorazmerna odvisnost med deformacijsko hitrostjo in togostjo celičnega gradiva. Tako rezultati opravljene analize, v kateri so bili uporabljeni Weaire-Phelanovi modeli z upoštevanim notranjih kontaktov med robovi celic, potrjujejo obstoječe predpostavke o vplivu neurejenosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv tudi za velike deformacije v območju ponovne rasti togosti. Ta ugotovitev daje pomembne smernice proizvajalcem celičnih gradiv, kako povečati nosilnost celičnega gradiva tudi pri velikih deformacijah.

Izvirni znanstveni prispevki doktorske disertacije so naslednji:

- s pomočjo avtomatizirane metode analize strukture rekonstruiranih modelov aluminijevih pen je bilo dokazano, da kovinske pene niso ravnotežne strukture, zato se močno razlikujejo od urejenih struktur s tetrakaidekaedrično oziroma kubično osnovno celico;

- dokazano je, da se Weaire-Phelanova struktura dosti bolj približa strukturi realne kovinske pene kot Kelvinova struktura, pri enaki stopnji neurejenosti;
- razvit in validiran je bil model neurejenih odprto-celičnih gradiv, ki omogoča upoštevanje vpliva neurejenosti in deformacijske hitrosti na lastnosti odprto-celičnih gradiv tudi pri velikih deformacijah;
- z razvitim modelom so bile potrjene predpostavke o vplivu deformacijske hitrosti in stopnje neurejenosti na obnašanje odprto-celičnih gradiv pri velikih deformacijah.

## 7.2 Priporočila za nadaljnje delo

### **Analiza strukture vzorcev odprto-celičnih gradiv**

Za posplošitev predstavljenih rezultatov na odprto-celična gradiva drugih proizvajalcev je smiselno analizirati tudi njihovo strukturo ter jo statistično obdelati in vrednotiti. S pomočjo primerjave z opravljeno statistično analizo je na tak način mogoče določiti njihove skupne lastnosti in razlike.

### **Analiza prerezov robov celic**

Za izboljšanje razvitega numeričnega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva je potrebno izvesti slikanje vzorcev realnih odprto-celičnih pen s pomočjo računalniškega mikro-tomografa. Na tak način je mogoče natančneje analizirati geometrijske in topološke lastnosti strukture realnih odprto-celičnih gradiv. Analizirati je mogoče tudi oblike in velikosti prerezov realnih celičnih gradiv, jih statistično obdelati in upoštevati v modelu.

### **Analiza vpliva vzporednih plasti celic**

Za določitev vpliva opaženih vzporednih plasti celic v razvitih modelih odprto-celičnih gradiv, zaradi uporabljenega postopka priprave modelov z uporabo Voronojeve delitve prostora iz ravnotežne strukture, je potrebno opraviti nadaljnje analize. Dobljene strukture bi bilo potrebno obremeniti pod različnimi koti in analizirati vpliv rotacije strukture na njene trdnostne lastnosti.

### **Analiza napak**

Za izboljšanje razvitega numeričnega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva je smotrno izvesti analize oblike in frekvence prisotnosti napak v strukturi realnih celičnih gradiv. Tako dobljene podatke je nato potrebno statistično obdelati in jih upoštevati v modelu. Na tak način je mogoče določiti vplive napak na trdnostne lastnosti celičnih gradiv in identificirati napake z največjim vplivom.

## **Natezne obremenitve**

Razviti numerični model neurejenega odprto-celičnega gradiva je smiselno uporabiti tudi v simulacijah z nateznimi obremenitvami, jih primerjati z rezultati preizkusov in na podlagi primerjave model tudi izboljšati.

## **Vpliv porušitve osnovnega materiala**

Za izboljšanje razvitega numeričnega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva je potrebno v konstitutivnem modelu osnovnega materiala določiti ustrezen porušitveni kriterij in določiti njegov vpliv na rezultate simulacij.

## **Ekspirimenti z udarnimi obremenitvami**

Za validacijo razvitega numeričnega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva pri visokih deformacijskih hitrostih je smiselno opraviti visoko dinamične eksperimentalne preizkuse. Pri tem je potrebno preizkuse posneti z dovolj visoko hitrostjo snemanja, da je mogoče analizirati mehanizme porušitve odprto-celičnega gradiva tudi na realnih vzorcih.

## **Ekspirimentalno testiranje osnovnega materiala**

Za izboljšanje razvitega numeričnega modela neurejenega odprto-celičnega gradiva je potrebno izvesti tudi preizkuse trdnostnih lastnosti osnovnega materiala celičnega gradiva pri različnih deformacijskih hitrostih.

## **Večosno obremenjevanje**

Za pravilno določitev meje tečenja, ki je osnova za razvoj homogeniziranega modela neurejenih-odprto celičnih gradiv, je potrebno izvesti tudi dvo in večosne eksperimentalne preizkuse.

## **Ciklično obremenjevanje**

Potrebno je raziskati tudi vpliv cikličnih dinamičnih obremenitev na obnašanje odprto-celičnih gradiv in raziskati mehanizme, ki vodijo do njihove porušitve.



