

# Analiza morfologije aluminijskih pjena

---

Pendić, Dražen

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:558106>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Dražen Pendić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Čorić, dipl. ing.

Student:

Dražen Pendić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću, dipl. ing. te asistentu Tomislavu Rodingeru, mag. ing. mech. na pristupačnosti, izdvojenom vremenu te savjetima prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji koja me je bezuvjetno podržavala tijekom cijelog mog školovanja i u svim mojim odlukama.

Dražen Pendić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dražen Pendić** JMBAG: 0035219974

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza morfologije aluminijskih pjena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Morphology analysis of aluminium foams**

Opis zadatka:

Metalne pjene su visokoporozan materijal specifičnih svojstava čija morfologija znatno ovisi o odabiru proizvodnog postupka i primijenjenih agensa. Kao najčešći agens za dobivanje poroznog aluminijskog sa zatvorenim ćelijama koristi se titanijev hidrid ( $TiH_2$ ), ali u novije vrijeme sve se češće primjenjuju i jeftinija sredstva na bazi karbonata poput kalcijeva karbonata ( $CaCO_3$ ). Morfologija metalnih pjena ispituje se različitim metodama među kojima prednjače nerazorna ispitivanja poput računalne tomografije (CT) i analize skeniranog modela.

U radu je potrebno napraviti sljedeće:

1. Dati literaturni pregled razvoja, vrsta i tehnologija izrade metalnih pjena.
2. Opisati razorne i nerazorne metode ispitivanja metalnih pjena.
3. Izraditi uzorke aluminijskih pjena upjenjenih različitim agensima.
4. Skenirati uzorke pomoću računalne tomografije.
5. Analizirati morfologiju na temelju skeniranih modela.
6. Usporediti dobivene rezultate te donijeti odgovarajuće zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Danko Čorić

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS KRATICA .....	VIII
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY .....	XII
1. UVOD.....	1
2. POVIJEST METALNIH PJENA .....	2
3. OPĆA SVOJSTVA METALNIH PJENA.....	3
3.1. Metalne pjene s otvorenim ćelijama .....	5
3.2. Metalne pjene sa zatvorenim ćelijama .....	6
4. PROIZVODNJA METALNIH PJENA.....	7
4.1. Stvaranje metalne pjene iz rastaljene faze .....	8
4.1.1. Upjenjavanje s raspršujućim agensom.....	8
4.1.2. Upjenjavanje ubrizgavanjem plina.....	9
4.1.3. Metal – plin eutektičko skrućivanje .....	10
4.1.4. Lijevanje u kalupe.....	11
4.1.5. Taljenje zbijenog praha.....	15
4.2. Stvaranje metalne pjene iz čvrste faze .....	16
4.2.1. Sinteriranje metalnog praha .....	16
4.2.2. Zarobljavanje plina .....	17
4.2.3. Formiranje metalne pjene uz pomoć punila.....	17
4.2.4. Sinteriranje korištenjem šupljih metalnih kuglica .....	19
4.3. Stvaranje metalne pjene kemijskim taloženjem iz parne faze (CVD) .....	20
4.4. Stvaranje metalne pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze.....	20
4.5. Aditivna proizvodnja metalnih pjena.....	21
5. PRIMJENA METALNIH PJENA.....	23
5.1. Industrijska upotreba metalnih pjena .....	23
5.2. Funkcionalne primjene metalnih pjena.....	26
5.3. Primjena metalnih pjena u arhitekturi i umjetnosti.....	29
6. POSTUPCI KARAKTERIZACIJE METALNIH PJENA .....	31
6.1. Nerazorna ispitivanja .....	31
6.1.1. Gustoća .....	31
6.1.2. Ispitivanje penetrantnim tekućinama .....	31
6.1.3. Ispitivanje pomoću vrtložnih struja.....	31
6.1.4. Akustična mjerenja .....	31
6.1.5. Ispitivanje vibracijskih svojstava .....	32
6.1.6. Porozimetrija i permeometrija.....	32
6.1.7. Električna i toplinska mjerenja .....	33
6.1.8. Rendgenska radiografija i radioskopija.....	33
6.1.9. Računalom podržana rendgenska tomografija (CT) .....	33
6.2. Razorna ispitivanja.....	34
6.2.1. Svjetlosna mikroskopija.....	34

---

6.2.2. Mehanička ispitivanja .....	35
7. EKSPERIMENTALNI DIO .....	40
7.1. Postupak izrade uzoraka za ispitivanje .....	40
7.2. Morfološko ispitivanje uzoraka .....	46
7.2.1. Linijska analiza .....	48
7.2.2. Točkasta analiza .....	61
7.2.3. Metoda s krugom .....	73
7.2.4. Automatska analiza .....	86
7.3. Tlačno ispitivanje uzoraka .....	98
8. ANALIZA PODATAKA.....	108
9. ZAKLJUČAK.....	113
LITERATURA.....	114

**POPIS SLIKA**

Slika 1	Dijagram tlačnog naprezanja [6] .....	4
Slika 2	Spužvasta struktura metalne pjene s otvorenim ćelijama (a), izgled zatvorenih ćelija metalne pjene (b) [8] .....	6
Slika 3	Poroznost magnezijeve pjene: 7 % (a, b), 36 % (c, d) i 55 % (e, f) [8].....	6
Slika 4	Postupak dobivanja Alporas metalne pjene [13].....	8
Slika 5	Upjenjavanje ubrizgavanjem plina u rastaljeni metal [11].....	9
Slika 6	Metal-plin eutektičko skrućivanje [17] .....	10
Slika 7	Morfologija porozne strukture Mg-1Mn-1Zn legure pri različitim tlakovima [15] .....	11
Slika 8	Shematski prikaz kontinuiranog lijevanja metalne pjene [17] .....	11
Slika 9	Lijevanje oko ćelijastih punila [17].....	12
Slika 10	Lijevanje pomoću polimerne pjene [11] .....	12
Slika 11	Lijevanje metalne pjene s agensom u obliku prekursora [17].....	13
Slika 12	Precizno lijevanje s direktnim ubrizgavanjem plina [17].....	14
Slika 13	Lijevanje pod visokim tlakom, 1 – pomični dio, 2 – nepomični dio [17].....	15
Slika 14	Postupak proizvodnje metalnih pjena taljenjem zbijenog praha [13] .....	16
Slika 15	Sinteriranje metalnog praha, a) bez kompaktiranja i s kalupom, b) s kompaktiranjem bez kalupa [12] .....	17
Slika 16	Dobivanje metalne pjene uz pomoć punila i sinteriranja [11].....	18
Slika 17	Sinteriranje šupljih metalnih kuglica [12].....	19
Slika 18	Mehanička ispitivanja metalne pjene dobivene korištenjem šupljih metalnih kuglica [18] .....	19
Slika 19	Proces proizvodnje niklove pjene taloženjem iz parne faze [9].....	20
Slika 20	Proizvodnja metalne pjene procesom elektrotaloženja [11].....	21
Slika 21	Prototip nadomjestka ljudske kosti od Ti-6Al-4V legure proizveden pomoću postupka taljenja snopom elektrona [12].....	22
Slika 22	Nosiva greda od aluminijske pjene [14].....	23
Slika 23	Prag Ferrarija ispunjen aluminijskom pjenošću [14] .....	24
Slika 24	Kvadratni profil od aluminijske pjene [14] .....	24
Slika 25	Trup ICE vlaka [14] .....	25
Slika 26	Blok od metalne pjene na braniku vlaka [14].....	25
Slika 27	Airbusov koncept zrakoplova [19].....	26
Slika 28	Sustav za simuliranje sudara u svemiru [20].....	26
Slika 29	Strop restorana od metalne pjene [14].....	27
Slika 30	Različiti izmjenjivači topline od metalne pjene [14].....	27
Slika 31	Različiti filteri od metalne pjene [14].....	28
Slika 32	Pasivno hlađenje LED dioda pomoću metalne pjene [14] .....	28
Slika 33	Zubni implantat od titanijevske pjene [14] .....	29
Slika 34	Protestantska crkva u Španjolskoj s fasadom od aluminijske pjene [14].....	29
Slika 35	Recepcija poslovne zgrade od aluminijske pjene [14] .....	30
Slika 36	Skulptura lava s postoljem od aluminijske pjene [14] .....	30
Slika 37	Ovisnost pada tlaka o brzini strujanja za različite veličine ćelija [24].....	32
Slika 38	Rendgenska snimka olovne pjene [24].....	33
Slika 39	CT snimka metalne pjene [24] .....	34
Slika 40	Princip rada 3D računalne tomografije [25].....	34
Slika 41	Postupak analize površine metalne pjene [24] .....	35
Slika 42	Karakteristični dijagram tlačnog ispitivanja metalne pjene [23].....	36



Slika 43	Univerzalna kidalica.....	37
Slika 44	Metode ispitivanja smične čvrstoće [26].....	38
Slika 45	Shematski prikaz djelovanja momenta na savijanje ispitne epruvete [30].....	38
Slika 46	Shematski prikaz savojnog ispitivanja u 4 točke (a) i 3 točke (b) [9].....	39
Slika 47	Vaganje prekursora.....	41
Slika 48	Kalup s prekursorom za izradu metalne pjene .....	42
Slika 49	Elektrootporna zvonasta peć .....	43
Slika 50	Izlazak pjene iz kalupa .....	44
Slika 51	Uzorci aluminijskih pjena .....	44
Slika 52	CT uređaj za skeniranje uzoraka .....	47
Slika 53	Položaj uzoraka u CT uređaju .....	47
Slika 54	3D model uzorka .....	48
Slika 55	Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 1 .....	49
Slika 56	Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 1 .....	50
Slika 57	Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 1 .....	50
Slika 58	Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 2 .....	51
Slika 59	Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 2 .....	52
Slika 60	Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 2 .....	52
Slika 61	Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 3 .....	53
Slika 62	Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 3 .....	54
Slika 63	Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 3 .....	54
Slika 64	Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 4 .....	55
Slika 65	Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 4 .....	56
Slika 66	Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 4 .....	56
Slika 67	Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 5 .....	57
Slika 68	Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 5 .....	58
Slika 69	Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 5 .....	58
Slika 70	Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 6 .....	59
Slika 71	Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 6 .....	60
Slika 72	Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 6 .....	60
Slika 73	Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 1 .....	62
Slika 74	Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 1 .....	62
Slika 75	Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 1 .....	63
Slika 76	Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 2 .....	64
Slika 77	Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 2 .....	64
Slika 78	Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 2 .....	65
Slika 79	Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 3 .....	66
Slika 80	Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 3 .....	66
Slika 81	Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 3 .....	67
Slika 82	Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 4 .....	68
Slika 83	Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 4 .....	68
Slika 84	Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 4 .....	69
Slika 85	Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 5 .....	70
Slika 86	Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 5 .....	70
Slika 87	Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 5 .....	71
Slika 88	Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 6 .....	72
Slika 89	Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 6 .....	72
Slika 90	Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 6 .....	73
Slika 91	Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 1 .....	75

Slika 92	Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 1 .....	75
Slika 93	Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 1 .....	76
Slika 94	Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 2 .....	77
Slika 95	Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 2 .....	77
Slika 96	Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 2 .....	78
Slika 97	Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 3 .....	79
Slika 98	Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 3 .....	79
Slika 99	Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 3 .....	80
Slika 100	Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 4 .....	81
Slika 101	Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 4 .....	81
Slika 102	Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 4 .....	82
Slika 103	Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 5 .....	83
Slika 104	Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 5 .....	83
Slika 105	Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 5 .....	84
Slika 106	Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 6 .....	85
Slika 107	Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 6 .....	85
Slika 108	Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 6 .....	86
Slika 109	Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 1 .....	87
Slika 110	Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 1 .....	87
Slika 111	Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 1 .....	88
Slika 112	Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 2 .....	89
Slika 113	Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 2 .....	89
Slika 114	Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 2 .....	90
Slika 115	Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 3 .....	91
Slika 116	Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 3 .....	91
Slika 117	Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 3 .....	92
Slika 118	Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 4 .....	93
Slika 119	Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 4 .....	93
Slika 120	Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 4 .....	94
Slika 121	Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 5 .....	95
Slika 122	Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 5 .....	95
Slika 123	Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 5 .....	96
Slika 124	Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 6 .....	97
Slika 125	Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 6 .....	97
Slika 126	Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 6 .....	98
Slika 127	Tlačno ispitivanje uzorka .....	99
Slika 128	Uzorci nakon tlačnog ispitivanja .....	99
Slika 129	Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 1 .....	100
Slika 130	Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 2 .....	100
Slika 131	Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 3 .....	101
Slika 132	Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 4 .....	101
Slika 133	Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 5 .....	102
Slika 134	Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 6 .....	102
Slika 135	Dijagram naprezanje – deformacija s označenom specifičnom apsorcijom energije [32] .....	103
Slika 136	Dijagram naprezanje – deformacija s označenim platom naprezanja kao i 130 % višim naprezanjem i pripadajućom deformacijom [32] .....	103
Slika 137	Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 1 .....	104
Slika 138	Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 2 .....	105

---

Slika 139	Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 3.....	105
Slika 140	Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 4.....	106
Slika 141	Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 5.....	106
Slika 142	Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 6.....	107
Slika 143	Poroznost uzorka 1 .....	108
Slika 144	Poroznost uzorka 2 .....	109
Slika 145	Poroznost uzorka 3 .....	109
Slika 146	Poroznost uzorka 4 .....	110
Slika 147	Poroznost uzorka 5 .....	110
Slika 148	Poroznost uzorka 6 .....	111
Slika 149	Specifična apsorpcija energije uzorka metalnih pjena .....	112
Slika 150	Efikasnost apsorpcije energije uzorka metalnih pjena .....	112

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Svojstva metalnih pjena dobivenih različitim postupcima proizvodnje [9]	5
Tablica 2	Neki postupci proizvodnje metalnih pjena [11]	7
Tablica 3	Kemijski sastav prekursora	40
Tablica 4	Osnovni podaci o uzorcima	46
Tablica 5	Vrijednosti za uzorak 1 dobivene linijskom analizom	51
Tablica 6	Vrijednosti za uzorak 2 dobivene linijskom analizom	53
Tablica 7	Vrijednosti za uzorak 3 dobivene linijskom analizom	55
Tablica 8	Vrijednosti za uzorak 4 dobivene linijskom analizom	57
Tablica 9	Vrijednosti za uzorak 5 dobivene linijskom analizom	59
Tablica 10	Vrijednosti za uzorak 6 dobivene linijskom analizom	61
Tablica 11	Vrijednosti za uzorak 1 dobivene točkastom analizom	63
Tablica 12	Vrijednosti za uzorak 2 dobivene točkastom analizom	65
Tablica 13	Vrijednosti za uzorak 3 dobivene točkastom analizom	67
Tablica 14	Vrijednosti za uzorak 4 dobivene točkastom analizom	69
Tablica 15	Vrijednosti za uzorak 5 dobivene točkastom analizom	71
Tablica 16	Vrijednosti za uzorak 6 dobivene točkastom analizom	73
Tablica 17	Vrijednosti za uzorak 1 dobivene metodom s krugom	76
Tablica 18	Vrijednosti za uzorak 2 dobivene metodom s krugom	78
Tablica 19	Vrijednosti za uzorak 3 dobivene metodom s krugom	80
Tablica 20	Vrijednosti za uzorak 4 dobivene metodom s krugom	82
Tablica 21	Vrijednosti za uzorak 5 dobivene metodom s krugom	84
Tablica 22	Vrijednosti za uzorak 6 dobivene metodom s krugom	86
Tablica 23	Vrijednosti za uzorak 1 dobivene automatskom analizom	88
Tablica 24	Vrijednosti za uzorak 2 dobivene automatskom analizom	90
Tablica 25	Vrijednosti za uzorak 3 dobivene automatskom analizom	92
Tablica 26	Vrijednosti za uzorak 4 dobivene automatskom analizom	94
Tablica 27	Vrijednosti za uzorak 5 dobivene automatskom analizom	96
Tablica 28	Vrijednosti za uzorak 6 dobivene automatskom analizom	98
Tablica 29	Rezultati tlačnog ispitivanja	107

---

**POPIS KRATICA**

2D	dvije dimenzije
3D	tri dimenzije
CAD	oblikovanje pomoću računala (eng. <i>Computer – Aided Design</i> )
CT	računalom podržana rendgenska tomografija (eng. <i>Computed Tomography</i> )
CVD	kemijsko taloženje iz parne faze (eng. <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
DPF	filter dizelskih čestica (eng. <i>Diesel Particulate Filter</i> )
ECAP	kutno ekstrudiranje (eng. <i>Equal Channel Angular Pressing</i> )
HIP	vruće izostatsko prešanje (eng. <i>Hot Isostatic Pressing</i> )
ICE	brzi vlak (eng. <i>InterCity – Express</i> )
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju (eng. <i>International Organization for Standardization</i> )
LED	svjetleća dioda (eng. <i>Light – Emitting Diode</i> )

---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\bar{A}_\epsilon$	mm <sup>2</sup>	srednja površina ćelija
$A_k$	mm <sup>2</sup>	površina kruga
$C_p$	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
$d$	mm	promjer uzorka
$\bar{d}_\epsilon$	mm	srednji promjer ćelija
$d_{maks}$	mm	maksimalni promjer
$d_{min}$	mm	minimalni promjer
$\bar{d}_s$	mm	srednja debljina stijenke ćelija
$E$	GPa	modul elastičnosti
$E_f$	GPa	modul savitljivosti
$F_\epsilon$	-	faktor oblika ćelija
$G$	GPa	modul smičnosti
$h$	mm	visina uzorka
$K_{IC}$	MPa·m <sup>1/2</sup>	lomna žilavost
$L$	J/kg	latentna toplina taljenja
$l_\epsilon$	mm	duljina linija preko ćelija
$l_s$	mm	duljina linija preko stijenki
$l_{uk}$	mm	ukupna duljina linija
$m$	g	masa uzorka
$M$	-	povećanje
$n$	-	broj ćelija
$N_\epsilon$	ćelija/cm <sup>2</sup>	broj ćelija po cm <sup>2</sup>
$n_k$	-	broj ćelija na kružnici
$n_{po}$	-	broj točaka koje leže polovično na ćelijama
$n_{pu}$	-	broj točaka koje leže potpuno na ćelijama
$n_u$	-	broj ćelija unutar kružnice
$R$	Ω	električni otpor
$R_d$	MPa	dinamička izdržljivost
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća

---

$R_{mt}$	MPa	tlačna čvrstoća
$T_m$	K	temperatura tališta
$T_{maks}$	K	maksimalna radna temperatura
$T_{min}$	K	minimalna radna temperatura
$V_{\dot{c}}$	%	volumni udio ćelija
$V_u$	cm <sup>3</sup>	volumen uzorka
$W$	MJ/m <sup>3</sup>	specifična apsorpcija energije
$W_e$	%	efikasnost apsorbirane energije
$\bar{x}$	-	aritmetička sredina
$\alpha$	1/K	linearni koeficijent toplinskog rastezanja
$\varepsilon$	%	deformacija pri tlačnom opterećenju
$\varepsilon_f$	-	istezanje
$\varepsilon_{ple}$	%	deformacija kod $1,3\sigma_{pl}$
$\eta$	%	faktor gubitka
$\lambda$	W/mK	toplinska vodljivost
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća
$\rho_{Al}$	g/cm <sup>3</sup>	gustoća aluminija
$\rho_{rel}$	-	relativna gustoća
$\sigma$	MPa	naprezanje
$\sigma_{pl}$	MPa	plato naprezanja
$\varphi$	%	poroznost

---

**SAŽETAK**

U radu su opisane metalne pjene koje su relativno novi materijal. Njihova je glavna odlika porozna struktura te svojstva koja proizlaze iz te strukture. Svojstva metalnih pjena su raznolika i ponajviše ovise o načinu proizvodnje i polaznom materijalu zbog čega struktura metalnih pjena može biti više ili manje porozna. Čelije metalnih pjena mogu biti otvorene ili zatvorene, različitog oblika i veličine. S obzirom da različiti načini proizvodnje značajno utječu na svojstva metalnih pjena, nužno je provoditi različita ispitivanja. Ispitivanja mogu biti razorna te nerazorna. U eksperimentalnom dijelu rada, uzorci upjenjeni pomoću različitih sredstava za upjenjavanje te njihovim različitim masenim udjelima, skenirani su pomoću računalom podržane rendgenske tomografije (CT) kako bi se dobili trodimenzionalni modeli za dobivanje uvida u njihovu morfologiju. Naknadno su provedena tlačna ispitivanja u svrhu analize mehaničkih svojstava za različite kemijske sastave i isti način proizvodnje metalnih pjena.