## Literatura

- [1] Gibson L., Ashby M. *Cellular solids: structure and properties - 2<sup>nd</sup> edition*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [2] Ashby M.F., Evans A., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N. *Metal foams: A design guide*. Burlington, Massachusetts: Elsevier Science, 2000.
- [3] Zhu H.X., Knott J.F., Mills N.J. Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (1997), vol. 45, no. 3, str. 319–325.
- [4] Zhu H.X., Windle A.H. Effects of cell irregularity on the high strain compression of open-cell foams. *Acta Materialia* (2002), vol. 50, no. 5, str. 1041–1052.
- [5] Li K., Gao X.L., Subhash G. Effects of cell shape and strut cross-sectional area variations on the elastic properties of three-dimensional open-cell foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (2006), vol. 54, no. 4, str. 783–806.
- [6] Simone A., Gibson L. Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams. *Acta Materialia* (1998), vol. 46, no. 6, str. 2139–2150.
- [7] Shulmeister V., Van der Burg M.W.D., Van der Giessen E., Marissen R. A numerical study of large deformations of low-density elastomeric open-cell foams. *Mechanics of Materials* (1998), vol. 30, no. 2, str. 125–140.
- [8] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science* (2001), vol. 46, no. 6, str. 559–632.
- [9] Evans A., Hutchinson J., Ashby M. Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science* (1998), vol. 43, no. 3, str. 171–221.
- [10] Sieradzki K., Green D.J., Gibson L.J. *Mechanical properties of porous and cellular materials*. Boston, Massachusetts: Materials Research Society, 1991.
- [11] Papadopoulos D., Konstantinidis I., Papanastasiou N., Skolianos S., Lefakis H., Tsipas D. Mechanical properties of Al metal foams. *Materials Letters* (2004), vol. 58, no. 21, str. 2574–2578.
- [12] Weaire D., Fortes M. Stress and strain in liquid and solid foams. *Advances in Physics* (1994), vol. 43, no. 6, str. 685–738.
- [13] Fusheng H., Jianning W., Hefa C., Junchang G. Effects of process parameters and alloy compositions on the pore structure of foamed aluminum. *Journal of Materials Processing Technology* (2003), vol. 138, no. 1-3, str. 505–507.

- [14] Shapovalov V. Porous metals. *MRS Bulletin* (1994), vol. 19, no. 4, str. 24–29.
- [15] Seitzberger M., Rammerstorfer F., Gradinger R., Degischer H., Blaimschein M., Walch C. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. *International Journal of Solids and Structures* (2000), vol. 37, no. 30, str. 4125–4147.
- [16] *Metal foam info* [svetovni splet]. Dostopno na WWW: <http://www.metalfoam.net/> [4. 4. 2007].
- [17] Altstädt V. Polymer foams - perspectives and trends. V: I. Emri, D. Kovačič (ur.). *7th International Workshop on Advances in Experimental Mechanics*, Portorož, Slovenia, 11. - 17. 8. 2002. Ljubljana: SEM - Center for Time Dependent Materials, 2002.
- [18] *Review of Industrial Survey on Metallic Foams* [svetovni splet]. Dostopno na WWW: [http://www.npl.co.uk/materials/metal\\_foams/pdf\\_files/industrial\\_review.pdf](http://www.npl.co.uk/materials/metal_foams/pdf_files/industrial_review.pdf) [4. 4. 2007].
- [19] Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams. *JOM* (2000), vol. 52, no. 12, str. 22–27.
- [20] Åsholt P. Aluminium foam produced by the melt foaming route - process, properties and applications. V: *Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam '99)*, Bremen, Germany, 14. - 16. 6. 1999. Verlag MIT Publishing, 1999, str. 133–140.
- [21] Prakash O., Sang H., Embury J.D. Structure and properties of Al-SiC foam. *Materials Science and Engineering* (1995), vol. 199, no. 2, str. 195 – 203.
- [22] Kenny L. Mechanical properties of particle stabilized aluminum foam. *Materials Science Forum* (1996), vol. 217-222, no. 3, str. 1883 – 1890.
- [23] Beals J.T., Thompson M.S. Density gradient effects on aluminium foam compression behaviour. *Journal of Materials Science* (1997), vol. 32, no. 13, str. 3595–3600.
- [24] *Cymat* [svetovni splet]. Cymat. Dostopno na WWW: <http://www.cymat.com/> [20. 11. 2008].
- [25] *Alporas* [svetovni splet]. Gleich. Dostopno na WWW: <http://www.gleich.de/> [20. 11. 2008].
- [26] Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A. Aluminium foam "Alporas": the production process, properties and applications. V: *Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam '99)*, Bremen, Germany, 14. - 16. 6. 1999. Verlag MIT Publishing, 1999, str. 125–132.

- [27] Ma L., Song Z. Cellular structure control of aluminium foams during foaming process of aluminium melt. *Scripta Materialia* (1998), vol. 39, no. 11, str. 1523 – 1528.
- [28] Baumgartner F., Duarte I., Banhart J. Industrialization of powder compact foaming process. *Advanced Engineering Materials* (2000), vol. 2, no. 4, str. 168 – 174.
- [29] Duarte I., Banhart J. Study of aluminium foam formation - kinetics and microstructure. *Acta Materialia* (2000), vol. 48, no. 9, str. 2349 – 2362.
- [30] Shapovalov V. Formation of ordered gas-solid structure via solidification in metal-hydrogen systems. V: *Porous and Cellular Materials for Structural Applications*, vol. 521, San Francisco, California, 13. - 15. 4. 1998. Materials Research Society, 1998, str. 281–288.
- [31] Yamada Y., Shimojima K., Sakaguchi Y., Mabuchi M., Nakamura M., Asahina T., Mukai T., Kanahashi H., Higashi K. Processing of cellular magnesium materials. *Advanced Engineering Materials* (2000), vol. 2, no. 4, str. 184 – 187.
- [32] *Duocel* [svetovni splet]. ERG Materials and Aerospace. Dostopno na WWW: <http://www.ergaerospace.com/> [19. 11. 2008].
- [33] Hintz C., Wagner I., Sahm P.R., Stoyanov P. Investment cast near net shape components based on cellular metal materials. V: *Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam '99)*, Bremen, Germany, 14. - 16. 6. 1999. Verlag MIT Publishing, 1999, str. 153–158.
- [34] Badiche X., Forest S., Guibert T., Bienvenu Y., Bartout J.D., Ienny P., Croset M., Bernet H. Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams: application of the mechanics of cellular solids and of porous materials. *Materials Science and Engineering A* (2000), vol. 289, no. 1-2, str. 276–288.
- [35] *Celmet* [svetovni splet]. Sumitomo electric industries. Dostopno na WWW: <http://www.sumitomoelectricusa.com/> [19. 11. 2008].
- [36] *Racemat* [svetovni splet]. Racemat International. Dostopno na WWW: <http://www.racemat.com/> [19. 11. 2008].
- [37] *Incofoam* [svetovni splet]. Inco Special Products. Dostopno na WWW: <http://www.incosp.com/> [19. 11. 2008].
- [38] Knüwer M. Pore formation during reactive sintering of iron-aluminium powder mixtures. V: *Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam '99)*, Bremen, Germany, 14. - 16. 6. 1999. Verlag MIT Publishing, 1999, str. 203–110.