**Ključne riječi:** Metalne pjene, računalna tomografija (CT), tlačna ispitivanja



**SUMMARY**

This thesis describes metal foams, which are a relatively new material. Their main characteristic is a porous structure and properties related to that structure. They can exhibit various properties depending on the manufacturing method and the metal base used, which determines the level of porosity. Metal foam cells can be either closed or open and can have different shapes and sizes. Due to the significant influence of manufacturing methods on the properties of metal foams, it is necessary to conduct different experiments. These experiments can be destructive or nondestructive. The experimental part of this thesis focuses on samples foamed with different foaming agents and their different quantities. The foamed samples were scanned using computed tomography to obtain their 3D models for morphological analysis. Additionally, the samples were subjected to tensile testing to establish a correlation between mechanical and chemical properties for the same manufacturing method.

Key words: metal foam, Computed Tomography (CT), tensile testing

## 1. UVOD

Metalne pjene predstavljaju materijale ćelijaste strukture čija je osnova metal, najčešće aluminij. Općenito pjene predstavljaju homogenu disperziju plina u čvrstoj fazi. Ćelijasti materijali sve su više predmet istraživanja zbog svojih specifičnih svojstava te mogućnosti stvaranja kompozita kako bi se maksimalno iskoristile prednosti pojedinih materijala, a smanjila negativna svojstva. Prvi su se patenti pojavili 30-ih godina prošlog stoljeća koji su u postupku uključivali živu, što nikako nije moglo pronaći primjenu u civilnoj upotrebi. Prvi ozbiljan uzlet na polju pjenastih metala počinje 70-ih godina kada se razvijaju učinkovitije metode proizvodnje. Proteklih desetljeća mnogi su proizvodi iz do tada standardnih legura počeli dobivati svoju zamjenu korištenjem upravo ćelijastih materijala. Ćelijasti se materijali sve češće stavljaju na prvo mjesto kada je riječ o lakim materijalima. Njihova je upotreba raznolika i u upotrebi su za vojne i civilne svrhe. Metalne pjene su nezapaljive te mogu uspješno apsorbirati energiju što ih čini idealnima za autoindustriju. U usporedbi s polimernim materijalima koji se trenutno koriste kao apsorbenti energije ćelijaste strukture u obliku metalnih pjena mogu podnijeti značajno više temperature. Pretpostavlja se da će metalne pjene tako s vremenom istisnuti polimerne pjene iz većine takvih primjena. Prepreka za to je trenutno cijena proizvodnje, odnosno kompleksnost postojećih metoda za proizvodnju metalnih pjena.

Metalne se pjene najčešće proizvode od aluminija zbog cijene sirovine i jeftinijeg postupka uvjetovanog relativno niskom temperaturom tališta materijala. Od ostalih metala u upotrebi su titanij (Ti), bakar (Cu), čelik, nikel (Ni)... Svojstva ovih pjena uvelike ovise o vrsti osnovnog materijala, ali i o načinu proizvodnje te poroznosti i veličini ćelija koje čine strukturu metalne pjene.

Iako se metalne pjene razvijaju kao samostalni materijal, usporedno se razvijaju i kompoziti čija je jezgra sačinjena od metalne pjene koja takvom materijalu daje malu masu i visoku krutost te se ponaša kao apsorbent energije udara, ali i zvuka te vibracija. [1], [2], [3]

---

## 2. POVIJEST METALNIH PJENA

Početak 20. stoljeća započinje razvoj ćelijastih materijala po uzoru na prirodne materijale poput kosti ili drva. Njihova ih gustoća čini poželjnim materijalom te su početna istraživanja bila usmjerena prema pronalasku namjena u kojima bi se pjene ponašale jednako kvalitetno kao postojeći materijali uz veliku prednost male gustoće. Ideja proizvodnje metalnih pjena prvi se puta spominje 1925. godine. Tada je objašnjen postupak proizvodnje ubrizgavanjem inertnog plina u rastaljeni metal te postupak dodavanja agensa za upjenjavanje poput kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ). U početku je problem bio dobivanje stabilnih mjehurića u pjeni. Metodom ubrizgavanja inertnog plina u rastaljeni aluminij (Al) se nisu dobivale stabilne pjene. Time su istraživanja na temu metalnih pjena svedena na minimum. [3]

20 godina kasnije u SAD-u se počinju ozbiljnije razvijati metalne pjene. Benjamin Sosnick razvio je postupak proizvodnje metalne pjene uz pomoć žive što se pokazalo iznimno opasnim za ljude. Bila je to nakon dugog niza godina naznaka da ideja metalnih pjena neće tek tako propasti. [3]

Poboljšana verzija De Mellerovog patenta upjenjavanja pomoću agensa koristila je titanijev hidrid ( $\text{TiH}_2$ ) kao sredstvo za upjenjavanje. Uz titanijev hidrid, cirkonijev se hidrid ( $\text{ZrH}_2$ ) pokazao dobrim agensom. Problem je i dalje bila stabilizacija mjehurića u pjeni. Znanstvenici su eksperimentirali s visokim tlakovima ubrizgavanja agensa kako bi se odgodio njihov preuranjeni raspad. [3]

Rast na području metalnih pjena i njihov početak upotrebe u civilne potrebe započeo je oko 1960. godine kada znanstvenici poput Johana Bjorkstena i Williama Stuarta Fiedlerea objavljuju više od 15 patenata u SAD-u. Neki su čak opisali i kontinuiranu proizvodnju metalnih pjena. [3]

Tvrtka Ethyl Corporation je uz proizvodne postupke razvijala usporedno i tehnologije oblikovanja pjena na konačan proizvod. Uveli su kalupe u proizvodnu liniju, ali i postupke laminiranja. Tvrtka je provodila istraživanja na vlaknima ojačanim pjenama te pjenama drugih metala osim aluminija. [3]

---

### 3. OPĆA SVOJSTVA METALNIH PJENA

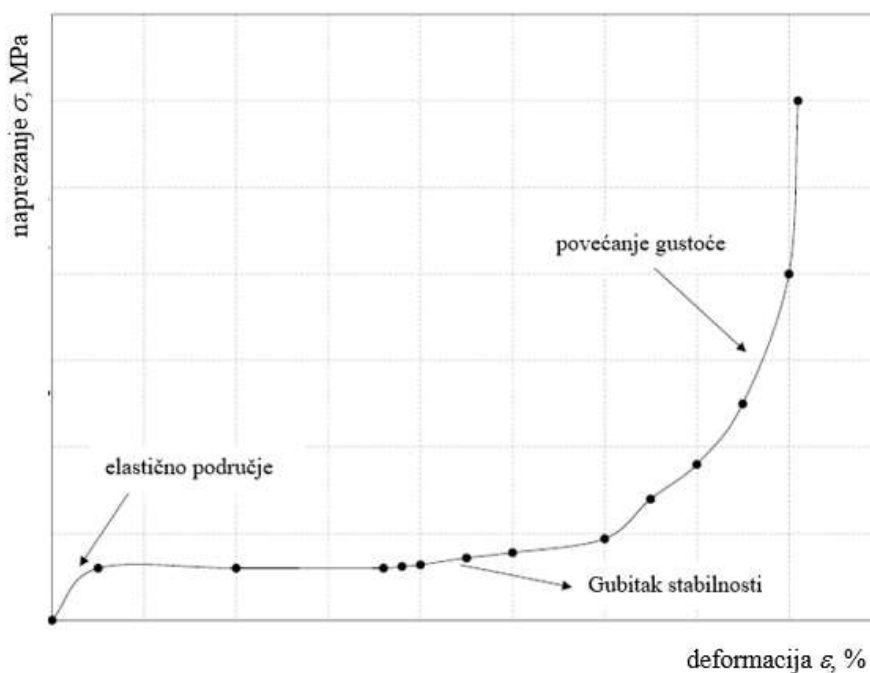
Svojstva metalnih pjena variraju uslijed raznih faktora. Tako pjene istog kemijskog sastava mogu davati različita svojstva ovisno o gustoći, veličini pora, homogenosti strukture, otvorenosti ili zatvorenosti ćelija... Različiti postupci proizvodnje daju različita svojstva konačnog proizvoda. [4]

Svojstva metalnih pjena se ispituju po točno definiranim postupcima, a nepredvidiva struktura metalne pjene može za isto ispitivanje rezultirati različitim rezultatima. Iz tog razloga ispitivanja moraju biti normirana sa strogo određenim parametrima. [4]

Općenito su metalne pjene dobri provodnici električne energije. Imaju relativno visoko talište što im omogućava visoke radne temperature. Na aluminijskim pjenama se na površini stvara aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ) koji djeluje antikorozivno. [4]

Cijena im je visoka zbog nedovoljno razvijenog postupka proizvodnje pa imaju ograničenu upotrebu iako su im mogućnosti upotrebe iznimno velike. Daljnjim razvojem metalne će pjene zasigurno sve češće biti prikladna zamjena za njihove srodnike izrađene od monolitnog (neporoznog) metala. Primarno se metalne pjene proizvode za namjene gdje je potrebno asporbirati velike količine energije. Da bi metalna pjena uspješno izdržala takve uvjete mora posjedovati dobra mehanička svojstva. Uvjeti naprezanja u kojima se metalne pjene najvećim dijelom koriste su tlačna naprezanja. Shodno tome, najčešća vrsta ispitivanja mehaničkih svojstava su upravo tlačna ispitivanja. Slika 1 prikazuje tipičan dijagram tlačnog ispitivanja za metalne pjene. Uz tlak, pjene se još ispituju i na smik te savijanje. [5], [6]

Posebno povoljno svojstvo metalnih pjena je njihova iznimno mala gustoća u usporedbi s neporoznim metalima. Ovisno o načinu proizvodnje te osnovnom metalu od kojeg je pjena proizvedena, iznosi gustoće variraju. Što je poroznost veća, gustoća metalne pjene je manja. [7]



Slika 1 Dijagram tlačnog naprezanja [6]

Metalne pjene se dijele na pjene otvorenih i zatvorenih ćelija. Ovisno o kojem je tipu pjene riječ, svojstva mogu biti dijametralno suprotna. [8]

Metalne pjene u usporedbi s drvom porozne građe imaju manju gustoću te puno veću otpornost na povišenim temperaturama. Mehanička svojstva drva su bolja kada opterećenje djeluje u smjeru vlakana, dok su u slučaju opterećenja okomitog na vlakna metalne pjene u prednosti jer posjeduju bolja mehanička svojstva. Velika prednost metalnih pjena je i u dimenzijskoj stabilnosti te otpornosti na vanjske utjecaje poput vlage i različitih medija. S financijskog aspekta, drvo je ipak povoljniji materijal i zbog prerade i zbog dostupnosti sirovine. [9]

Metalne pjene u usporedbi s polimernim pjenama imaju veću gustoću, ali značajno bolja mehanička svojstva koja posebno dolaze do izražaja pri povišenim temperaturama. Toplinsko - izolacijska svojstva su generalno nešto bolja kod polimernih pjena. Vatrootpornost polimernih pjena je iznimno loša dok metalne pjene pokazuju dobre sposobnosti vatrootpornosti. Cijena polimernih pjena je puno manja od metalnih pjena. [9]

Tablica 1 prikazuje vrijednosti različitih svojstava nekih metalnih pjena. [9]

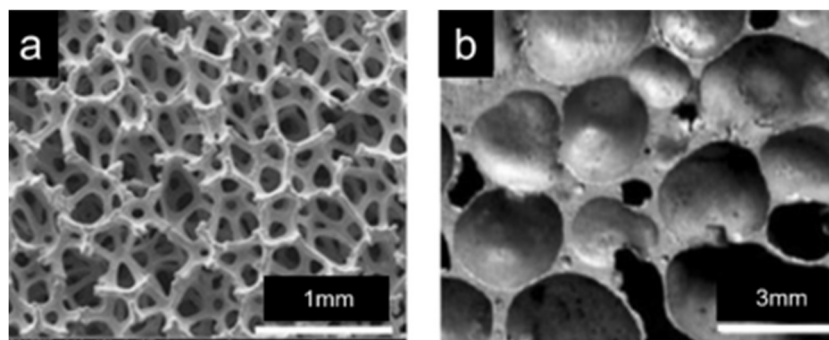
**Tablica 1 Svojstva metalnih pjena dobivenih različitim postupcima proizvodnje [9]**

Svojstvo / Postupak proizvodnje	Cymat	Alulight	Alporas	DUOCEL	INCO
materijal	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
relativna gustoća, $\rho_{rel}$	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
tip ćelije	zatvoreni			otvoreni	
modul elastičnosti, (GPa), $E$	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
modul smičnosti, (GPa), $G$	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
modul savitljivosti, (GPa), $E_f$	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor	0,32-0,34				
tlačna čvrstoća, (MPa), $R_{mt}$	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
vlačna čvrstoća, (MPa), $R_m$	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	0,9-3,0	0,6-1,1
dinamička izdržljivost, (MPa), $R_d$	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
deformacija pri tlačanju, $\varepsilon$	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
istezanje, $\varepsilon_f$	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
faktor gubitka, (%), $\eta$	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
lomna žilavost, (MPa·m <sup>1/2</sup> ), $K_{IC}$	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0
talište, (K), $T_m$	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
maksimalna radna temp., (K), $T_{maks}$	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
minimalna radna temp., (K), $T_{min}$	1-2				
specifični topl. kapacitet, (J/kgK), $C_p$	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
toplinska vodljivost, (W/mK), $\lambda$	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
toplinska rastezljivost, (10 <sup>-6</sup> /K), $\alpha$	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
latentna toplina taljenja, (kJ/kg), $L$	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310
električni otpor (10 <sup>-8</sup> Ω), $R$	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500

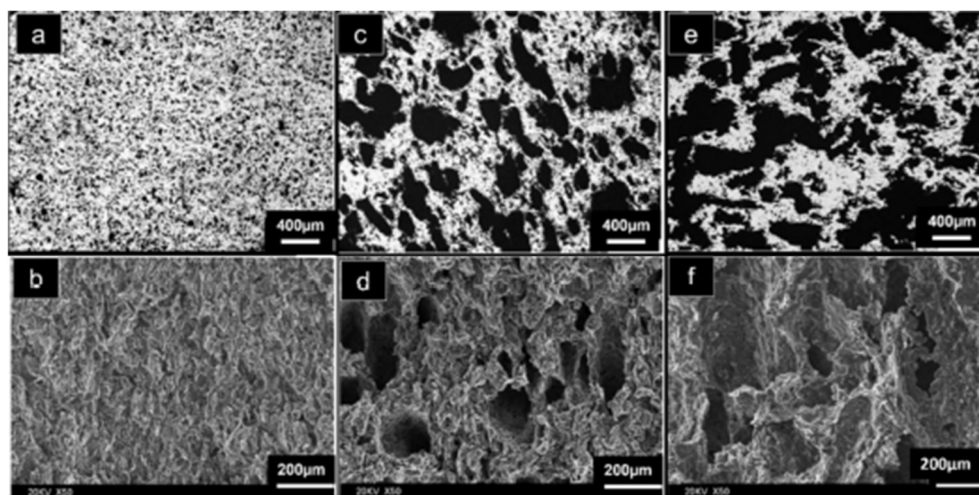
### 3.1. Metalne pjene s otvorenim ćelijama

Najznačajnije svojstvo kod pjena s otvorenim ćelijama jest površina kojom je pjena izložena svom okruženju. Njihova je struktura slična spužvi što je prikazano na slici 2a), dok je na 2b) prikazana struktura metalnih pjena sa zatvorenim ćelijama. Pjene s otvorenim ćelijama su dobri provodnici topline te su pogodne za proizvodnju izmjenjivača topline. [8]

Pjene s otvorenim ćelijama u kombinaciji s različitim veličinama istih mogu se primjenjivati u svrhu filtriranja. Ovisno o veličini ćelija moguće je izraditi filtere za različite namjene. Na slici 3 prikazane su različite veličine ćelija metalnih pjena koje određuju poroznost pjene. [8]



Slika 2 Spužvasta struktura metalne pjene s otvorenim ćelijama (a), izgled zatvorenih ćelija metalne pjene (b) [8]



Slika 3 Poroznost magnezijeve pjene: 7 % (a, b), 36 % (c, d) i 55 % (e, f) [8]

### 3.2. Metalne pjene sa zatvorenim ćelijama

Metalne pjene sa zatvorenim ćelijama karakterizira postojanje tanke stijenke između svake ćelije. Takve pjene imaju nešto bolja mehanička svojstva u odnosu na pjene s otvorenim ćelijama. Shodno tome, njihova je prisutnost dominantna u strukturnim primjenama dok pjene s otvorenim ćelijama prevladavaju u funkcionalnim primjenama. Zbog svoje strukture i sposobnosti da apsorbiraju energiju, metalne pjene mogu smanjiti razinu buke te uz zvuk dobro prigušuju udar i vibracije. Pjene sa zatvorenim ćelijama imaju izvrsna toplinska izolacijska svojstva, ali njihova cijena je daleko veća od konvencionalnih materijala. [4]

#### 4. PROIZVODNJA METALNIH PJENA

Osnova za dobivanje metalne pjene je metal koji kao polazni materijal može biti rastaljene ili čvrste (krute) forme. Različiti načini dobivanja metalne pjene za rezultat će imati razliku u svojstvima poput gustoće, tlačne čvrstoće ili kapaciteta apsorbirane energije. Postoje razni načini dobivanja metalnih pjena, ali se najčešće koristi njih nekoliko, prvenstveno zbog cijene i kompleksnosti proizvodnje. Proizvodnja se može podijeliti na četiri osnovna tipa:

- stvaranje metalne pjene u rastaljenoj fazi,
- stvaranje metalne pjene u čvrstoj fazi,
- stvaranje metalne pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze,
- stvaranje metalne pjene taloženjem iz parne faze. [10]

Tablica 2 prikazuje neke od postupaka proizvodnje metalnih pjena. [11]

**Tablica 2 Neki postupci proizvodnje metalnih pjena [11]**

metalne pjene			
metalne pare	rastaljeni metal	praškasti metal	metalni ioni
- taloženje iz parne faze	- upjenjavanje s raspršujućim agensom - direktno upjenjavanje plinom - gasar postupak - lijevanje - taljenje zbijenog praha - oblikovanje naštrcavanjem	- sinteriranje šupljih kugli - zarobljavanje plina - formiranje kaše - prešanje oko punila - sinteriranje praha ili vlakana - ekstrudiranje mješavine metal – polimer - reakcijsko sinteriranje	- elektrokemijsko taloženje

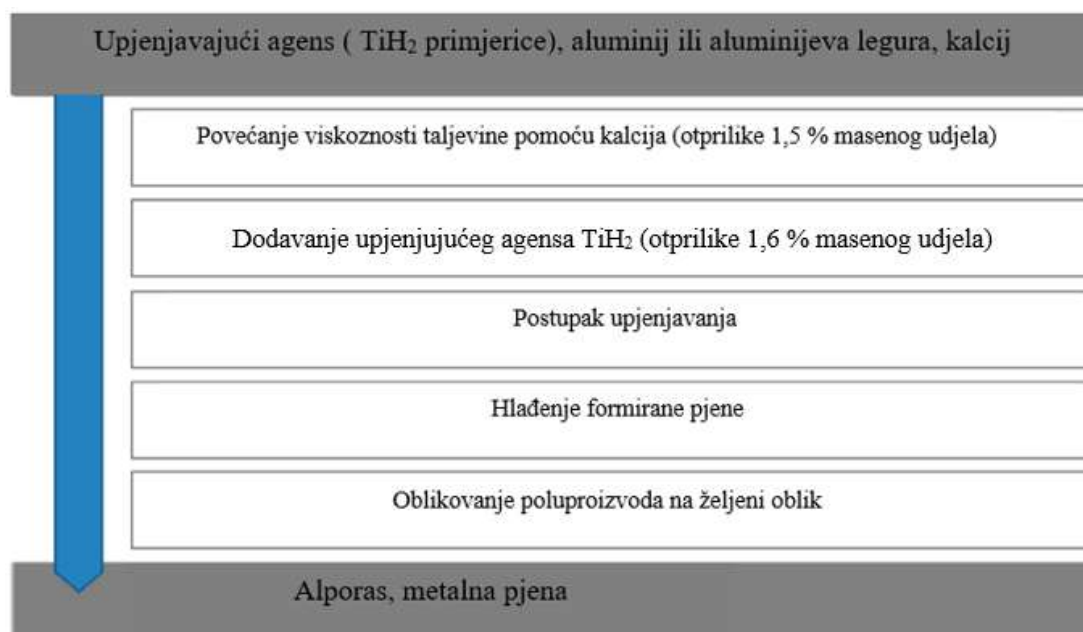


#### 4.1. Stvaranje metalne pjene iz rastaljene faze

Ova skupina postupaka za proizvodnju metalnih pjena se uglavnom koristi za metale niskog tališta. Ovim postupkom se metalne pjene mogu dobiti direktnim upjenjavanjem ili indirektnim poput lijevanja uz pomoć polimernih pjena ili punila. [12]

##### 4.1.1. Upjenjavanje s raspršujućim agensom

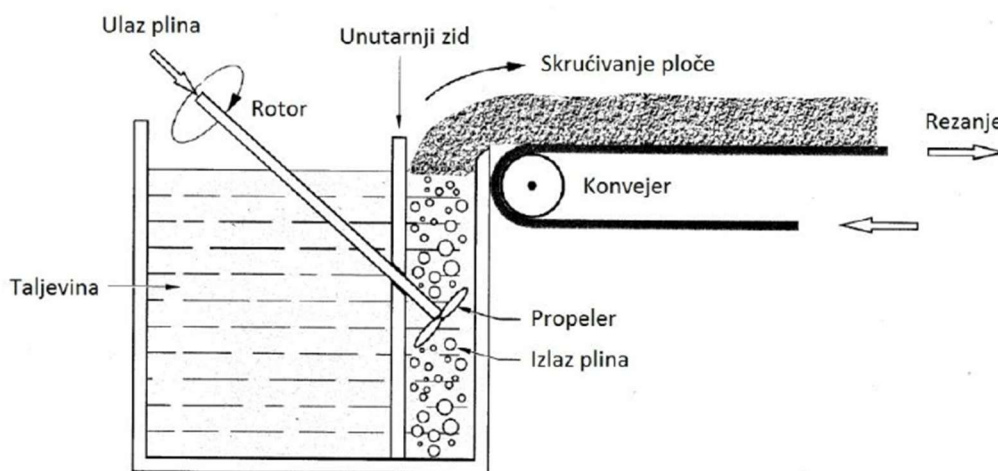
Postupak upjenjavanja s raspršujućim agensom karakterističan je po tome što se za dobivanje pjene iz metala ne koriste plinovi za formiranje mjehurića nego agensi koji se pri određenim temperaturama raspadaju te oslobađaju plin koji je zaslužan za stvaranje porozne strukture. Kod ovog postupka proizvodnje aluminijskih pjena pri povišenoj temperaturi se dodaje kalcij u talinu aluminijsku. Dodavanjem kalcija viskoznost aluminijske taline se povećava nastajanjem kalcijevih oksida. Zatim se dodaje agens za upjenjavanje. Najčešće je to titanijev hidrid ( $\text{TiH}_2$ ). Mješavina se zagrijava na temperaturu od oko  $680\text{ }^\circ\text{C}$  što je značajno više od temperature rastvaranja agensa koji se pri toj temperaturi raspada na vodik i titanij. Hlađenjem smjese vodik ostaje zarobljen u metalu čime nastaju mjehurići, odnosno pjenasta struktura. Ovim postupkom se mogu dobiti pjene poroznosti do 90 %, odnosno gustoće do  $0,2\text{ g/cm}^3$ . Pjene nastale ovim postupkom nazivaju se Alporas, a postupak njenog nastajanja je prikazan na slici 4. [13]



Slika 4 Postupak dobivanja Alporas metalne pjene [13]

#### 4.1.2. Upjenjavanje ubrizgavanjem plina

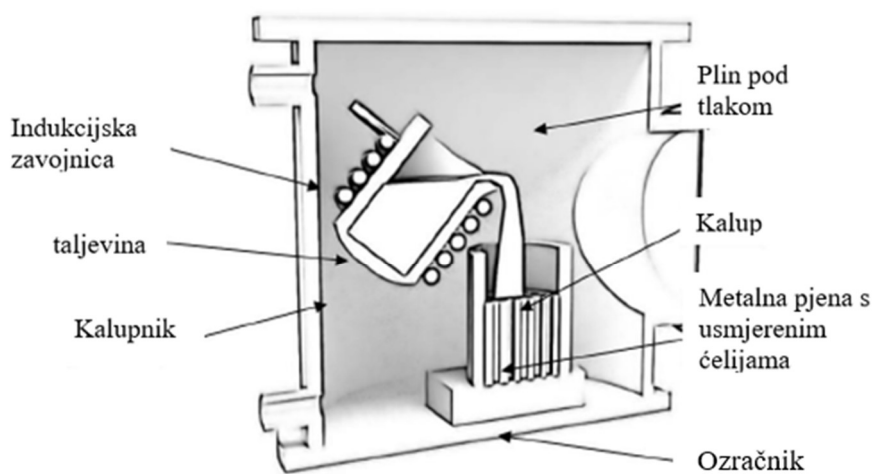
Ova se metoda primarno koristi za aluminijeve pjene. Osnovni materijal najčešće su aluminijeve legure, čisti aluminij ili njihova mješavina. Materijal se zagrijava na temperaturu taljenja nakon čega se dodaju stabilizatori poput aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ili silicijevog karbida ( $\text{SiC}$ ). Ti stabilizatori služe za izbjegavanje stvaranja većih mjehurića spajanjem više manjih, urušavanja mjehurića ili izlaska plina na površinu.. Za stvaranje mjehurića zaslužan je plin koji se ubrizgava u rastaljeni metal. Najčešće je to zrak ili ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ). Ubrizgavanje se vrši pod pritiskom kroz svojevrsan propeler. Takva smjesa dolazi na površinu gdje se suši i preko pokretne trake poluproizvod odlazi na daljnju obradu, slika 5. Ovim se postupkom mogu dobiti metalne pjene gustoće od  $0,069 \text{ g/cm}^3$  do  $0,54 \text{ g/cm}^3$ . Problem ovog postupka je što puno parametara ima veliki utjecaj na konačna svojstva metalne pjene. Tlak ubrizgavanja plina, svojstva mlaznice te brzina pokretne trake koja izvlači metalnu pjenu iz spremnika moraju biti kontrolirani kako bi se dobila zadovoljavajuća svojstva. [12], [13], [14]



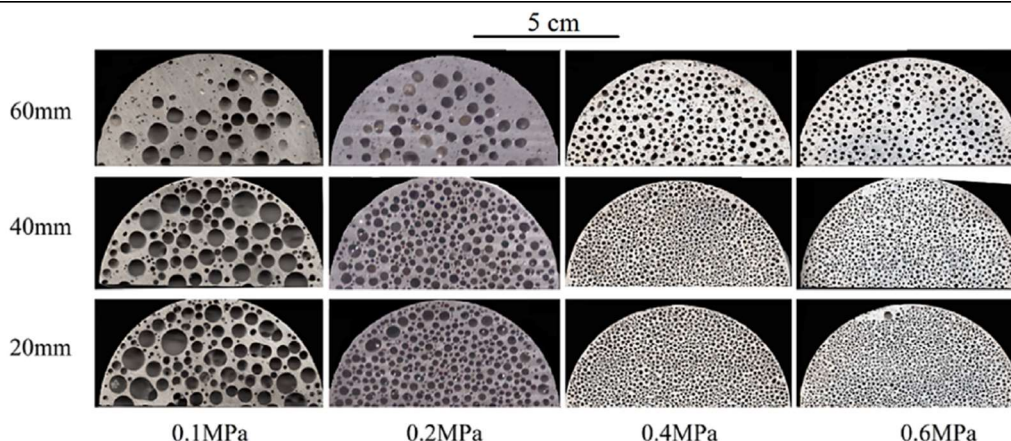
Slika 5 Upjenjavanje ubrizgavanjem plina u rastaljeni metal [11]

### 4.1.3. Metal – plin eutektičko skrućivanje

Određeni metali, poput magnezija ili srebra, mogu tvoriti eutektički sustav s nekim plinom. Primjer su vodik te kisik. Zagrijavanjem metala pod visokim pritiskom u atmosferi bogatoj vodikom ili kisikom nastaju eutektički sustavi dviju faza, metala i vodika odnosno kisika. U tim uvjetima plin iz atmosfere prodire u rastaljeni metal. Hlađenjem dolazi do skrućivanja metala dok plin ostaje zarobljen unutar krutine. Zarobljeni plin u ohlađenom metalu čini mjehuriće karakteristične za metalne pjene. Veličina mjehurića ovisi o sadržaju plina u atmosferi i njegovom tlaku. Svojstva tako proizvedene metalne pjene ovise i o brzini hlađenja te kemijskom sastavu osnovnog metala. Slika 7 prikazuje različite strukture ovisno o različitim tlakovima te visini presjeka uzorka. S obzirom da mjehurići imaju tendenciju nastajanja u smjeru hlađenja, različite strukture će se postići različitim brzinama hlađenja što je prikazano na slici 7 kroz različita mjesta presjeka. Slika 6 shematski prikazuje proizvodnju metalnih pjena ovim postupkom. [15], [16]



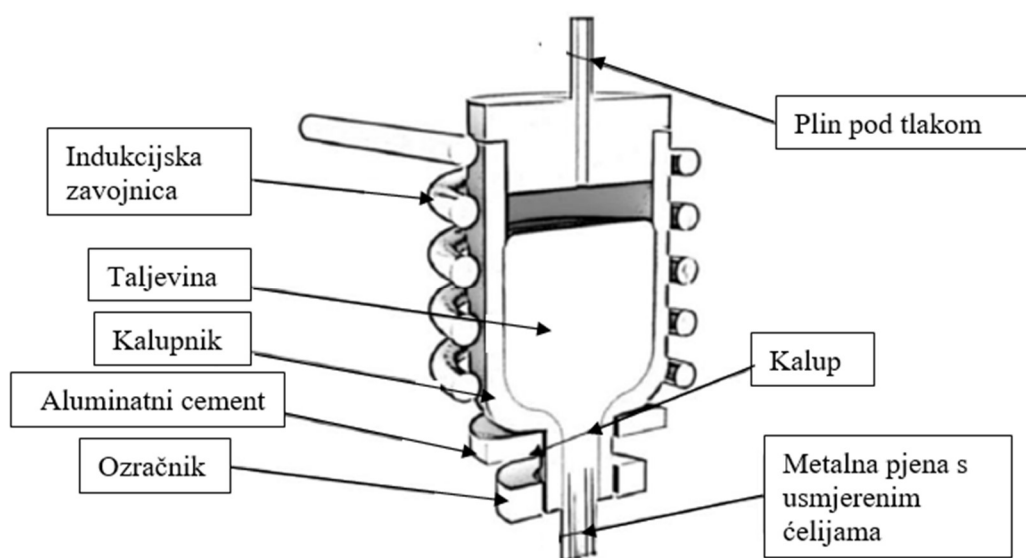
Slika 6 Metal-plin eutektičko skrućivanje [17]



Slika 7 Morfologija porozne strukture Mg-1Mn-1Zn legure pri različitim tlakovima [15]

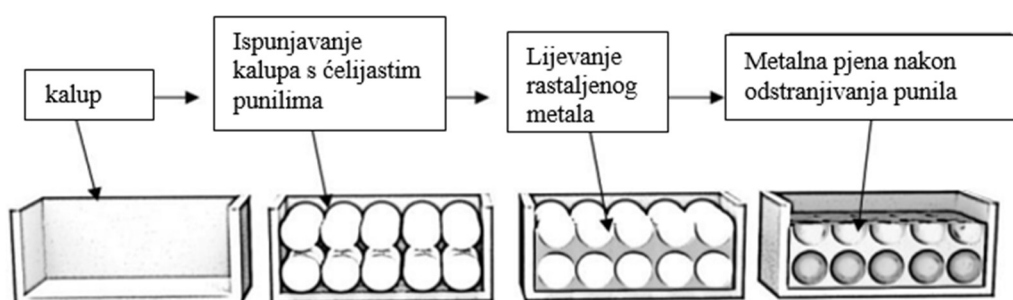
#### 4.1.4. Lijevanje u kalupe

Kontinuirano lijevanje se zasniva na konstantnom zagrijavanju metala koji se pri izlasku iz kalupa hladi te nastaje poluproizvod spreman za obradu nekim od tehnoloških postupaka. U kalupnik se stavljaju kalup te sirovina za taljenje. Koncentracija plina u taljevini ovisi o tlaku unutar kalupnika. Čelije metalne pjene nastaju prilikom hlađenja taljevine u kojoj ostaje zarobljen plin. Veći tlak plina u kalupniku rezultira većom koncentracijom plina u taljevini te se samim time povećava poroznost poluproizvoda. Slika 8 shematski prikazuje postupak proizvodnje metalne pjene postupkom kontinuiranog lijevanja. [17]

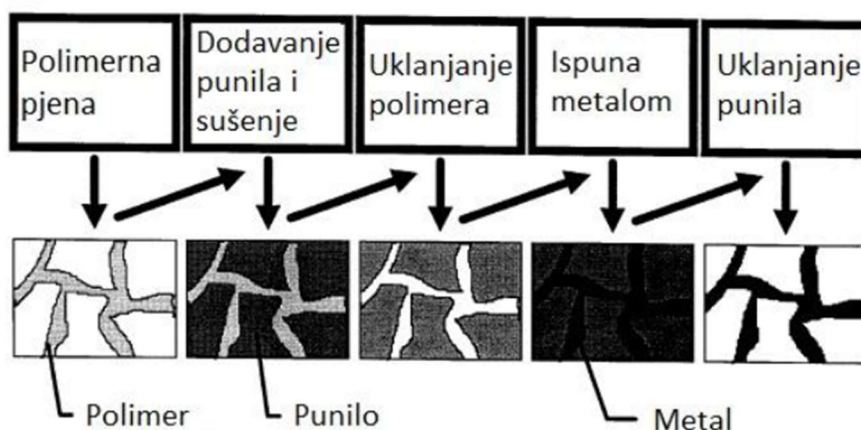


Slika 8 Shematski prikaz kontinuiranog lijevanja metalne pjene [17]

Lijevanjem uz pomoć punila od poliuretana moguće je dobiti metalne pjene otvorenih ćelija. Polimerna pjena se impregnira premazom otpornim na visoke temperature. Takva punila se stavljaju u kalup koji se ispunjava rastaljenim metalom, najčešće legurom niskog tališta. Nakon hlađenja polimerna punila se uklanjaju te ostaje metalna pjena s otvorenim ćelijama. Trgovački naziv za pjene dobivene ovim postupkom je DUOCEL i Cellmet. Shematki prikaz proizvodnje metalnih pjena lijevanjem uz pomoć polimernih punila dan je na slici 9. Osim punila određene geometrije, moguće je koristiti i polimernu pjenu kao negativ budućih ćelija. Shematski prikaz lijevanja uz pomoć polimerne pjene je na slici 10. [11], [17]