- [39] Krueger B.R., Mutz A.H., Vreeland T. Shock-induced and self-propagating high-temperature synthesis reactions in two powder mixtures. *Metallurgical Transactions (Physical Metallurgy and Materials Science)* (1992), vol. 23A, no. 1, str. 55 – 58.
- [40] Miyoshi T., Itoh M., Mukai T., Kanahashi H., Kohzu H., Tanabe S., Higashi K. Enhancement of energy absorption in a closed-cell aluminum by the modification of cellular structures. *Scripta Materialia* (1999), vol. 41, no. 10, str. 1055–1060.
- [41] Rinde J.A., Hoge K.G. Time and temperature dependence of the mechanical properties of polystyrene bead foam. *Journal of Applied Polymer Science* (1971), vol. 15, no. 6, str. 1377–1395.
- [42] Mukai T., Kanahashi H., Miyoshi T., Mabuchi M., Nieh T.G., Higashi K. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading. *Scripta Materialia* (1999), vol. 40, no. 8, str. 921–927.
- [43] Mukai T., Kanahashi H., Yamada Y., Shimojima K., Mabuchi M., Nieh T.G., Higashi K. Dynamic compressive behavior of an ultra-lightweight magnesium foam. *Scripta Materialia* (1999), vol. 41, no. 4, str. 365–371.
- [44] Christ H.J., Krupp U., Ohrndorf A., Schmidt P. Mechanische untersuchungen eines geschlossenporigen aluminiumschaums. V: *Proceedings zur Werkstoffprüfung*, Bad Nauheim, Germany, 7. - 8. 12. 2000. Berlin: Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., 2000.
- [45] Shkolnikov B.M. Honeycomb modeling for side impact moving deformable barrier (MDB). V: *7th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn, Michigan, USA, 19. - 21. 5. 2002. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2002.
- [46] Dannemann K.A., Lankford J. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams. *Materials Science and Engineering A* (2000), vol. 293, no. 1-2, str. 157–164.
- [47] Vesenjāk M., *Računalniško modeliranje celičnih struktur pod vplivom udarnih obremenitev*. Doktorska disertacija, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, 2006.
- [48] Degischer H.P., Kriszt B. *Handbook of cellular metals*. Deutschland, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.
- [49] Plateau J. *Statique Experimentale et Theorique des Liquides Soumis aux Seules Forces Moleculaires*. Paris: Gauthier-Villars, 1873.
- [50] Rhodes M.B., Nathhorst R.P. Stereological analysis of foams with a computer interfaced optical microscope. American Institute of Chemical Engineers, National Meeting, Houston, TX, USA. AIChE, New York, NY, USA, 1985, str. 9.



- [51] Richardson M.O.W., Nandra D.S. Cell size determination of polymeric foams. *Cellular Polymers* (1986), vol. 5, no. 6, str. 423–431.
- [52] Hamza R., Zhang X.d., Macosko C.W., Stevens R., Listemann M. Imaging open cell foam via confocal microscopy. vol. 37 od *American Chemical Society, Polymer Preprints*, Orlando, FL, USA, 25. - 30. 8. 1996. ACS, Washington, DC, USA, 1996, str. 803–804.
- [53] Gonatas C.P., Leigh J.S., Yodh A.G., Glazier J.A., Prause B. Magnetic resonance images of coarsening inside a foam. *Physical Review Letters* (1995), vol. 75, no. 3, str. 573.
- [54] Montminy M.D., Tannenbaum A.R., Macosko C.W. The 3D structure of real polymer foams. *Journal of Colloid and Interface Science* (2004), vol. 280, no. 1, str. 202–211.
- [55] Kose K. 3D NMR imaging of foam structures. *Journal of Magnetic Resonance - Series A* (1996), vol. 118, no. 2, str. 195.
- [56] Monnereau C., Vignes-Adler M. Optical tomography of real three-dimensional foams. *Journal of Colloid and Interface Science* (1998), vol. 202, no. 1, str. 45–53.
- [57] Cenens J., Huis R., Chauvaux B., Dereppe J.M., Gratin C., Meyer F. 3D cellular structure characterization of flexible polyurethane foam. vol. 53 od *American Society of Mechanical Engineers, Materials Division (Publication) MD*, Chicago, IL, USA, 6. - 11. 11. 1994. ASME, New York, NY, USA, 1994, str. 29–44.
- [58] *m-pore* [svetovni splet]. m-pore. Dostopno na WWW: <http://www.m-pore.de/index.html> [27. 1. 2009].
- [59] Kos L., *Distribuirani sistem za upodabljanje tridimenzionalnih objektov*. Doktorska disertacija, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 1995.
- [60] *NVIDIA CUDA* [svetovni splet]. Nvidia. Dostopno na WWW: [http://www.nvidia.com/object/cuda\\_get.html](http://www.nvidia.com/object/cuda_get.html) [27. 1. 2009].
- [61] Xie W., Thompson R.P., Perucchio R. A topology-preserving parallel 3D thinning algorithm for extracting the curve skeleton. *Pattern Recognition* (2003), vol. 36, no. 7, str. 1529–1544.
- [62] Bang-Jensen J., Gutin G. *Digraphs: Theory, Algorithms and Applications*. London: Springer, 2002.

- [63] Montminy M.D., Tannenbaum A.R., Macosko C.W. New algorithms for 3D imaging and analysis of open-celled foams. *Journal of Cellular Plastics* (2001), vol. 37, no. 6, str. 501–515.
- [64] Thompson (Lord Kelvin) W. On the division of space with minimum partitioned area. *Philosophical Magazine* (1887), vol. 24, no. 151, str. 503–514.
- [65] Weaire D., Phelan R. A counterexample to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. *Philosophical Magazine Letters* (1994), vol. 69, str. 107–110.
- [66] Taylor J.E. The structure of singularities in soap-bubble-like and soap-film-like minimal surfaces. *The Annals of Mathematics* (1976), vol. 103, no. 3, str. 489–539.
- [67] Okabe A., Boots B., Sugihara K., Chiu S.N. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2000.
- [68] O'Rourke J. *Computational Geometry in C, Second Edition*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [69] Weaire D., Kermode J.P., Wejchert J. On the distribution of cell area in a Voronoi network. *Philosophical Magazine B* (1986), vol. 53, str. 101–105.
- [70] Chen C., Lu T.J., Fleck N.A. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (1999), vol. 47, no. 11, str. 2235–2272.
- [71] Lu T.J., Chen C. Thermal transport and fire retardance properties of cellular aluminium alloys. *Acta Materialia* (1999), vol. 47, no. 5, str. 1469–1485.
- [72] Silva M.J., Hayes W.C., Gibson L.J. The effects of non-periodic microstructure on the elastic properties of two-dimensional cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences* (1995), vol. 37, no. 11, str. 1161–1177.
- [73] Silva M.J., Gibson L.J. The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences* (1997), vol. 39, no. 5, str. 549–563.
- [74] Kraynik A.M., Reinelt D.A., van Swol F. Structure of random foam. *Physical Review Letters* (2004), vol. 93, no. 20, str. 208301–208305.
- [75] Huang J.S., Gibson L.J. Creep of open-cell Voronoi foams. *Materials Science and Engineering A* (2003), vol. 339, no. 1-2, str. 220–226.

- [76] Roberts A.P., Garboczi E.J. Elastic moduli of model random three-dimensional closed-cell cellular solids. *Acta Materialia* (2001), vol. 49, no. 2, str. 189–197.
- [77] Roberts A.P., Garboczi E.J. Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (2002), vol. 50, no. 1, str. 33–55.
- [78] Gan Y.X., Chen C., Shen Y.P. Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams. *International Journal of Solids and Structures* (2005), vol. 42, no. 26, str. 6628–6642.
- [79] Kusner R., Sullivan J.M. Comparing the Weaire-Phelan equal-volume foam to Kelvin's foam. *Forma* (1996), vol. 11, no. 3, str. 233–242.
- [80] Sands D.E. *Introduction to Crystallography*. Dover, New York: Dover Publications, 1993.
- [81] *Qhull* [svetovni splet]. Dostopno na WWW: <http://www.qhull.org/> [19. 11. 2008].
- [82] Daxner T., Bitsche R.D., Bohm H.J. Micromechanical models of metallic sponges with hollow struts. V: *Materials Science Forum*, vol. 539-543, Stafa-Zuerich, CH-8712, Switzerland, 2007, str. 1857 – 1862.
- [83] Zhu H.X., Mills N.J. Modelling the creep of open-cell polymer foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (1999), vol. 47, no. 7, str. 1437 – 1457.
- [84] *FastTrack<sup>TM</sup> 8800 Desktop Controller Technical Data Book*. Norwood: Instron, 2002.
- [85] Matutinović Ž. *Inženjerski priručnik*. Zagreb: Školska knjiga, 1996.
- [86] Spivak M. *Calculus: Third Edition*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [87] Ren Z., Glodež S. *Strojni elementi I. del*. Maribor: Založništvo Fakultete za strojništvo, 2003.
- [88] Karagiozova D., Nurick G.N., Chung Kim Yuen S. Energy absorption of aluminium alloy circular and square tubes under an axial explosive load. *Thin-Walled Structures* (2005), vol. 43, no. 6, str. 956–982.
- [89] Song W.Q., Beggs P., Easton M. Compressive strain-rate sensitivity of magnesium-aluminum die casting alloys. *Materials & Design* (2009), vol. 30, no. 3, str. 642–648.
- [90] Zienkiewicz G., Taylor R. *Finite element method. Volume 1. The basis*. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2000.

- [91] Van der Burg M.W.D., Shulmeister V., Van der Geissen E., Marissen R. On the linear elastic properties of regular and random open-cell foam models. *Journal of Cellular Plastics* (1997), vol. 33, no. 1, str. 31–54.
- [92] *LS-DYNA* [svetovni splet]. Livermore Software Technology Corporation. Dostopno na WWW: <http://www.lstc.com/lsdyna.htm> [19. 11. 2008].
- [93] Ren Z., *Progressive fracturing under dynamic loading conditions*. Doktorska disertacija, Swansea University, 1993.
- [94] Borovinšek M. *Numerična analiza naleta osebnega vozila v cestno varnostno ograjo*. Diplomsko delo, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, 2004.
- [95] Paul J., Lee G. (ur.) *An explicit finite element primer*. Glasgow: NAFEMS Ltd, 2002.
- [96] Hosford W. *Mechanical behaviour of materials*. Cambridge University Press, 2005.
- [97] Ulbin M., *Prispevek k raziskavi kontaktnih problemov na zobnikih z metodo končnih elementov*. Doktorska disertacija, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, 1996.
- [98] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2007.
- [99] Hallquist J.O. *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [100] Hallquist J.O. *LS-DYNA theoretical manual*. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [101] Kaufman G.J., Rooy E.L. *Aluminum alloy castings properties, processes and applications*. Cleveland, Ohio: ASM International, 2004.
- [102] Berski S., Dyja H., Maranda A., Nowaczewski J., Banaszek G. Analysis of quality of bimetallic rod after extrusion process. *Journal of Materials Processing Technology* (2006), vol. 177, no. 1-3, str. 582 – 586.
- [103] Hitchings D. (ur.) *A finite element dynamics primer*. Glasgow: NAFEMS Ltd, 1992.
- [104] Borovinšek M., Ren Z. Effects of strut cross-sectional area variations on impact behaviour of open-cell metallic foams. 9<sup>th</sup> USNCCM, San Francisco, California, 22. - 26. 7. 2007, 2007.