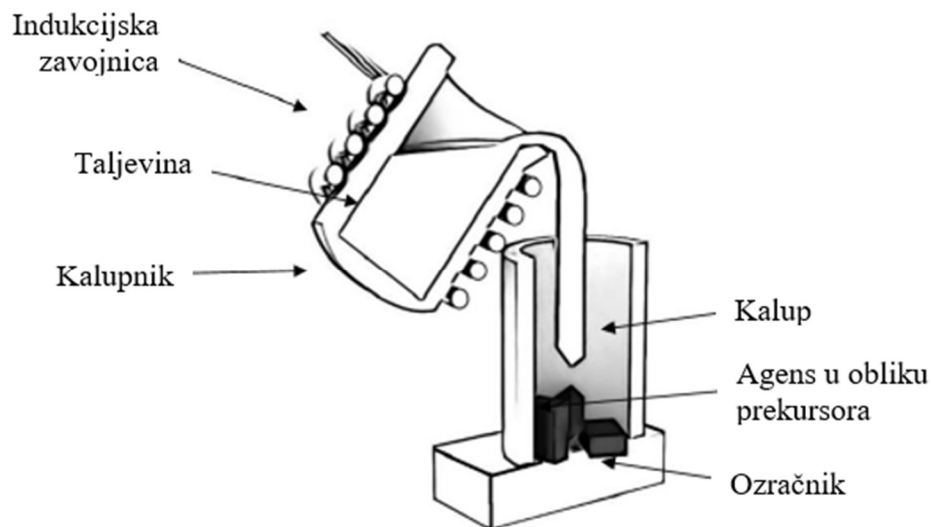
Slika 9 Lijevanje oko ćelijastih punila [17]



Slika 10 Lijevanje pomoću polimerne pjene [11]

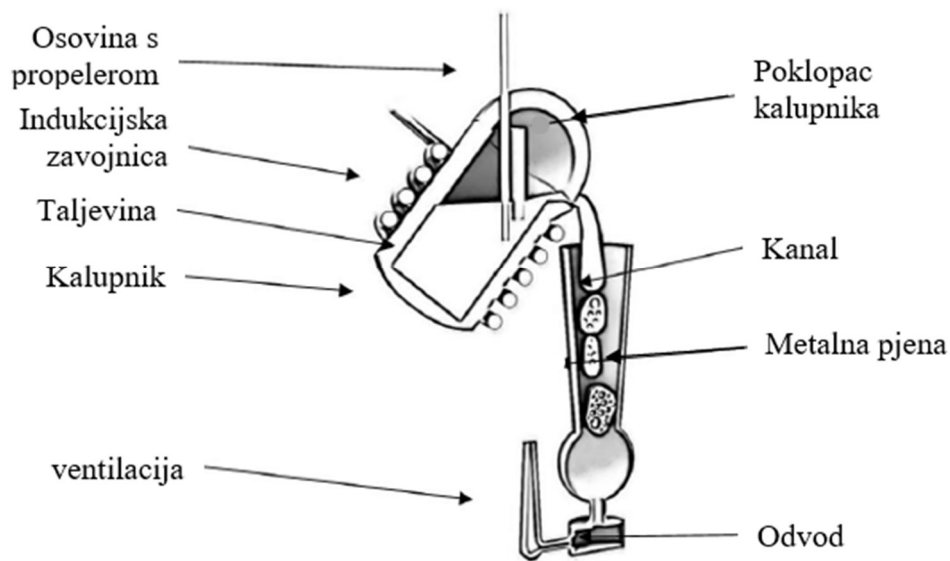
Lijevanje s agensom u obliku prekursora ne zahtjeva u postupku lijevanja hermetički zatvorenu komoru s plinom pod tlakom. Prekursor je mješavina aluminijskog praha i titanijevog hidrida te se proizvode nekim od postupka kompaktiranja, poput ECAP postupka kutnog ekstrudiranja (eng. *Equal Channel Angular Pressing*). Ovim postupkom se smanjuju troškovi proizvodnje do

70 % zbog manjih količina upotrijebljenog agensa za upjenjavanje. Prednost u ovom postupku je ta što gotovo da nema škarta u proizvodnji. Ulijevanjem rastaljene sirovine preko prekursora dovodi do upjenjavanja. Taljevina ispunjava prostor oko prekursora te svojom toplinom zagrijava prekursor pri čemu dolazi do oslobađanja plina koji stvara ćelije metalne pjene. Slika 11 shematski prikazuje postupak proizvodnje metalne pjene lijevanjem s agensom u obliku prekursora. [17]



**Slika 11 Lijevanje metalne pjene s agensom u obliku prekursora [17]**

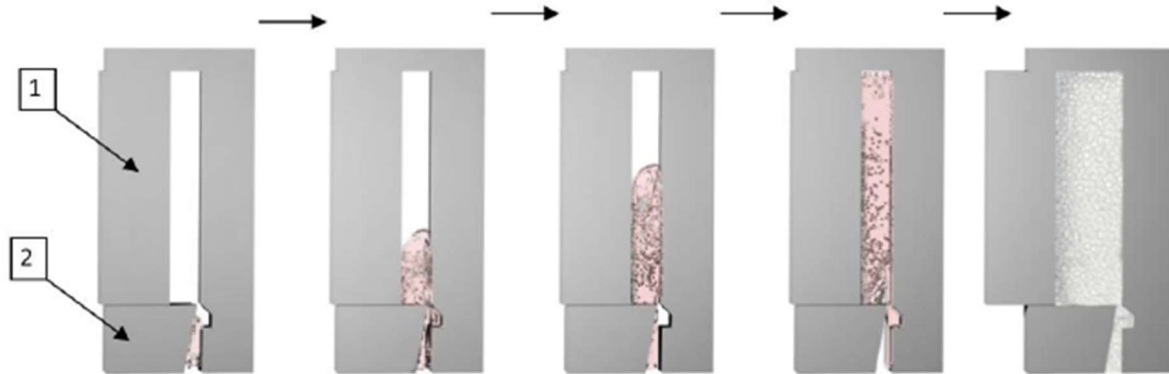
Lijevanje direktnim ubrizgavanjem plina se koristi za proizvodnju metalnih pjena u 6 mm do 7 mm širokim keramičkim kalupima. Zrak pod pritiskom se kroz propeler ubrizgava u taljevinu. Taljevina najprije ispunjava kalupnik te se spušta u kanal u kojem ispunjava kalup. Nakon 20 sekundi kalup se vadi iz kalupnika kako bi se metalna pjena mogla ohladiti. Slika 12 shematski prikazuje postupak preciznog lijevanja s direktnim ubrizgavanjem plina. [17]



**Slika 12** Precizno lijevanje s direktnim ubrizgavanjem plina [17]

Povećanjem temperature lijevanja može se dobiti kvalitetnija površina odljevka, ali se stvara više škarta te se povećava gustoća. Ovim se postupkom dobivaju metalne pjene veće gustoće u usporedbi s drugim postupcima. [17]

Lijevanje metalnih pjena pod visokim tlakom se zasniva na ubrizgavanju taljevine u čelični kalup velikom brzinom. Tlak od nekoliko desetaka MPa se primjenjuje nakon ispunjavanja kompletnog kalupa. U odnosu na uobičajeni tlačni lijev, vrijeme ekspaniranja je duže i tlak je veći. Agensi za upjenjavanje su najčešće titanijev hidrid ili magnezijev hidrid ( $MgH_2$ ). U odabiru agensa veliku ulogu imaju temperatura i brzina taljenja agensa. Slika 13 prikazuje princip lijevanja pod visokim tlakom. [17]

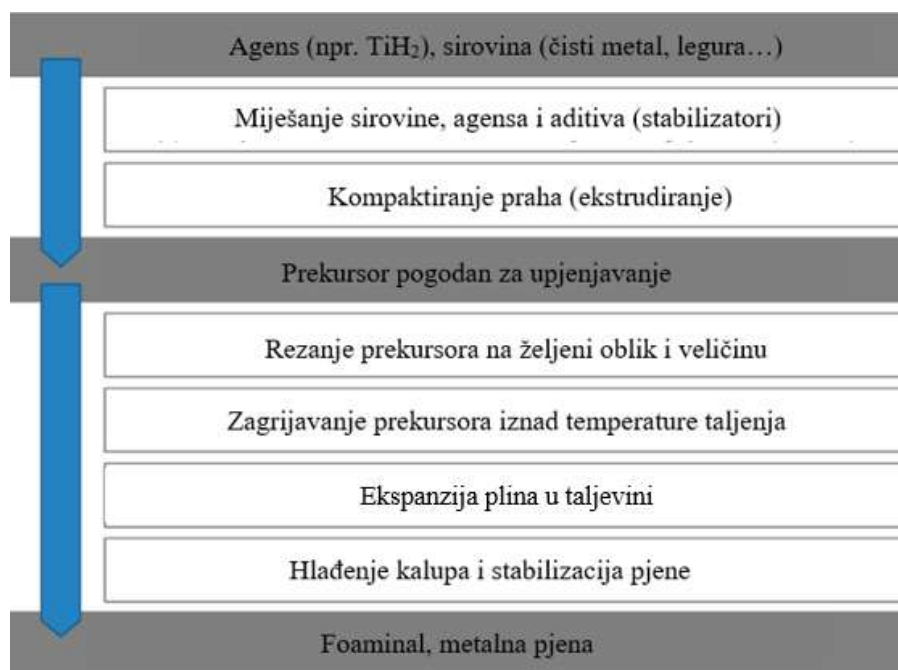


Slika 13 Lijevanje pod visokim tlakom, 1 – pomični dio, 2 – nepomični dio [17]

#### 4.1.5. Taljenje zbijenog praha

Ovaj postupak se svrstava u postupke proizvodnje metalnih pjena iz rastaljenog metala premda do upnjavanja može doći i dok je osnovni metal još uvijek u krutom stanju. Postupak počinje proizvodnjom prekursora. Metalni se prah miješa s agensom te se kompaktira čineći jednu homogenu cjelinu. Proces je kontinuiran i izvodi se ekstrudiranjem te se prekursor reže na manje dijelove kako bi bio lakši za rukovanje. Zatim se prekursor stavlja u kalup i tali. Prilikom zagrijavanja, agens unutar prekursora oslobađa plin koji uzrokuje stvaranje mjehurića. Kao agens se najčešće koristi titanijev hidrid ili kalcijev karbonat. Temperatura pri kojoj se titanijev hidrid počinje raspadati je iznad 400 °C, a kalcijev karbonat iznad 600°C što je ispod temperature taljenja aluminijsa. Doziranjem količine i vrste agensa može se kontrolirati poroznost odnosno gustoća metalne pjene. Nedostatak ovog postupka je visoka cijena za metale visokog tališta te nemogućnost kontroliranja veličine i oblika mjehurića. Slika 14 prikazuje korake u proizvodnji metalnih pjena taljenjem zbijenog praha. [13]





Slika 14 Postupak proizvodnje metalnih pjena taljenjem zbijenog praha [13]

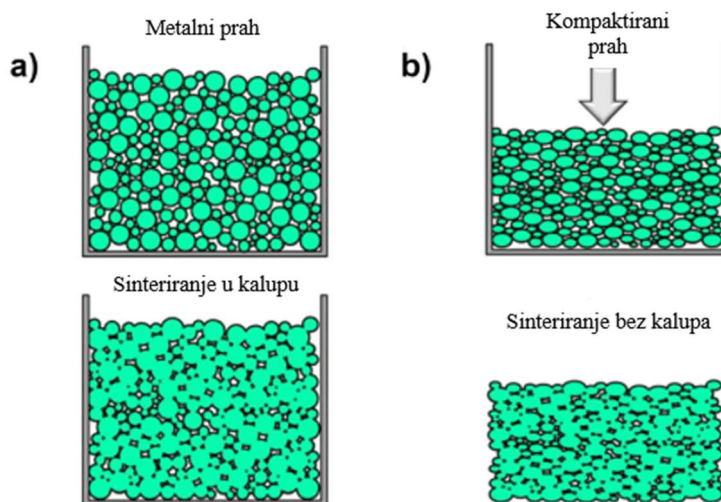
## 4.2. Stvaranje metalne pjene iz čvrste faze

Ova se skupina postupaka primarno primjenjuje za metale visokog tališta. Proizvodnja iz čvrste faze generalno ima bolju kontrolu nad morfologijom ćelija u odnosu na stvaranje metalne pjene iz tekuće faze. Postupci stvaranja metalnih pjena iz čvrste faze konstantno se razvijaju, no za sada se nijedan postupak nije pokazao kao univerzalan za većinu metala i njihovih legura. Ovisno o tome koju je metalnu pjenu potrebno proizvesti, primjenjuju se različiti postupci. [12]

### 4.2.1. Sinteriranje metalnog praha

Sinteriranje metalnog praha je najjednostavniji postupak stvaranja metalne pjene. Osnova je za većinu drugih postupaka poput sinteriranja korištenjem šupljih metalnih kuglica. Temperatura na kojoj se odvija postupak sinteriranja titanija je između  $0,65 T_m$  i  $0,75 T_m$  pri čemu se ostvaruje značajna ušteda energije koja bi se potrošila pri proizvodnji titanijeve pjene iz tekuće faze. Metalni se prah ne mora kompaktirati ukoliko je potrebna veća poroznost. Kada se kompaktira konačni će proizvod imati manju poroznost i veću gustoću. Slika 15 prikazuje postupak sinteriranja metalnog praha. Prah se stavlja u posudu te zagrijava na potrebnu temperaturu. Moguće je koristiti određeni kalup kako bi se dobio željeni oblik. Svojstva praha su presudna

za konačna svojstva pjene. Najveća poroznost se postiže bez kompaktiranja praha, ali i najmanja čvrstoća pjene. [12]



**Slika 15 Sinteriranje metalnog praha, a) bez kompaktiranja i s kalupom, b) s kompaktiranjem bez kalupa [12]**

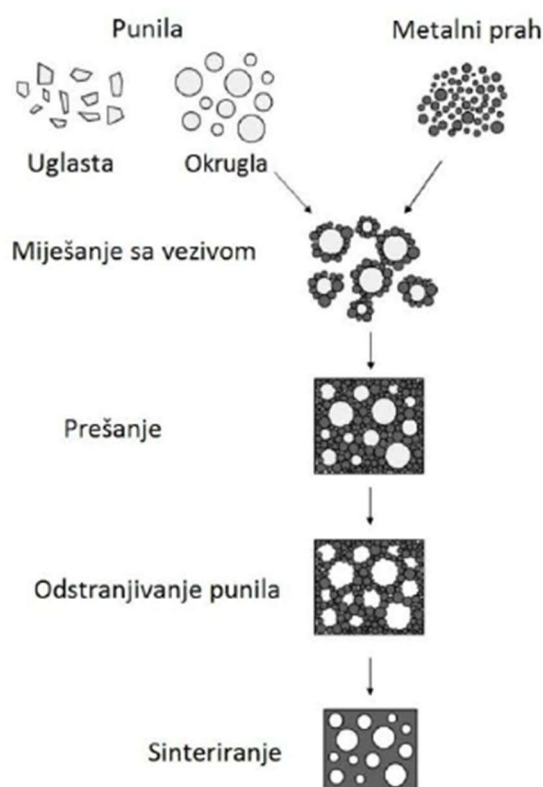
#### 4.2.2. Zarobljavanje plina

Postupak zarobljavanja plina (engl. *Gas entrapment*) zasniva se na kompaktiranju metalnog praha kako bi se između čestica praha zarobio plin. Izumio ga je Michael Kearns prvenstveno za proizvodnju pjena od titanija i njegovih legura. Metalni se prah stavlja u posudu te zagrijava na 800 °C 8 sati. Zatim se dodaje argon (Ar) uz postupak vrućeg izostatskog prešanja (HIP) pri 950 °C i otprilike 100 MPa u trajanju od 4 sata. Takav kompaktirani prah se podvrgava procesu žarenja pri temperaturi od 1240 °C te trajanju od 65 sati. Prilikom žarenja dolazi do ekspaniranja argona. Ovim se postupkom dobije titanijeva pjena sa 26 % poroznosti. Postupak značajno ovisi o tlaku plina. [12]

#### 4.2.3. Formiranje metalne pjene uz pomoć punila

Uz pomoć punila moguće je proizvesti metalne pjene sa željenom morfologijom ćelija. Punila se miješaju s metalnim prahom i vezivom koje obavlja zadaću vezanja metalnog praha na površinu punila koja se kasnije uklanjaju. Ovisno o količini, rasporedu i obliku punila, nastat će metalne pjene različitih svojstava. Volumni udio punila u smjesi je često iznad 50 %. Punila

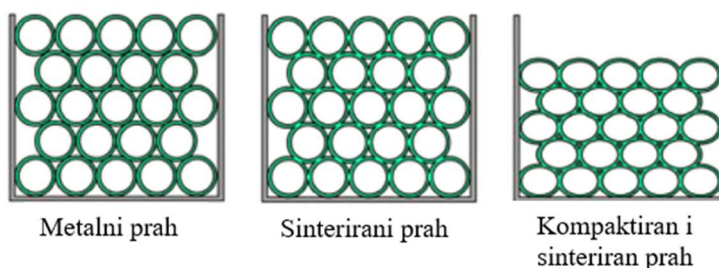
su najčešće izrađena od polimera ili natrijeva klorida (NaCl). Bilo koji materijal koji se može ukloniti bez oštećenja strukture pjene se može koristiti za punilo. Smjesa punila i metalnog praha preša se na određeni oblik te se potom punilo odstranjuje primjerice zagrijavanjem ili otapanjem. Najjednostavnija metoda izdvajanja punila iz pjene je otapanjem. Postupak uklanjanja se mora pravilno provesti kako ne bi došlo do oštećenja strukture pjene. Da bi se punila potpuno otopila, otapalo mora moći proći neometano kroz čitavu strukturu pjene što znači da se ovim postupkom uspješno proizvode jedino pjene otvorenih ćelija. Nakon što se uklone sva punila, takav se obradak sinterira kako bi mu se povećala čvrstoća. Ovaj je postupak sličan klasičnom sinteriranju metalnog praha uz iznimku postizanja veće poroznosti nakon uklanjanja punila. Slika 16 shematski prikazuje proizvodnju metalnih pjena uz pomoć punila i sinteriranja. [12]



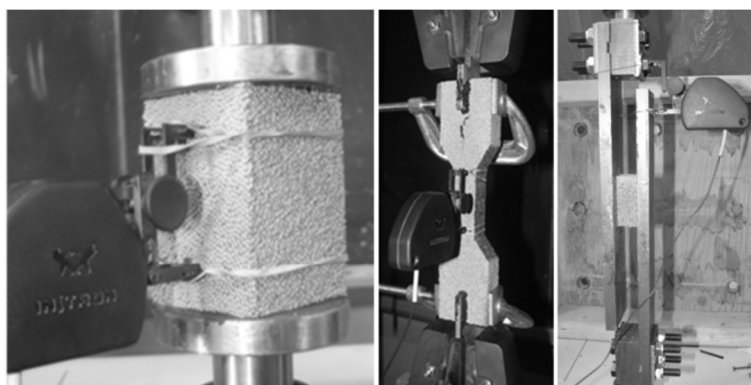
Slika 16 Dobivanje metalne pjene uz pomoć punila i sinteriranja [11]