- [105] Tan P.J., Reid S.R., Harrigan J.J., Zou Z., Li S. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part II - shock theory and comparison with experimental data and numerical models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (2005), vol. 53, no. 10, str. 2206–2230.
- [106] Zhu H.X., Hobdell J.R., Windle A.H. Effects of cell irregularity on the elastic properties of 2D Voronoi honeycombs. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (2001), vol. 49, no. 4, str. 857–870.



# BIBLIOGRAFIJA

## ČLANKI IN DRUGI SESTAVNI DELI

### 1.01 Izvirni znanstveni članek

1. LERHER, Tone, ŠRAML, Matjaž, KRAMBERGER, Janez, POTRČ, Iztok, BOROVINŠEK, Matej, ZMAZEK, Blaž. Analytical travel time models for multi aisle automated storage and retrieval systems. *Int. j. adv. manuf. technol.*, Available online 11. November 2005, [17] f. [HTTP://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-0061-6](http://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-0061-6). [COBISS.SI-ID 10012950]
2. BOROVINŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Simulacija naleta tovornega vozila ob cestno varnostno ograjo = Simulating the impact of a truck on a road-safety barrier. *Stroj. vestn.*, 2006, letn. 52, št. 2, str. 101-111. [COBISS.SI-ID 9188635]
3. BOROVINŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers. *Eng fail. anal.* [Print ed.], 2007, vol. 14, iss. 8, str. 1711-1718. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.068>. [COBISS.SI-ID 11430934]
4. BOROVINŠEK, Matej, REN, Zoran. Computational modelling of irregular open-cell foam behaviour under impact loading. *Mater.wiss. Werkst.tech.*, Feb. 2008, vol. 39, iss. 2, str. 114-120. <http://dx.doi.org/10.1002/mawe.200700270>. [COBISS.SI-ID 12117782]

### 1.08 Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci

5. BOROVINŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Parametric analyses of truck impact into road safety barrier. V: KUHN, Günther (ur.), REN, Zoran (ur.), ŠKERGET, Leopold (ur.), HRIBERŠEK, Matjaž (ur.). 2. Workshop on Advanced Computational Engineering Mechanics, Erlangen, June 30- July 2, 2005. *Advanced computational engineering mechanics : proceedings of the 2. Workshop, Erlangen, Germany, June 30 - July 2, 2005*. Erlangen: Chair of Applied Mechanics, Friedrich-Alexander University, cop. 2005, str. 143-150. [COBISS.SI-ID 9729302]
6. BOROVINŠEK, Matej, ŽEROVNIK, Janez. Local optimization applied to a volunteer timetabling problem. V: ZADNIK STIRN, Lidija (ur.), DROBNE, Samo (ur.). *The 8th International Symposium on Operational Research in Slovenia, Nova Gorica, Slovenia, September 28-30, 2005. SOR '05 proceedings*. Ljubljana: Slovenian Society Informatika (SDI), Section for Operational Research (SOR), 2005, str. 57-62. [COBISS.SI-ID 9848598]
7. BOROVINŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Simulacija naleta tovornega vozila ob cestno varnostno ograjo. V: FAJDIGA, Matija (ur.), KLEMENC, Jernej (ur.), KOSTANJEVEC, Andrej (ur.). 7. konferenca in razstava Inovativna

avtomobilska tehnologija IAT'05 Bled (Slovenija), 21. - 22. april 2005. Zbornik referatov, (IAT, Inovativna avtomobilska tehnologija). Ljubljana: ULJ-FS-LAVEK: ZSIS-SVM, 2005, str. 85-93. [COBISS.SI-ID 9533974]

8. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Lattice modelling of metallic foams. V: MATEJIČEK, Franjo (ur.). Extended abstracts & proceedings of the 5th International congress of Croatian society of mechanics, Trogir, Croatia, September 21-23, 2006. Zagreb: Croatian Society of Mechanics, 2006, p146 (8 str.). [COBISS.SI-ID 10683926]

9. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Simulation of road safety barrier crash tests. V: MATEJIČEK, Franjo (ur.). Extended abstracts & proceedings of the 5th International congress of Croatian society of mechanics, Trogir, Croatia, September 21-23, 2006. Zagreb: Croatian Society of Mechanics, 2006, p147 (8 str.). [COBISS.SI-ID 10684438]

10. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Lattice modelling of cellular structures. V: TOPPING, Barry H. V. (ur.), MONTERO, G. (ur.), MONTENEGRO, R. (ur.). Proceedings of the eighth International conference on computational structures technology, Las Palmas de Gran Canaria-Spain, 12-15 September 2006. Stirling: Civil-Comp, cop. 2006, paper 59 (10 str.). [COBISS.SI-ID 10681366]

11. BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, ALZAHABI, B., REN, Zoran. Crash simulations of road safety barriers using LS-DYNA on MPP computing platforms. V: TOPPING, Barry H. V. (ur.), MONTERO, G. (ur.), MONTENEGRO, R. (ur.). Proceedings of the fifth International conference on engineering computational technology, Las Palmas de Gran Canaria, 12-15 September 2006. Stirling: Civil-Comp press, cop. 2006, paper 207 (10 str.). [COBISS.SI-ID 10679062]

12. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Crash simulations with LS-DYNA. V: KOJIĆ, Miloš (ur.), PAPADRAKAKIS, Manolis (ur.). First South-East European Conference on Computational Mechanics - SEECM'06, 28-30 June 2006, Kragujevac, Serbia. Proceedings. Kragujevac: University, 2006, str. 482-487. [COBISS.SI-ID 10554902]

13. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Modeliranje celičnih materialov z rešetkastimi strukturami. V: KORELC, Jože (ur.), ZUPAN, Dejan (ur.). Kuhljevi dnevi 2006, Lipica, 21.-22. september 2006. Zbornik del. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, 2006, str. 17-24. [COBISS.SI-ID 10706710]

14. VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Computational simulations of road safety barriers using LS-DYNA. V: 6. LS-DYNA forum, 11. - 12. Oktober 2007, Frankenthal. Stuttgart: DYNAmore, cop. 2007, str. B-3/11-18. [COBISS.SI-ID 11768086]

15. BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Simulacije testiranja cestnih varnostnih ograj za visok nivo zadrževanja. V: FAJDIGA, Matija (ur.),



KLEMENC, Jernej (ur.), ZALAZNIK, Aleš (ur.), TRENC, Ferdinand (ur.). 8. konferenca in razstava Inovativna avtomobilska tehnologija IAT'07, Rogla Slovenija, 10.-11. maj 2007. Zbornik referatov, (IAT, Inovativna avtomobilska tehnologija). Ljubljana: ULJ-FS-LAVEK, cop. 2007, str. 1-8. [COBISS.SI-ID 11303958]

16. BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, MATELA, Jože, REN, Zoran. Struktura realne kovinske pene. V: BOLTEŽAR, Miha (ur.), SLAVIČ, Janko (ur.). Kuhljevi dnevi 2008, Cerklje na Gorenjskem, 25.-26. sept. 2008. Zbornik del. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, 2008, str. 33-30. <http://www.drustvozamehaniko.si/zbornik/ZbornikKD2008.pdf>. [COBISS.SI-ID 12630038]

### 1.09 Objavljeni strokovni prispevek na konferenci

17. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran, ULBIN, Miran, VESENJAK, Matej. Vloga računalniških simulacij v konstruiranju cestnih varnostnih ograj. V: GOSTINČAR, Andreja (ur.). 8. slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 25.-27. oktobra 2006. Zbornik referatov. Ljubljana: DRC - Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, 2006, str. 275-282. [COBISS.SI-ID 10883606]

18. BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Analiza naleta osebnega in tovornega vozila ob cestno varnostno ograjo. V: Cimosov forum : 3. zbornik referatov, 16. november 2007. Koper: Cimos, 2007, str. 165-169, ilustr. [COBISS.SI-ID 11896342]

19. BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, MATELA, Jože, REN, Zoran. Analiza kovinske pene s pomočjo računalniške tomografije. V: CIMERMAN, Franc (ur.). Druga konferenca inženirjev strojništva Slovenije in Plinski tehnološki forum, Portorož, 11 in 12 november, 2008. Korak naprej : zbornik konference. Ljubljana: Zveza strojnih inženirjev Slovenije, 2008, str. 111-118. [COBISS.SI-ID 12817942]

### 1.12 Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci

20. BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, REN, Zoran. Simulation of road safety barrier crash tests for high containment levels. V: Second International conference on engineering failure analysis ICEFA-II, Tuesday 12 - Friday 15 Septembre 2006, Toronto Marriot Downtown Eaton Centre hotel, Canada. Delegate manual. [Amsterdam]: Elsevier, 2006, str. O5.2. [COBISS.SI-ID 10795798]

21. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Computational modelling of irregular open-cell foam behaviour under impact loading. V: ÖCHSNER, Andreas (ur.), REN, Zoran (ur.), SILVA, Lucas da (ur.). International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting ACE-X 2007, 12-13 July, Algarve, Portugal. Abstract book. [S.l.: Ironix Global Events Consulting], 2007, str. 47. [COBISS.SI-ID 11524886]

22. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Effects of cell irregularity on the impact behaviour of open-cell foams. V: MetFoam 2007 : program & abstracts. [S.l.: s.n.], 2007, str. 52. [COBISS.SI-ID 11683862]
23. BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran. Effects of stut cross-sectional area variations on impact behaviour of open-cell metallic foams. V: 9th US National Congress on Computational Mechanics, San Francisco, July 22-26, 2007. USNCCM IX. [Berkeley: University of California], 2007, str. 167. [COBISS.SI-ID 11521814]
24. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej, ULBIN, Miran, VESENJAK, Matej. Crash simulations of road safety barriers for high containment levels. V: 9th US National Congress on Computational Mechanics, San Francisco, July 22-26, 2007. USNCCM IX. [Berkeley: University of California], 2007, str. 259. [COBISS.SI-ID 11521558]

## MONOGRAFIJE IN DRUGA ZAKLJUČENA DELA

### 2.02 Strokovna monografija

25. VESENJAK, Matej, VOHAR, Bojan, BOROVIŠEK, Matej. Računalniško konstruiranje avtomobilskih delov : [Noč raziskovalcev 2007]. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007. 55 str., ilustr. [COBISS.SI-ID 11694614]

### 2.11 Diplomsko delo

26. BOROVIŠEK, Matej. Numerična analiza naleta osebnega vozila v cestno varnostno ograjo : diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa, (Fakulteta za strojništvo, Diplomski dela univerzitetnega študija). Maribor: [M. Borovinšek], 2004. IX, 69 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9203990]

### 2.12 Končno poročilo o rezultatih raziskav

27. VESENJAK, Matej, KRSTULOVIĆ-OPARA, Lovre, REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej, DOMAZET, Željko, ALUJEVIĆ, Neven. Modeliranje in razvoj materialov z odprto celično strukturo : znanstveno tehnološko sodelovanje s Hrvaško, 2007-2008 = Modelling and development of materials with open cellular structure : Slovenia-Croatia cooperation in science and technology, 2007-2008, project report. Maribor: Fakulteta za strojništvo; Split: FESB, 2009. [5] f. [COBISS.SI-ID 13027862]
28. ULBIN, Miran, PLEŠEK, Dušan, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej, REN, Zoran, ŠRAML, Matjaž, KRAMBERGER, Janez, GABRIEL, Dušan, PLEŠEK, Jiří, POŽVILOVA, Alena, HRUBÝ, Zbyněk, LUKEŠ, Vladimír. Numerične simulacije širjenja napetostnih valov v trdninah in poroznih materialih = Numerical simulation of stress

wave propagation in solids and porous media : zaključno poročilo o izvajanju slovensko-češkega bilateralnega projekta med leti 2007-2008. Maribor: Fakulteta za strojništvo; Praha: Ústav Termomechaniky AVČR, 2009. 4 f. [COBISS.SI-ID 12948246]