#### 4.2.4. Sinteriranje korištenjem šupljih metalnih kuglica

Jedna od najjednostavnijih metoda stvaranja poroznosti u metalu je korištenjem šupljih metalnih kuglica. Postupak počinje prevlačenjem metalnog praha preko kuglica expandiranog polistirena. Jedan od postupaka je da se kemijskim prevlačenjem metalni prah veže na polimerne kuglice. Drugi je korištenje posebnih veziva koja zadržavaju metalni prah na polimernim kuglicama. Na slici 17 shematski je prikazan postupak proizvodnje sinteriranjem metalnog praha oko kuglica, pri čemu polistiren izgara, uz naknadno kompaktiranje. Na slici 18 prikazane su metalne pjene dobivene ovim postupkom tijekom mehaničkih ispitivanja. Metalne šuplje kuglice je moguće dobiti i ispuhivanjem smjese metalnog praha i kuglica polistirena kroz koaksijalne mlaznice koja se nakon brzog sušenja sinterira. Ubacivanjem metalnog praha u međuprostor kuglica dobivaju se metalne pjene sa zatvorenim ćelijama. Prednost ove metode je dobivanje jednolikih ćelija. [12]



Slika 17 Sinteriranje šupljih metalnih kuglica [12]

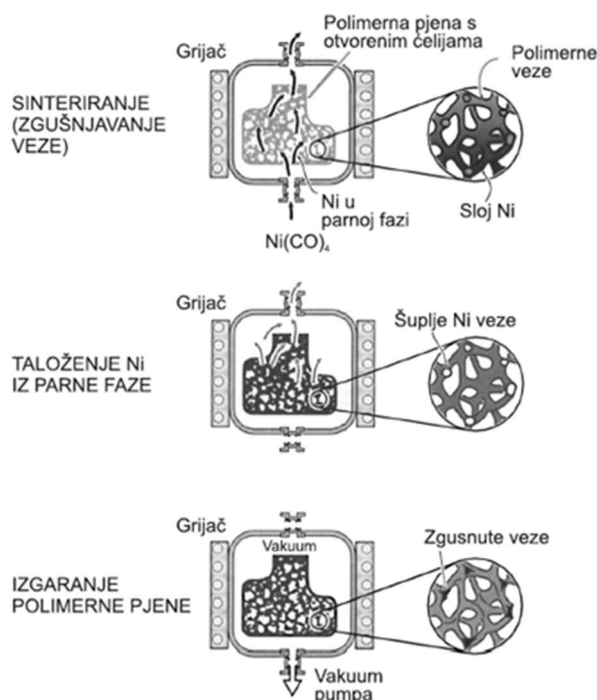


Slika 18 Mehanička ispitivanja metalne pjene dobivene korištenjem šupljih metalnih kuglica

[18]

### 4.3. Stvaranje metalne pjene kemijskim taloženjem iz parne faze (CVD)

Postupak kemijskog taloženja iz parne faze (CVD) zasniva se na taloženju metala u plinovitom stanju na polimernu pjenu. Ovim postupkom se uspješno proizvode niklove (Ni) pjene trgovačkog naziva Incofoam. Punila se proizvode najčešće od poliuretanskih pjena. Ovim postupkom niklov karbonil ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ) se zagrijava u zatvorenoj posudi pri čemu nastaje niklova para. Ta se para hvata za površinu poliuretana i tvori buduće ćelije metalne pjene. Debljina nastalog sloja na poliuretanskoj pjeni ovisi o koncentraciji niklovog karbonila te koliko se dugo poliuretanska pjena izlaže niklovoj pari. Nakon hlađenja poliuretanska pjena se uklanja toplinskim postupkom ili kemijskim otapanjem. Slika 19 opisuje postupak proizvodnje niklove pjene taloženjem iz parne faze. [10], [12]

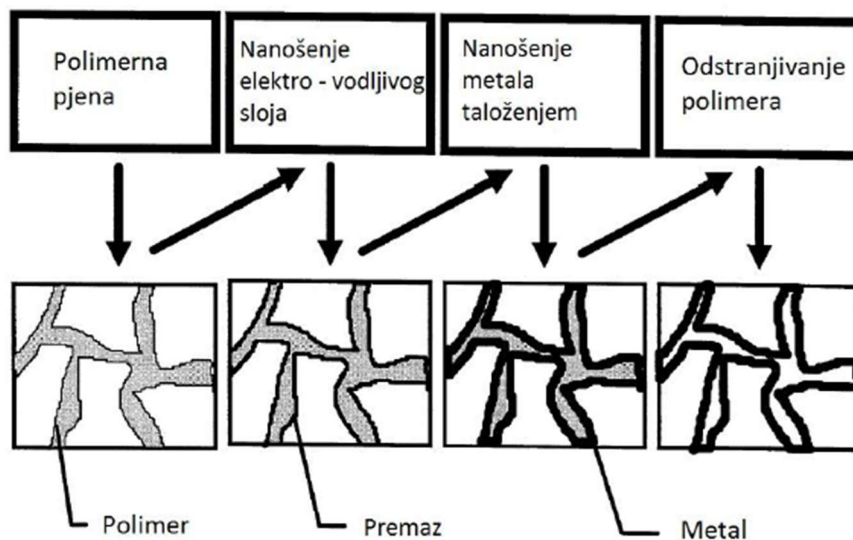


Slika 19 Proces proizvodnje niklove pjene taloženjem iz parne faze [9]

### 4.4. Stvaranje metalne pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze

Ovi postupci nisu česti u primjeni zbog visoke cijene proizvodnje. Postupak taloženja iz tekuće faze je sličan taloženju iz parne faze uz razliku agregatnog stanja polaznog materijala. Kod elektrotaloženja iz tekuće faze metalni se ioni talože na polimerne pjene otvorenih ćelija. Određene polimerne pjene prije nanošenja metalnih iona se moraju premazati elektrovodljivim

premazom. Za tu svrhu se može upotrijebiti primjerice grafit. Nakon elektrotaloženja metalnih iona, polimerna se pjena uklanja toplinskim postupkom te ostaje metalna pjena. Slika 20 shematski prikazuje postupak proizvodnje metalne pjene elektrotaloženjem na polimernu pjenu. [10], [12]



Slika 20 Proizvodnja metalne pjene procesom elektrotaloženja [11]

#### 4.5. Aditivna proizvodnja metalnih pjena

Aditivna proizvodnja, poznatija pod nazivom 3D printanje, uvela je nove mogućnosti u izradi metalnih pjena. Mogućnost stvaranja uzorka identičnog digitalnom modelu otvorila je vrata izradi kompleksnih struktura poput implantata u medicini. Slika 21 prikazuje jedan takav prototip metalne pjene. Posebna značajka aditivne proizvodnje je u tome što je moguće izraditi vrlo male proizvode koji svojim dimenzijama odgovaraju rezoluciji korištenog uređaja. Aditivna proizvodnja moguća je kroz nekoliko postupaka. Moguća je direktna proizvodnja primjerice laserskim sinteriranjem ili taljenjem snopom elektrona. Aditivna proizvodnja ovisno o postupku proizvodnje može biti svrstana u stvaranje pjene iz čvrste faze ili tekuće faze. Primjer stvaranja iz čvrste faze je printanje pomoću adhezivne tekućine kojom se povezuje metalni prah. Selektivno lasersko sinteriranje primjer je aditivne proizvodnje metalnih pjena iz tekuće faze. Izrada metalnih pjena aditivnim postupcima proizvodnje zahtjeva velika početna ulaganja te izrada proizvoda traje duže nego kod uobičajenih postupaka. Iz tih se razloga

aditivna proizvodnja koristi kod proizvoda visokih zahtjeva izrade. Najčešće su to proizvodi u području medicine i biomehanike. Aditivna proizvodnja će se zasigurno dalje razvijati zbog mogućnosti jednostavnog oblikovanja složenih digitalnih modela. [12]



**Slika 21** Prototip nadomjestka ljudske kosti od Ti-6Al-4V legure proizveden pomoću postupka taljenja snopom elektrona [12]

## 5. PRIMJENA METALNIH PJENA

Metalne pjene sve su češće u upotrebi te sve više istiskuju neke do sada korištene materijale. Daljnjim razvojem postupaka proizvodnje svojstva se kontinuirano unapređuju, a cijena pada. U ovom dijelu rada opisane su neke od najčešćih primjena metalnih pjena. [14]

### 5.1. Industrijska upotreba metalnih pjena

Metalne pjene zbog svojih mogućnosti upijanja vibracija koriste se kod alata koji stvaraju vibracije (npr. industrijske bušilice). Upotreba metalnih pjena produžuje radni vijek takvih bušilica, povećava vremenski period između servisa te omogućava veću produktivnost čime opravdavaju svoje početne visoke troškove. [14]

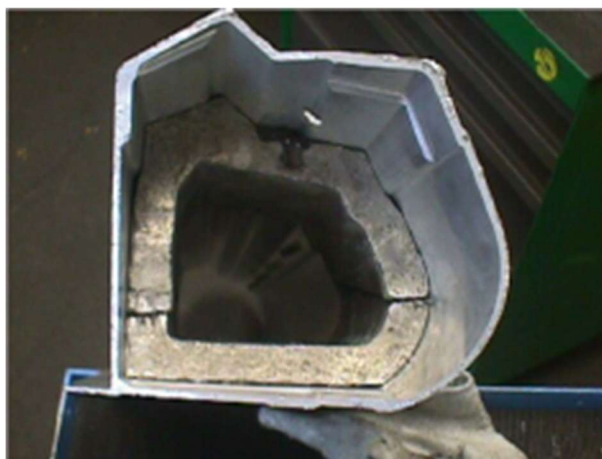
Nosivi dijelovi industrijskih strojeva moraju biti čvrsti, a s obzirom da čine velik dio ukupne mase, bilo bi poželjno da su što lakši. Na slici 22 prikazana je nosiva greda jedne dizalice napravljena od aluminijske pjene. [14]



Slika 22 Nosiva greda od aluminijske pjene [14]

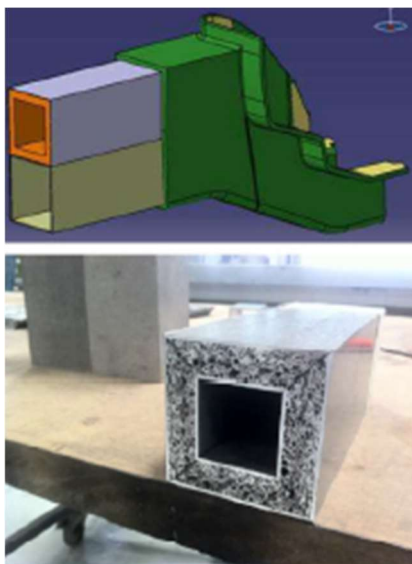
Automobilska industrija prati visoke sigurnosne standarde, a metalne pjene sa svojom sposobnošću apsorpcije energije i malo gustoćom poželjan su materijal za izradu sigurnosnih elemenata. Na slici 23 prikazan je prag vrata iz jednog modela Ferrarija. Pragovi su značajan sigurnosni faktor prilikom bočnog sudara te moraju biti izrađeni od materijala koji mogu apsorbirati energiju udara, a u isto vrijeme moraju biti lagani kako se ne bi narušile performanse vozila. [14]





**Slika 23** Prag Ferrarija ispunjen aluminijevom pjenom [14]

S obzirom da električni automobili imaju povećanu masu zbog baterijskih sustava, korištenjem metalnih pjena može se značajno smanjiti težina konstrukcije i povećati sigurnost putnika uz zadržavanje performansi. Na slici 24 je prikazan CAD model profila zadužen za apsorpiranje energije udarca u električnom automobilu. [14]



**Slika 24** Kvadratni profil od aluminijeve pjene [14]

Željeznički transport predstavlja važnu ulogu u trgovini, dok cijena transporta utječe na konačnu cijenu nekog proizvoda. Sendvič konstrukcije od metalnih pjena mogu smanjiti masu

samih vagona te time ostaviti mjesta za veću nosivost i time smanjiti troškove transporta. Njemački brzi vlakovi već imaju implementirane metalne pjene u svojoj strukturi. Uz smanjenje mase i zadržavanje jednake čvrstoće, metalne pjene u vlakovima smanjuju vibracije te smanjuju broj koraka u postupku proizvodnje u odnosu na proizvodnju s klasičnim materijalima. Slika 25 prikazuje strukturu njemačkog ICE vlaka s trupom od aluminijske pjene. [14]



**Slika 25** Trup ICE vlaka [14]

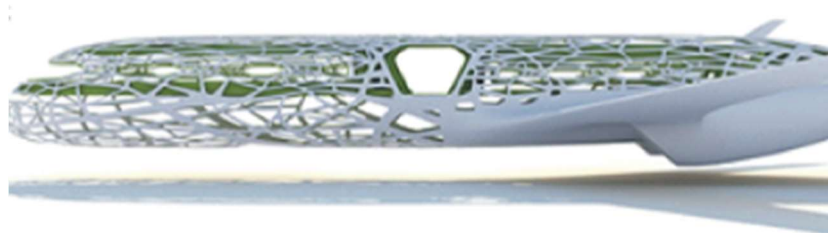
U slučaju sudara vlaka na branicima nekih proizvođača montiraju se i blokovi od metalnih pjena koji su dizajnirani da prime veliki dio udarne energije. Primjer takvog bloka dan je na slici 26. [14]



**Slika 26** Blok od metalne pjene na braniku vlaka [14]

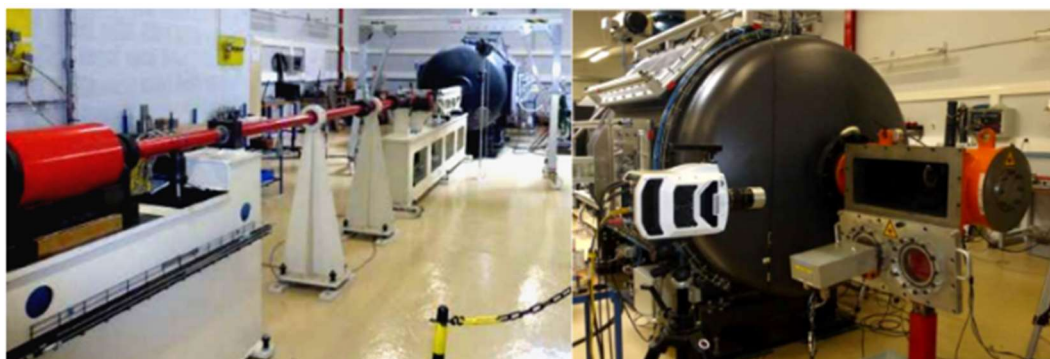
U brodogradnji masa brodske konstrukcije i njeno težište također igraju značajnu ulogu kod nosivosti i stabilnosti broda. Cilj je sve dijelove iznad razine vode napraviti što lakšima kako bi se povećale stabilnost i nosivost. [14]

U zrakoplovnoj industriji metalne pjene se koriste za smanjenje mase čime se povećava domet i smanjuje cijena leta, ali i za zaštitu od udara ptica. Slika 27 prikazuje koncept Airbusovog zrakoplova s trupom izrađenim od metalne pjene inspiriran skeletonom ptica. [19]



Slika 27 Airbusov koncept zrakoplova [19]

Metalne pjene su svoju primjenu našle i u svemiru gdje vanjski plašt satelita pruža zaštitu od udara meteorita, ali i sve prisutnijeg svemirskog smeća. Slika 28 prikazuje sustav za provođenje eksperimenata udara projektila u zaštitni plašt svemirskih letjelica. [20]



Slika 28 Sustav za simuliranje sudara u svemiru [20]

## 5.2. Funkcionalne primjene metalnih pjena

S obzirom da metalne pjene mogu iznimno dobro prigušiti vibracije, postavljaju se u velikim dvoranama za kontrolu zvuka. Na slici 29 prikazan je strop restorana prekriven metalnom

pjenom. Uz malu masu montaža takvog stropa nije komplicirana, a različita veličina ćelija omogućava apsorpiranje različitih frekvencija zvuka. U svrhu prigušenja zvuka metalne se pjene koriste i u vlakovima, metroima ili primjerice ispod autocesta i kao bukobrani. [14]



Slika 29 Strop restorana od metalne pjene [14]

S obzirom na izvrsnu toplinsku i kemijsku postojanost zajedno s dobrim zvučnim svojstvima, metalne pjene svoju primjenu imaju i kod proizvodnje prigušivača, DPF filtera dizelskih čestica (eng. *Diesel Particulate Filter*) i izmjenjivača topline. [14]

Velika površina ćelijaste strukture dobre toplinske vodljivosti čini metalne pjene s otvorenim ćelijama idealnim pri izradi izmjenjivača topline. Na slici 30 prikazani su različiti izmjenjivači topline, a na slici 31 različiti filteri izrađeni od metalne pjene. [21]

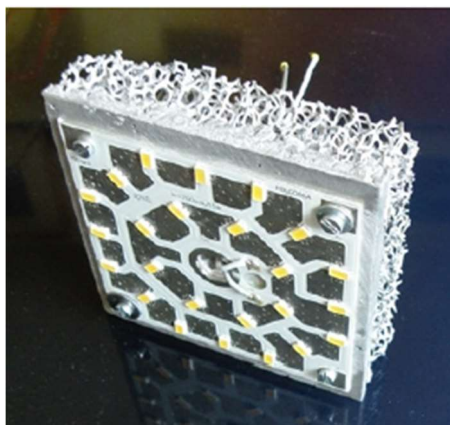


Slika 30 Različiti izmjenjivači topline od metalne pjene [14]



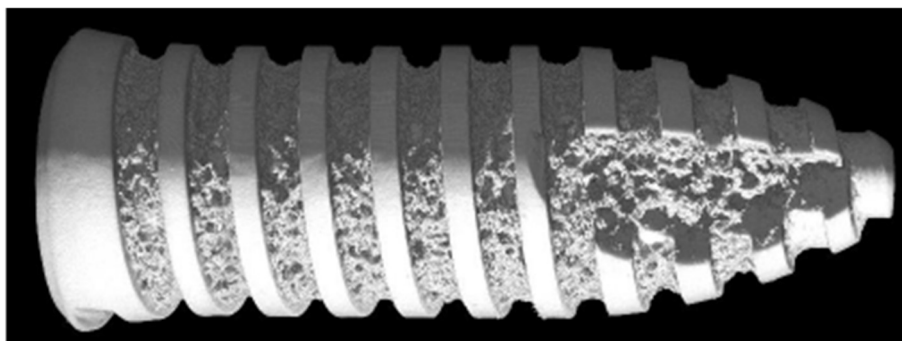
**Slika 31** Različiti filteri od metalne pjene [14]

Metalne se pjene koriste i u izradi specijalnih izmjenjivača topline za stabiliziranje leće elektronskih pretražnih mikroskopa te kod hlađenja medicinskih lasera. Na slici 32 prikazano je pasivno hlađenje LED dioda. [14]



**Slika 32** Pasivno hlađenje LED dioda pomoću metalne pjene [14]

Metalne pjene zbog mogućnosti prilagodbe gustoće pronašle su svoju upotrebu i u medicinske svrhe kao što su primjerice implantati koji moraju biti gustoće slične ljudskoj kosti, a koji svojom poroznom strukturom ubrzavaju osointegracijske procese. Titanijeve pjene pružaju izvrsnu biokompatibilnost. Upotreba metalnih pjena u medicinske svrhe još uvijek nije dovoljno istražena te zasigurno postoje još mnoga područja potencijalne primjene. Slika 33 prikazuje zubni implantat od titanijeve pjene. [14]



Slika 33 Zubni implantat od titanijeve pjene [14]

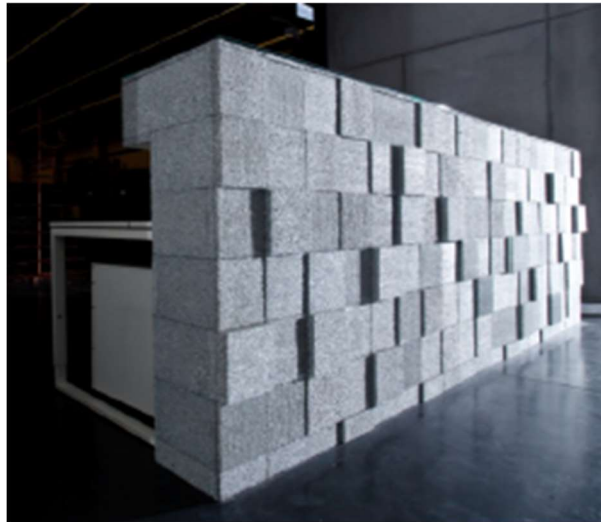
### 5.3. Primjena metalnih pjena u arhitekturi i umjetnosti

Jedinstvena površina uz malu masu omogućava primjenu metalnih pjena u stambenim i poslovnim zgradama. Metalne pjene sa zatvorenim ćelijama se ponašaju kao izvrstan toplinski izolator dok je prvi sloj otvorenih ćelija zaslužan za hrapavi izgled fasade. Primjer takve fasade je na slici 34 dok je u donjem desnom dijelu slike prikazana tekstura takve fasade. [14]



Slika 34 Protstantska crkva u Španjolskoj s fasadom od alumijeve pjene [14]

Razvijanjem jeftinijih postupka proizvodnje metalne pjene pronalaze svoju namjenu i u estetske svrhe. Jedan takav primjer je recepcija poslovne zgrade u Mađarskoj prikazana na slici 35. [14]



**Slika 35**    **Recepcija poslovne zgrade od aluminijeve pjene [14]**

Slika 36 prikazuje postolje skulpture izrađeno od aluminijske pjene. [14]



**Slika 36**    **Skulptura lava s postoljem od aluminijske pjene [14]**

---

## 6. POSTUPCI KARAKTERIZACIJE METALNIH PJENA

Kod postupaka karakterizacije postoji podjela na nerazorna i razorna ispitivanja. Sam naziv govori da kod razornih ispitivanja dolazi do nepovratnog oštećenja ispitivanog dijela pa takva ispitivanja nisu uvijek prikladna, ali su za određivanje nekih svojstava neizbježna. Dvije su razine ispitivanja, mikroskopska te makroskopska. Kod makroskopske razine uzorak se razmatra kao homogen i dobivaju se svojstva za čitav uzorak, a kod mikroskopske razine razmatra se samo dio uzorka. [22], [23]

### 6.1. Nerazorna ispitivanja

#### 6.1.1. *Gustoća*

Gustoća metalne pjene može se odrediti Arhimedovim principom. Razmatra se ukupna masa uzorka te volumen koji uzorak istisne iz tekućine poznate gustoće. Uzorke je nužno obložiti tankim polimernim filmom kako bi se prekrile pore kod pjena s otvoreni ćelijama ili eventualne nesavršenosti kod pjena sa zatvorenim ćelijama. Druga metoda se odnosi na mjerenje volumena tako što se ispitni uzorak oblikuje na matematički definirano tijelo. Uz poznatu masu uzorka i volumen izračunava se gustoća. [24]

#### 6.1.2. *Ispitivanje penetrantnim tekućinama*

Kod pjena sa zatvorenim ćelijama često ostaju nesavršenosti na stjenkama ćelija koje je moguće ispitati penetrantima. Penetrantna tekućina prodire u pukotine u stjenkama ćelija. Sušenjem te tekućine ostaju obojana mjesta gdje je penetrantna tekućina uspjela ući te se dobiva jasan pregled prisutnih nesavršenosti. [24]

#### 6.1.3. *Ispitivanje pomoću vrtložnih struja*

Indukcijom dolazi do stvaranja vrtložnih struja uz nastajanje magnetskog polja oko uzorka. Magnetsko se polje očitava sekundarnom zavojnicom dok uzbudna zavojnica proizvodi okretno polje. S obzirom da poroznost utječe na izlazni signal magnetskog polja, ispitivanje pomoću vrtložnih struja pogodno je za mikroskopsko ispitivanje lokalne gustoće, geometrije i veličine ćelija. [24]

#### 6.1.4. *Akustična mjerenja*

Akustična su mjerenja česta za metalne pjene s obzirom da se primjenjuju za redukciju zvuka. Apsorpcijska svojstva uzorka mjere se u impedancijskoj cijevi. Na jedan kraj cijevi stavlja se



uzorak, a zvučni emiter i detektor na drugi kraj. Mjerenjem se razmatra pad jačine vala kao funkcije frekvencije. [23]

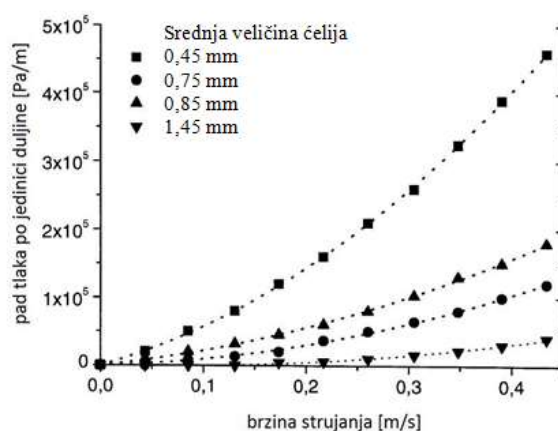
### 6.1.5. Ispitivanje vibracijskih svojstava

Za određivanje modula elastičnosti te sposobnosti prigušenja vibracija koristi se vibracijska analiza. Uzorak oblika duge šipke kvadratnog ili okruglog poprečnog presjeka podvrgava se vibracijama. Magnetno polje prolazi kroz uzorak, a rezultati se mjere impedancijskom zavojnicom. Ova ispitivanja još nisu usavršena i problem predstavlja nehomogenost strukture po cijelom presjeku metalne pjene. Tako dobiveni modul elastičnosti ovisi o raspodjeli mase uzorka. [24]

### 6.1.6. Porozimetrija i permeometrija

Površina ćelija, njihova veličina te međuprostor utječu na svojstva metalnih pjena pa se zbog toga provode ispitivanja kako bi se dobio što bolji uvid u strukturu pjene. Porozimetrija pomoću žive daje podatke o veličini ćelija. Živa uz djelovanje pretlaka penetrira u uzorak te se dobiveni podaci o tlaku dovode u vezu s veličinom ćelija. Apsorpcijom plina može se točno utvrditi ukupna unutarnja površina uzorka čak i za vrlo male ćelije. [24]

Permeometrija proučava protok plina ili kapljevine kroz porozni materijal. Očitava se pad tlaka po visini pjenastog uzorka. Pad tlaka je u ovisnosti o srednjoj brzini tekućine pri čemu nastaje linearna ovisnost za spore protoke, te kvadratna ovisnost za veće protoke. Ukoliko je poznata viskoznost tekućine, moguće je dobiti permeabilnost i faktor trenja uzorka. Ova metoda daje nešto niže vrijednosti od metode apsorpcije plina zato što tekućina prolazi samo kroz unutarnji dio uzorka. Slika 37 prikazuje ovisnost pada tlaka o brzini strujanja. [24]



Slika 37 Ovisnost pada tlaka o brzini strujanja za različite veličine ćelija [24]

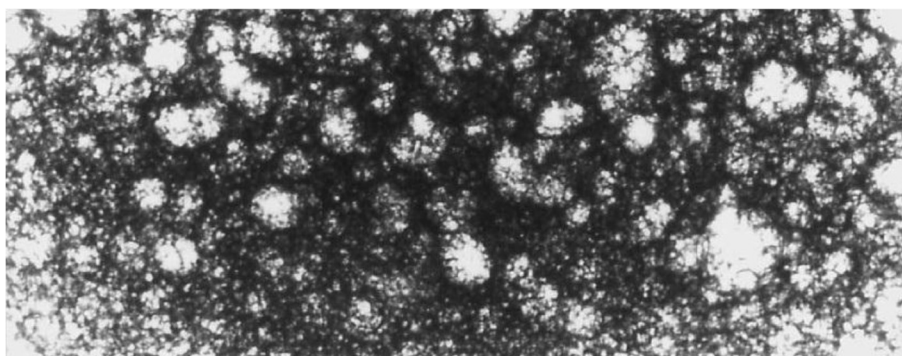
### **6.1.7. Električna i toplinska mjerenja**

Toplinska se provodljivost mjeri eksperimentalno prilagođenim postupkom prolaska topline kroz poprečni presjek uzorka. Ovisno o tipu ćelija, metalna pjena može biti toplinski izolator ili provodnik topline. Otvorene ćelije omogućavaju provodnost topline, a zatvorene se ponašaju kao izolator. [24]

Električna se provodnost određuje mjerenjem električnog otpora. Električni otpor se očitava pomoću četiri točke s bakrenim kontaktnim pločicama. [24]

### **6.1.8. Rendgenska radiografija i radioskopija**

Ova metoda se zasniva na upijanju rendgenskih zraka. Zrake se usmjere prema uzorku te se mjeri pad jačine zraka prolaskom kroz uzorak. Skeniranjem određenog presjeka u dvije dimenzije nastaje 2D apsorpcijska karta uzorka. Ovim se postupkom ispituju uglavnom pjene s manjim gustoćama te tanji uzorci kako bi se mogla dobiti stvarna slika strukture uzorka. Kod debljih uzoraka nije moguće dobiti stvarni prikaz strukture zbog nemogućnosti prolaska rendgenskih zraka kroz cijeli uzorak. Slika 38 prikazuje rendgensku snimku olovne pjene. [24]

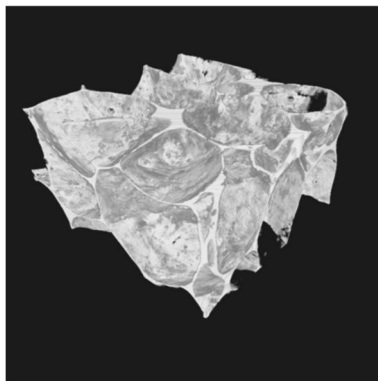


**Slika 38 Rendgenska snimka olovne pjene [24]**

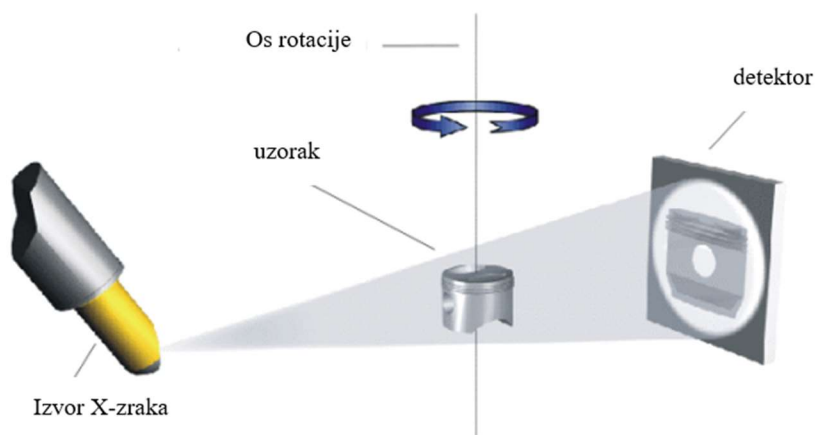
### **6.1.9. Računalom podržana rendgenska tomografija (CT)**

Rendgenska tomografija omogućava prenošenje uzorka u digitalni model. Pomoću CT-a dobiva se trodimenzionalni model metalne pjene. Model se stvara na način da se uzorak postavi na rotirajuće postolje te rendgenske zrake prolaze kroz uzorak i sakupljaju se na detektoru. Skupljanjem više projekcija na detektoru prilikom rotacije uzorka za 360° dobiva se trodimenzionalna struktura vidljiva na slici 39. Princip rada prikazan je na slici 40. Rendgenska tomografija se uobičajeno koristi za određivanje defekata, mjerenje geometrije, pregled

površine. U slučaju metalnih pjena služi za određivanje veličine, broja i rasporeda ćelija te otkrivanje nesavršenosti u stijenkama ćelija. [24], [25]



Slika 39 CT snimka metalne pjene [24]

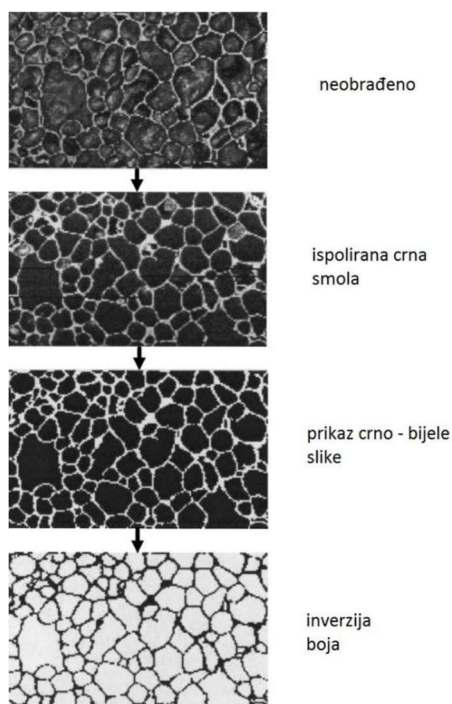


Slika 40 Princip rada 3D računalne tomografije [25]

## 6.2. Razorna ispitivanja

### 6.2.1. Svjetlosna mikroskopija

Samo ispitivanje pod mikroskopom nije razorna metoda, ali priprema uzorka koja uključuje rezanje, brušenje, poliranje te nagrizanje jest, te se iz tog razloga svjetlosna mikroskopija ubraja u razorna ispitivanja. Kvalitetna priprema uzorka je nužna kako bi se dobili vjerodostojni podaci. S obzirom da je nužan kontrast između stijenki ćelija i šupljina, površina uzorka može se premazati crnom smolom te zatim polirati, slika 41. [24]



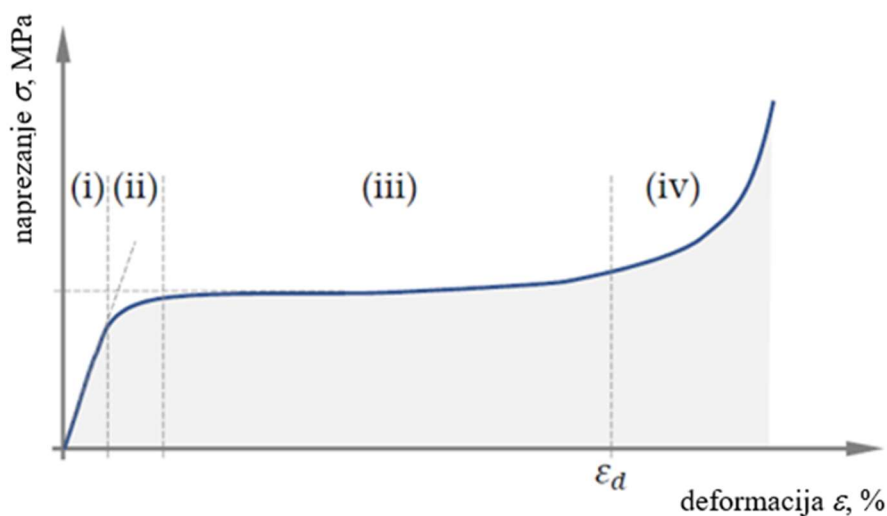
**Slika 41 Postupak analize površine metalne pjene [24]**

### 6.2.2. Mehanička ispitivanja

Metalne se pjene najčešće primjenjuju u uvjetima tlačnih naprezanja, a mehanička su ispitivanja nužna prije eksploatacije proizvoda. Ispitivanja mogu biti jednoosna ili višeosna. Najčešće se provode jednoosna tlačna ispitivanja, a ponekad se ispituje savojna čvrstoća, tvrdoća stijenki ćelija te smična čvrstoća. [26]

Jednoosna tlačna ispitivanja, sukladna normi ISO 13314:2011, obavljaju se na prizmatičnim ili cilindričnim (preporučeno) epruvetama s omjerom visine i širine između 1 i 2. Nužno je osigurati barem 10 puta veću poprečnu dimenziju epruvete od prosječne veličine ćelija kako ne bi došlo do utjecaja veličine ćelija na rezultate ispitivanja. Smanjenje dimenzija se može mjeriti direktno preko pomaka traverze kidalice ili je moguće postaviti na epruvetu ekstenziometar. Korištenjem ekstenziometra u praksi se pokazalo kao bolje rješenje za mjerenje deformacije uzorka. [26], [27]

Slika 42 prikazuje karakteristični dijagram tlačnog ispitivanja metalne pjene.