### 2.13 Elaborat, predstudija, študija

29. REN, Zoran, ULBIN, Miran, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej. Deformacijska analiza varnostne ograje H1 z vodilom pri naletu vozila TB11 in TB42 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2004. 12 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 9108246]

30. REN, Zoran, ULBIN, Miran, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej. Deformacijska analiza varnostne ograje H1s pasnico pri naletu vozil TB11 in TB42 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2004. 12 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 9108502]

31. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, ULBIN, Miran, BOROVIŠEK, Matej. Deformacijska analiza varnostne ograje N2 pri naletu vozila TB32 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2004. 9 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 8938262]

32. REN, Zoran, GUBELJAK, Nenad, PREDAN, Jožef, BELŠAK, Aleš, BOROVIŠEK, Matej. Preizkušanje vijačnih zvez cestne varnostne ograje. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2004. [18] f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 8724246]

33. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level H1 (EN-1317) of safety barrier DOT/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Aug. 2005. 13 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9809430]

34. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level H1 (EN-1317) of safety barriers DDOT/4/1,33 and DDOT/4/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005. 17 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9548566]

35. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level H1 (EN-1317) of safety barriers JDOT/4, JDOT/2 and JDOT/1,33. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005. 20 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9538838]

36. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level H2 (EN-1317) of safety barrier 2xJDOT/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Oct. 2005. 13 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9974294]

37. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level H2 (EN-1317) of safety barriers 2xDDOT. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Nov. 2005. 19 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 10026774]

38. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level N2 (EN-1317) of safety barrier JOT/4. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Aug. 2005. 12 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9809686]
39. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H3 (EN-1317) of safety barrier JDOT/2+2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Dec. 2005. 13 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 10118934]
40. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej. Deformacijska analiza varnostne ograje H1 različnih višin pri naletu vozila TB11 in TB42 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2005. 20 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 9329686]
41. REN, Zoran, GUBELJAK, Nenad, PREDAN, Jožef, BOROVIŠEK, Matej. Izveštaj o ispitivanju vijka M10x25-4.6 [naročnik Dalekovod d.d., Zagreb]. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za strojne elemente in konstrukcije, 2005. [6] f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 9827862]
42. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej. Primerjalna analiza napetosti in deformacij v gumijastem ležaju. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005. 8 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 9385494]
43. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H3 (EN-1317) of safety barrier 2+1xJDOT/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, May 2006. 13 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 10462742]
44. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level N2 (EN-1317) of safety barrier JOT/4 with connecting sleeve [project ordered and financed by Dalekovod, Zagreb]. Maribor: Fakulteta za strojništvo: = Faculty of mechanical engineering, Laboratory for advanced computational engineering, Institute of structures and design, Mar. 2006. 12 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 10256918]
45. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulations of safety barrier 2XDDOT/2 transition zone impact tests for containment level H2 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, June 2006. 8 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11235862]
46. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Deformacijska analiza konstrukcijskih variant varnostne ograje H2 pri naletu vozil TB11 in TB51 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2006. 2 zv., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 10304534]
47. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej, VESENJAK, Matej. Deformacijska analiza varnostne ograje H2 z jekleno vrvjo pri naletu vozil TB11 in TB51 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2006. [16] f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 10192918]

48. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H2 (EN-1317) of safety barrier 2xJDOO/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, February 2007. 9 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11098134]
49. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H2 (EN-1317) of safety barrier DDOT/2/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. [10] f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11288598]
50. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H2 (EN-1317) of safety barrier JDOT/2 - triplewave guardrail. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. [10] f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11288854]
51. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H3 (EN-1317) of safety barrier 3XJDOO/1, 33. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. 9 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11289366]
52. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H3 (EN-1317) of safety barrier 3XJDOO/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. [10] f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11339030]
53. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H3 (EN-1317) of safety barrier 3XJDOT/1, 33. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. 9 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11289110]
54. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Computational simulations of impact tests for containment level H3 (EN-1317) of safety barrier 3XJDOT/2. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. [10] f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11338774]
55. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Evaluation of load-carrying capability of anchoring plate for safety barrier 2+1xJDOO/2 and containment level H3 (EN-1317). Maribor: Fakulteta za strojništvo, February 2007. [8] f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11078934]
56. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej. Evaluation of load-carrying capability of modified anchoring plate design for mounting safety barrier 3xJDOO/2 (H3 : EN-1317) on reconstructed object. Maribor: Fakulteta za strojništvo, April 2007. 9 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11219990]
57. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŃSEK, Matej. Razvoj jeklene varnostne ograje skladne s standardom SIST EN 1317 za nivo zadrževanja H2 - 3. del. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2007. 27 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11797526]
58. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŃSEK, Matej. Razvoj jeklene varnostne ograje skladne s standardom SIST EN 1317 za nivo zadrževanja H2 - Trasa. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2007. 23 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 11797270]

59. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Computational simulation of impact tests for containment level H2 (EN-1317) of upgraded safety barrier JDOT/2-H1. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Mar. 2008. 13 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12463126]
60. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŠEK, Matej. Deformacijska analiza konstrukcijskih variant cestne varnostne ograje H2-objekt. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, 2008. 28 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12153878]
61. REN, Zoran, GLODEŽ, Srečko, TAŠNER, Frančišek, BOROVIŠEK, Matej, GAČNIK, Franci. Razvoj gonila za univerzalni gospodinjski aparat MUM5. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Inštitut za konstrukterstvo in oblikovanje, 2008. 33 f., graf. prikazi. [COBISS.SI-ID 12722454]
62. REN, Zoran, ULBIN, Miran, BOROVIŠEK, Matej. Trdnostna analiza glave gonilnika HE Blanca, (Kontrola tehničnih izračunov dobaviteljev strojne opreme za HE Blanca). Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2008. 16 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12936982]
63. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej. Trdnostna analiza gonilne lopate gonilnika HE Blanca LIBL - 7S 1080, (Kontrola tehničnih izračunov dobaviteljev strojne opreme za HE Blanca in HE Krško). Maribor: Fakulteta za strojništvo, Inštitut za konstrukterstvo in oblikovanje, 2008. 19 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12722966]
64. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej, VOLK, Mihael. Trdnostna analiza pola komplet - računski model na osnovi MKE KHBL - 7S0008A [naročnik projekta: Holding Slovenske elektrarne d.o.o.], (Kontrola tehničnih izračunov dobaviteljev strojne opreme za HE Blanca in HE Krško). Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2008. 34 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12037398]
65. REN, Zoran, BOROVIŠEK, Matej, GAČNIK, Franci. Trdnostni izračun turbinskega pokrova z zgornjim vodilniškim obročem LIBL 7S 1100 [naročnik projekta: Holding Slovenske elektrarne d.o.o.], (Kontrola tehničnih izračunov dobaviteljev strojne opreme za HE Blanca in HE Krško). Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2008. 34 f., ilustr. [COBISS.SI-ID 12089366]

## 2.21 Programska oprema

66. LERHER, Tone, POTRČ, Iztok, KRAMBERGER, Janez, ŠRAML, Matjaž, BOROVIŠEK, Matej. Program za računalniško podprto načrtovanje regalnih skladiščnih sistemov. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005. 1 CD-ROM. Velikost 139 MB; PC Pentium 1600MHZ ali višji, Windows NT, Windows XP. [COBISS.SI-ID 9594902]

## IZVEDENA DELA (DOGODKI)

### 3.14 Predavanje na tuji univerzi

67. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŃSEK, Matej. Computational assesment of road safety barriers : lecture presented at the University of Salford, Centre for Engineering Materials, July 6, 2006. Salford, 2006. [COBISS.SI-ID 11106070]

68. REN, Zoran, VESENJAK, Matej, BOROVIŃSEK, Matej. Computational and experimental verification of roadside safety barrier designs in Europe : lecture presented at Oska University, the Institute of Scientific and Industrial Research, on March 5, 2007. Osaka, 2007. [COBISS.SI-ID 11177494]

69. VESENJAK, Matej, BOROVIŃSEK, Matej. Dynamic computational simulations in automotive engineering : lecture presented at the Mechanical Engineering Department, Kettering University, Flint, Michigan, USA, on August 29, 2007. Flint, 2007. [COBISS.SI-ID 11679510]

### 3.15 Prispevek na konferenci brez natisa

70. BOROVIŃSEK, Matej, VESENJAK, Matej, REN, Zoran. Computational evaluation of road safety barriers with LS-DYNA : lecture presented at the DYNAmore event "LS-DYNA - a simulation tool for nonlinear structural analysis: overview and applications", 28th October 2005, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Slovenia. Maribor, 2005. [COBISS.SI-ID 9973782]

71. REN, Zoran, BOROVIŃSEK, Matej, VESENJAK, Matej. Uporaba jeklenih varnostnih ograj v Sloveniji do sedaj in v bodoče : strokovno predavanja na srečanju podjetij, ki se želijo vključiti v projekt izgradnje avtocest v Republiki Sloveniji, dne 11. maja 2006 v prostorih DDC, Kotnikova 40, v Ljubljani. Ljubljana, 2006. [COBISS.SI-ID 10421782]

72. BOROVIŃSEK, Matej, REN, Zoran. Lattice modelling of open-cell metallic foams for use in computational simulations : lecture presented at the European congress on advanced materials and processes EUROMAT 2007, 10-13 September 2007, Nürnberg, Germany. Nürnberg, 2007. [COBISS.SI-ID 11680790]

### 3.25 Druga izvedena dela

73. BOROVIŃSEK, Matej. Computer simulations of irregular open - cell foams : predavanje na Danih otvorenih vrata Strojarskog fakulteta u Slavonskom brodu, Strojarski izazov, 10. i 11.04.2008, Slavonski Brod. Slavonski Brod, 2008. [COBISS.SI-ID 12190230]





## ŽIVLJENJEPIS

Ime in priimek: **Matej Borovinšek**  
Izobrazba: univ. dipl. inž. str.  
Datum in kraj rojstva: 25. 6. 1979, Slovenj Gradec  
Državljanstvo: Slovensko  
Naslov: Zg. Duplek 124/e  
2241 Sp. Duplek  
Slovenija

### ŠOLANJE:

2004 - sedaj: Podiplomski (direktni doktorski) študij na Fakulteti za strojništvo v Mariboru.  
1998 - 2004: Dodiplomski študij na Fakulteti za strojništvo v Mariboru. Zaključil univerzitetni program strojništvo, smer konstrukterstvo in gradnja strojev ter tako pridobil naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva.  
1994 - 1998: II. gimnazija Maribor.

### DELOVNE IZKUŠNJE:

#### Od novembra 2004:

Podjetje: Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo  
Inštitut, laboratorij: Inštitut za konstrukterstvo in oblikovanje, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije  
Delovno mesto: mladi raziskovalec

### ODOBRENE ŠTIPENDIJE:

1994 - 2004: Zoisova štipendija za nadarjene dijake in študente.

### OSVOJENE NAGRADE:

2001: Rektorjeva nagrada v šolskem letu 2000/2001 za najboljšega študenta v generaciji.