Slika 42 Karakteristični dijagram tlačnog ispitivanja metalne pjene [23]

Područje (i) predstavlja linearno povećanje deformacije s porastom opterećenja karakteristično za početnu krutost metalne pjene. Područje (ii) je prijelazna zona gdje nastaju prve lokalne deformacije. U području (iii) dolazi do naglog povećanja deformacije bez značajnog povećavanja opterećenja. Područje (iv) predstavlja zonu zgušnjavanja materijala gdje opterećenje naglo raste bez značajnog povećanja deformacije. U zadnjoj zoni dolazi do povećanja krutosti na razinu osnovnog metala. Površina područja obojanog sivo ispod krivulje napreznja – deformacija predstavlja maksimalnu količinu energije koju je uzorak sposoban apsorbirati. [23]

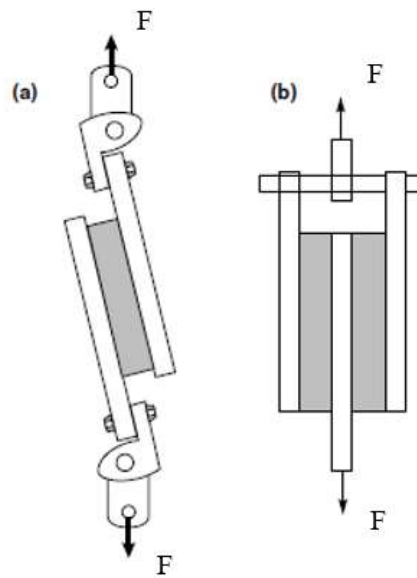
Tlačna se čvrstoća određuje prema normi ISO 13314:2011. Broj uzoraka ne bi smio biti manji od 3, a preporučeni minimum je 5 uzoraka zbog mogućeg velikog odstupanja rezultata što je posljedica nehomogene raspodjele ćelija u uzocima. Temperatura pri kojoj se obavlja tlačno ispitivanje može biti u rasponu od 10 °C do 35 °C. Na slici 43 prikazana je univerzalna kidalica na kojoj se provode tlačna ispitivanja. [27]



**Slika 43 Univerzalna kidalica**

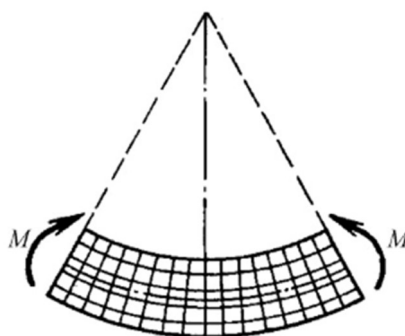
Jednoosno vlačno ispitivanje se rijetko provodi jer metalne pjene nisu namijenjene za uvjete u kojima prevladavaju vlačna naprezanja. Oblik epruvete najčešće je cilindričan s minimalno 7 puta većim promjerom od veličine ćelija. Povećanje dimenzija je najbolje mjeriti ekstenziometrom. Metalne pjene nemaju značajnu vlačnu čvrstoću, pogotovo aluminijske pjene. [26]

Ispitivanje na smik se provodi na jednoosnoj kidalici pri čemu pomak traverze stvara opterećenje na epruvetu. Smična čvrstoća predstavlja maksimalno naprezanje. Na slici 44 prikazane su sheme dvaju načina ispitivanja smične čvrstoće. [26]

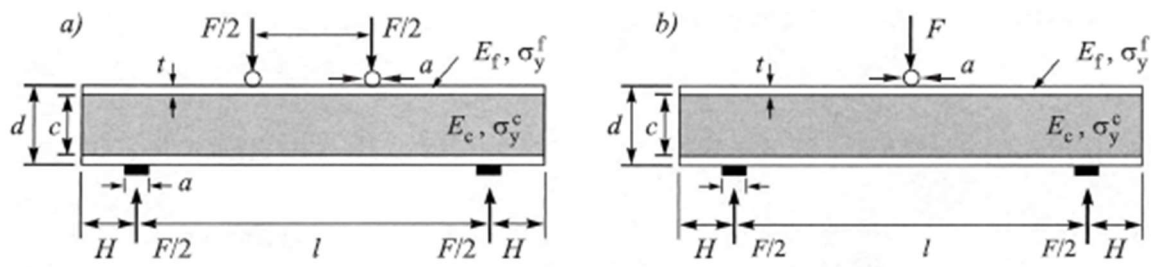


Slika 44 Metode ispitivanja smične čvrstoće [26]

Ispitivanje savojne čvrstoće izvodi se na univerzalnim kraljicama u tri ili četiri točke. Ispitne epruvete mogu biti cilindrične ili prizmatične. Ispitivanje u tri točke se provodi pomoću dva cilindrična oslonca promjera 20 mm smještene na krajevima epruveta, a opterećenje se prenosi pomoću trećeg valjka na sredini epruvete. Na slici 45 je prikazan dijagram momenta savijanja, a shematski prikaz ispitivanja u 3 odnosno 4 točke predložen je slikom 46. [28], [29]



Slika 45 Shematski prikaz djelovanja momenta na savijanje ispitne epruvete [30]



Slika 46 Shematski prikaz savojnog ispitivanja u 4 točke (a) i 3 točke (b) [9]

Ispitivanje tvrdoće metalne pjene provodi se pomoću tvrdomjera. Indentor je kuglica koja mora biti znatno veća od veličine ćelije kako ne bi došlo do pogrešnih rezultata. Preporuka je izbjeći rubove ako je uzorak barem dva puta veći od promjera indentora. S obzirom na svojstva stlačivosti metalnih pjena, rezultati mjerenja tvrdoće mogu se usporediti s tlačnom čvrstoćom pjene. [26]



## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio ovog rada odnosi se na analizu morfologije stijenki ćelija te ispitivanje tlačnih svojstava pjena različitog kemijskog sastava. Uzorci su izrađeni u Laboratoriju za polimere i kompozite dok su tlačna ispitivanja provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB). Skeniranje uzoraka je obavljeno u Laboratoriju za precizno mjerenje dužina, također na FSB-u, na CT uređaju oznake XT H 225, kompanije Nikon, a modeli uzoraka su obrađeni u programu myVGL, dok je morfologija analizirana uz pomoć ImageJ programa.

### 7.1. Postupak izrade uzoraka za ispitivanje

Uzorci su dobiveni taljenjem prekursora u kalupu u elektrootpornoj zvonastoj peći. Za prekursor su korištene ekstrudirane pločice različitih kemijskih sastava dobivene postupkom hladnog izostatskog prešanja te vrućeg ekstrudiranja. Sastavi prekursora prikazani su u tablici 3. Prekursori su izrezani na manje komade približno iste mase kako bi se dobili uzorci podjednake poroznosti. Masa prekursora u kalupu približno je iznosila 47 g kako bi se postigla poroznost od 80 %. Slika 47 prikazuje vaganje prekursora prije stavljanja u kalup.

**Tablica 3** Kemijski sastav prekursora

uzorak	kemijski sastav
uzorak 1	Al + 3 % CaCO <sub>3</sub>
uzorak 2	Al + 3 % CaCO <sub>3</sub>
uzorak 3	Al + 5 % CaCO <sub>3</sub>
uzorak 4	Al + 5 % CaCO <sub>3</sub>
uzorak 5	AlMgSi <sub>0,6</sub> + 0,4 % TiH <sub>2</sub>
uzorak 6	AlMgSi <sub>0,6</sub> + 0,4 % TiH <sub>2</sub>



Slika 47 Vaganje prekursora

Prekursori se nakon vaganja stavljaju u kalup kako je prikazano na slici 48. Kalup se zatvara na principu vijčanog spoja s četiri navojne šipke i stavlja u elektrootpornu zvonastu peć zagrijanu na 750 °C prikazanu na slici 49. Položaj kalupa u peći je horizontalan s rupicom u sredini kalupa koja mora biti okrenuta prema gore. Kada se kalup potpuno ispuni pjenom, kroz rupicu u sredini kalupa izlazi dio pjene što označava završetak procesa upjenjavanja.



**Slika 48 Kalup s prekursorom za izradu metalne pjene**

Posebnost elektrootporne zvonaste peći je u tome što na vratima ima prozor kroz koji se može vidjeti trenutak kada pjena počne izlaziti izvan kalupa, slika 50.



**Slika 49** Elektrootporna zvonasta peć

Poslije desetak minuta držanja kalupa u peći na 750 °C, dio pjene počinje izlaziti kroz rupicu te se kalup vadi iz peći. Na slici 50 vidi se završetak upjenjavanja, odnosno izlazak pjene kroz rupicu. Nakon vađenja iz peći, kalup je hlađen komprimiranim zrakom te je potom iz njega izvađen uzorak.



**Slika 50** Izlazak pjene iz kalupa

Slika 51 prikazuje ukupno šest izrađenih uzoraka aluminijskih pjena za provedbu eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada. Uzorcima su nakon upjenjavanja odrezani gornji i donji rubovi kako bi se postigle planparalelne površine potrebne za tlačno ispitivanje.



**Slika 51** Uzorci aluminijskih pjena

Volumen uzorka ( $V_u$ ) određen je jednažbom (1):

$$V_u = \frac{d^2 \times \pi \times h}{4}, \text{ cm}^3 \quad (1)$$

pri čemu su:

$d$  – promjer uzorka, mm

$h$  – visina uzorka, mm.

Gustoća uzorka ( $\rho$ ) slijedi iz izraza (2):

$$\rho = \frac{m}{V_u}, \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

pri čemu su:

$m$  – masa uzorka, g

$V_u$  – volumen uzorka,  $\text{cm}^3$ .

Relativna gustoća ( $\rho_{rel}$ ) odeđena je iz omjera gustoće uzorka i gustoće aluminijske:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho}{\rho_{Al}}, \quad (3)$$

Za gustoću aluminijske uzeta je vrijednost od  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Poroznost ( $\varphi$ ) je određena jednažbom (4):

$$\varphi = (1 - \rho_{rel}) \times 100, \% \quad (4)$$

U tablici 4 prikazani su osnovni podaci o uzorcima. Masa je mjerena preciznom vagom, a promjer i visina uzorka pomičnim mjerilom. Ostale vrijednosti su dobivene korištenjem jednažbi (1), (2), (3) i (4).

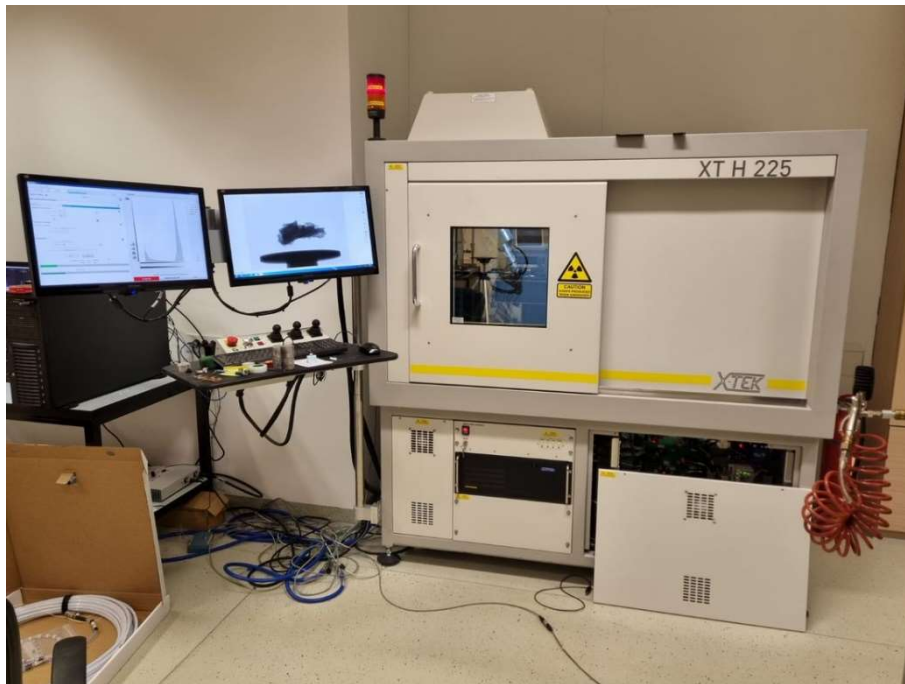
Tablica 4 Osnovni podaci o uzorcima

uzorak	promjer, mm	visina, mm	masa, g	volumen, cm <sup>3</sup>	gustoća, g/cm <sup>3</sup>	rel. gustoća	poroznost
1	36,11	38,65	21,37	39,58	0,53990	0,200	80,00%
2	35,88	41,64	23,46	42,10	0,55721	0,206	79,36%
3	36,40	39,45	25,34	41,05	0,61726	0,229	77,14%
4	36,25	38,20	19,58	39,42	0,49664	0,184	81,61%
5	36,09	36,77	16,16	37,61	0,42962	0,159	84,09%
6	36,10	36,20	14,94	37,05	0,40322	0,149	85,07%

Zbog nesavršenosti tehnološkog postupka proizvodnje rezultati relativne gustoće i poroznosti blago variraju. Dio taljevine je izašao kroz rupicu na sredini kalupa, a određena razlika se pojavila i zbog različitog ponašanja upotrijebljenih agensa za upjenjavanje (CaCO<sub>3</sub> i TiH<sub>2</sub>). Stoga dobivena poroznost varira u rasponu od 77,14 % do 85,07 %.

## 7.2. Morfološko ispitivanje uzoraka

U sklopu morfološkog ispitivanja napravljeni su 3D modeli uzoraka kako bi se dobio uvid u unutrašnju strukturu pjene. Uzorci su skenirani na CT uređaju oznake XT H 225, kompanije Nikon. Na slici 52 prikazan je korišteni CT uređaj, a na slici 53 se vidi kako su uzorci bili postavljeni. 3D model jednog od uzoraka upjenjenog s CaCO<sub>3</sub> prikazan je na slici 54. Za analizu su korištena po 3 presjeka iz svakog uzorka na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm. Za metodu određivanja volumnog udjela ćelija te srednji promjer ćelija korištene su metoda crtama te metoda površinama. Te su metode dio stereološke analize koja se odnosi na proučavanje dvodimenzionalnih presjeka čime se procjenjuju trodimenzionalne strukture. S obzirom da bi u metodi površinama bilo iznimno zahtjevno izračunati površinu svake ćelije, za analizu slike je odabran program ImageJ. ImageJ funkcionira na principu određivanja omjera kontrasta. Tamni dijelovi slike predstavljaju ćelije, dok sivi dijelovi ostalu površinu, odnosno stijenke. Program zatim zasebno mjeri površinu (broj piksela) tamnih dijelova te ju stavlja u omjer s ukupnim brojem piksela na površini uzorka čime se dobiva ukupna poroznost. [31]

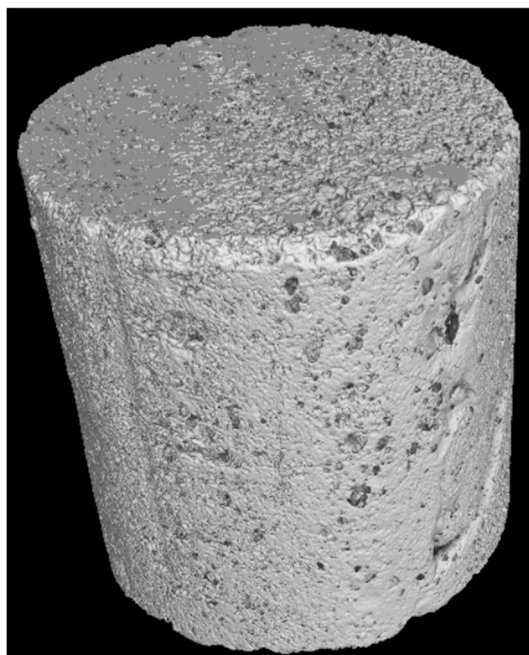


Slika 52 CT uređaj za skeniranje uzoraka



Slika 53 Položaj uzoraka u CT uređaju





Slika 54 3D model uzorka

### 7.2.1. Linijska analiza

Linijska analiza nije zahtjevna metoda i moguće ju je izvesti jednostavnim povlačenjem crta na snimci skeniranog presjeka modela. Njome se određuje volumni udio pora te njihova veličina i debljina stijenki. Zasniva se na principu omjera koliki dio linije zauzimaju pore u odnosu na ukupnu duljinu linije U analizi su za sve presjeka korištene četiri jednake linije, svaka duljine 25 mm. Linije se povlače proizvoljno, a sa više mjerenja dobivaju se i točniji podaci. U tablicama 5 - 10 nalaze se prosječne vrijednosti za tri različita presjeka svakog uzorka. Jednadžbe u nastavku teksta korištene su za određivanje površinskog te aproksimativno i volumnog udjela ćelija. [31]

Volumni udio ćelija: [31]

$$V_{\dot{c}} = \frac{l_{\dot{c}}}{l_{uk}} \times 100, \% \quad (6)$$

pri čemu su:

$l_{\dot{c}}$  – duljina linije preko ćelija, mm

$l_{uk}$  – ukupna duljina linije, mm

srednji promjer ćelija: [31]

$$\bar{d}_c = \frac{l_c}{n}, \text{ mm} \quad (7)$$

pri čemu je:

$n$  – broj ćelija koje crta presjeca

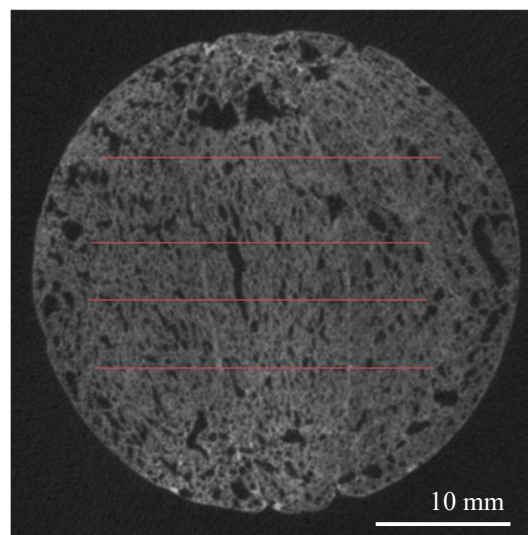
duljine preko stijenke: [31]

$$l_s = l_{uk} - l_c, \text{ mm} \quad (8)$$

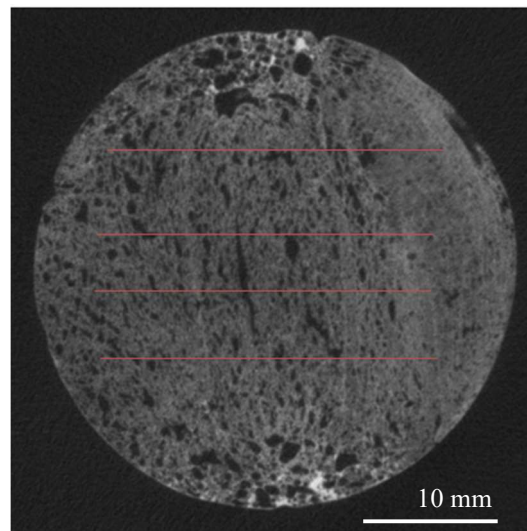
srednje debljine stijenke ćelija: [31]

$$\bar{d}_s = \frac{l_s}{n}, \text{ mm.} \quad (9)$$

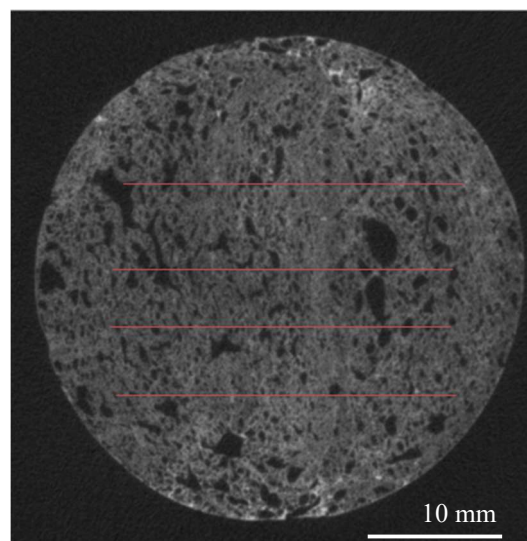
Slike 55, 56 i 57 prikazuju presjeke uzorka 1 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 55** Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 1



**Slika 56** Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 1



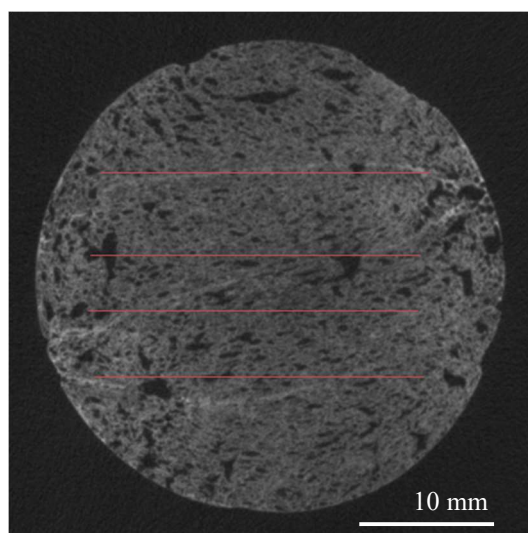
**Slika 57** Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 1

Tablica 5 prikazuje vrijednosti dobivene linijskom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 1 te njihovu aritmetičku vrijednost.

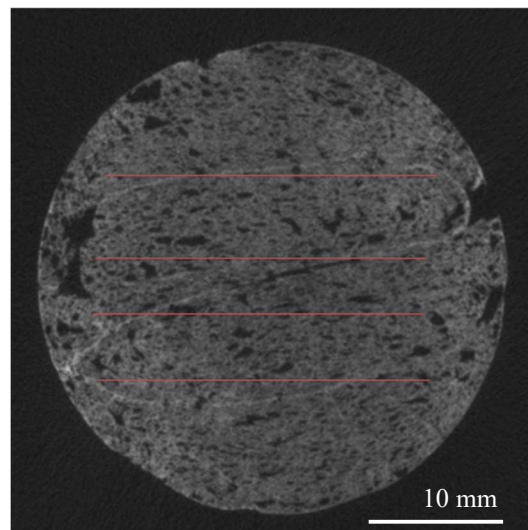
Tablica 5 Vrijednosti za uzorak 1 dobivene linijskom analizom

Presjeci	Duljina preko ćelija, $l_c$ (mm)	Duljina pravca, $l_{uk}$ (mm)	Volumni udio ćelija, $V_c$ (%)	Broj ćelija, $n$	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_c$ (mm)	Duljina preko stijenke, $l_s$ (mm)	Srednja debljina stijenke ćelija, $\bar{d}_s$ (mm)
10 mm	15	100	15	27	0,28	85,0	1,57
20 mm	21,5	100	21,5	47	0,23	78,5	0,84
30 mm	18,5	100	18,5	46	0,20	81,5	0,89
$\bar{x}$			18,3		0,24		1,10

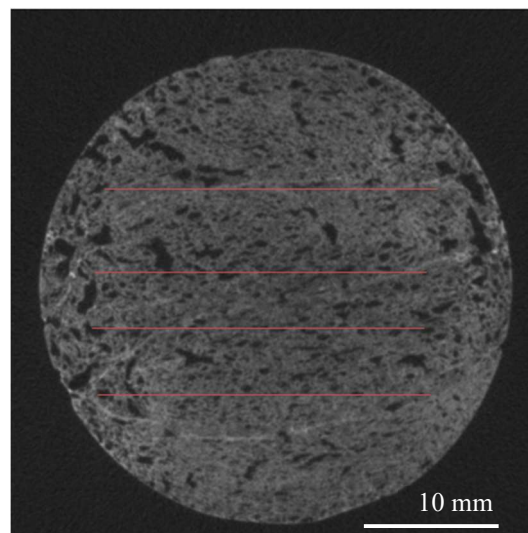
Slike 58, 59 i 60 prikazuju presjeke uzorka 2 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



Slika 58 Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 2



**Slika 59** Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 2



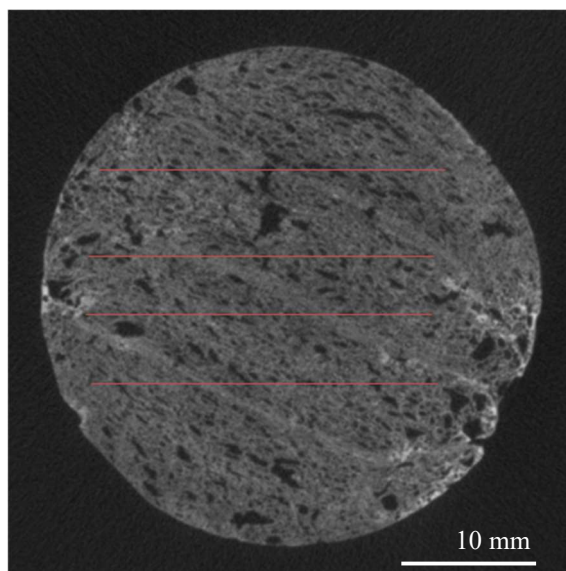
**Slika 60** Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 2

Tablica 6 prikazuje vrijednosti dobivene linijskom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 2 te njihovu aritmetičku vrijednost.

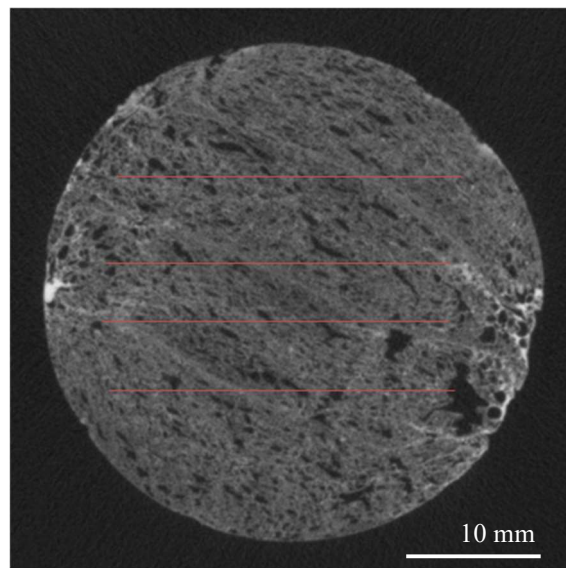
Tablica 6 Vrijednosti za uzorak 2 dobivene linijskom analizom

Presjeci	Duljina preko ćelija, $l_c$ (mm)	Duljina pravca, $l_{uk}$ (mm)	Volumni udio ćelija, $V_c$ (%)	Broj ćelija, $n$	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_c$ (mm)	Duljina preko stijenke, $l_s$ (mm)	Srednja debljina stijenke ćelija, $\bar{d}_s$ (mm)
10 mm	20	100	20	23	0,44	80,0	1,74
20 mm	7	100	7	18	0,19	93,0	2,58
30 mm	14	100	14	30	0,23	86,0	1,43
$\bar{x}$			13,7		0,29		1,92

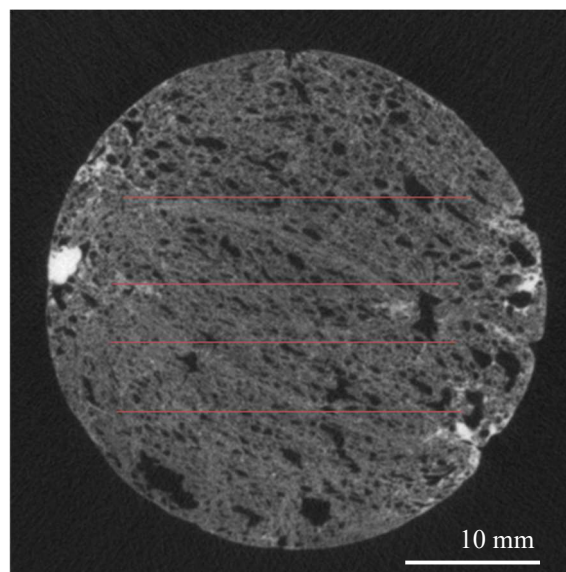
Slike 61, 62 i 63 prikazuju presjeke uzorka 3 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



Slika 61 Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 3



**Slika 62** Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 3



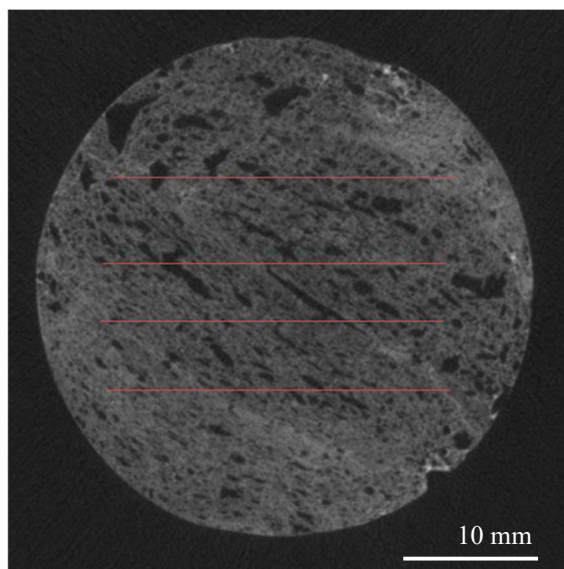
**Slika 63** Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 3

Tablica 7 prikazuje vrijednosti dobivene linijskom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 3 te njihovu aritmetičku vrijednost.

Tablica 7 Vrijednosti za uzorak 3 dobivene linijskom analizom

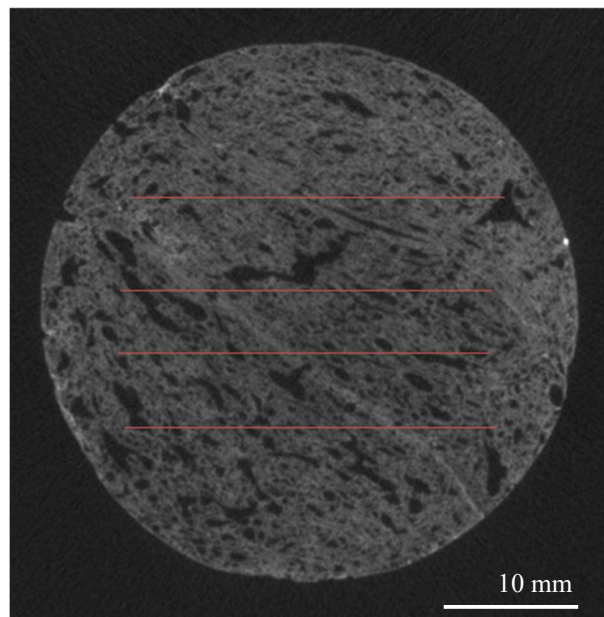
Presjeci	Duljina preko ćelija, $l_c$ (mm)	Duljina pravca, $l_{uk}$ (mm)	Volumni udio ćelija, $V_c$ (%)	Broj ćelija, $n$	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_c$ (mm)	Duljina preko stijenke, $l_s$ (mm)	Srednja debljina stijenke ćelija, $\bar{d}_s$ (mm)
10 mm	10	100	10	30	0,17	90,0	1,50
20 mm	10,5	100	10,5	29	0,18	89,5	1,54
30 mm	8,5	100	8,5	36	0,12	91,5	1,27
$\bar{x}$			9,7		0,16		1,44

Slike 64, 65 i 66 prikazuju presjeka uzorka 4 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.

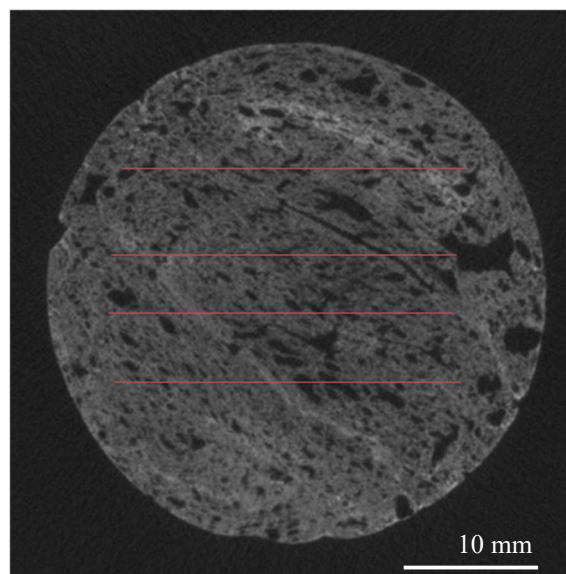


Slika 64 Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 4





**Slika 65** Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 4



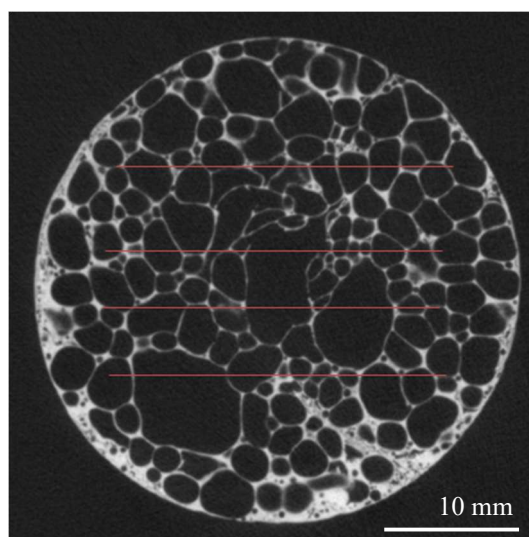
**Slika 66** Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 4

Tablica 8 prikazuje vrijednosti dobivene linijskom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 4 te njihovu aritmetičku vrijednost.

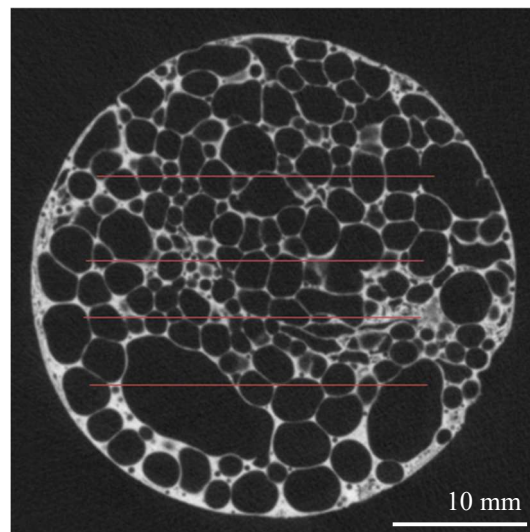
Tablica 8 Vrijednosti za uzorak 4 dobivene linijskom analizom

Presjeci	Duljina preko ćelija, $l_c$ (mm)	Duljina pravca, $l_{uk}$ (mm)	Volumni udio ćelija, $V_c$ (%)	Broj ćelija, $n$	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_c$ (mm)	Duljina preko stijenke, $l_s$ (mm)	Srednja debljina stijenke ćelija, $\bar{d}_s$ (mm)
10 mm	7	100	7	32	0,11	93	1,46
20 mm	9	100	9	36	0,13	91	1,27
30 mm	9	100	9	28	0,16	91	1,63
$\bar{x}$			8,3		0,13		1,45

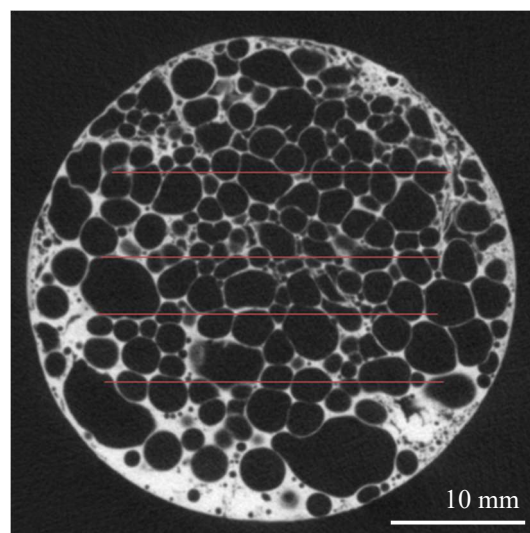
Slike 67, 68 i 69 prikazuju presjeke uzorka 5 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



Slika 67 Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 5



**Slika 68** Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 5



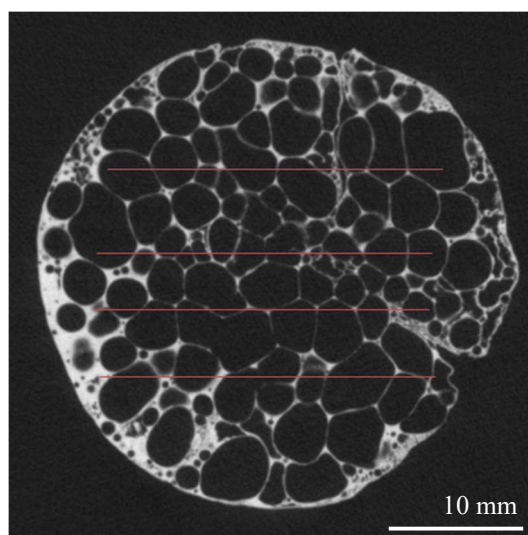
**Slika 69** Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 5

Tablica 9 prikazuje vrijednosti dobivene linijskom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 5 te njihovu aritmetičku vrijednost.

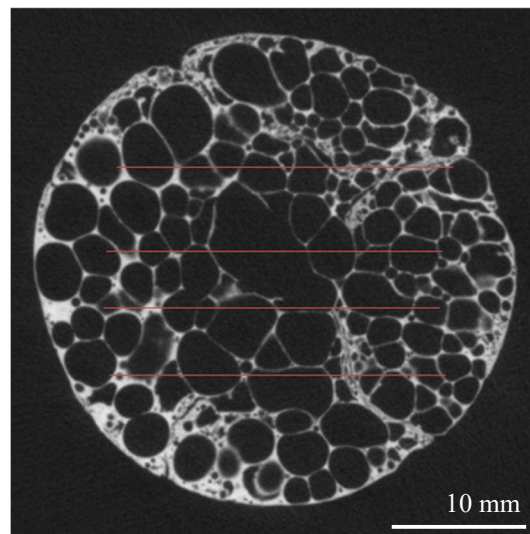
Tablica 9 Vrijednosti za uzorak 5 dobivene linijskom analizom

Presjeci	Duljina preko ćelija, $l_c$ (mm)	Duljina pravca, $l_{uk}$ (mm)	Volumni udio ćelija, $V_c$ (%)	Broj ćelija, $n$	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_c$ (mm)	Duljina preko stijenke, $l_s$ (mm)	Srednja debljina stijenke ćelija, $\bar{d}_s$ (mm)
10 mm	81	100	81	41	0,99	19	0,23
20 mm	79	100	79	44	0,90	21	0,24
30 mm	86	100	86	49	0,88	14	0,15
$\bar{x}$			82		0,92		0,21

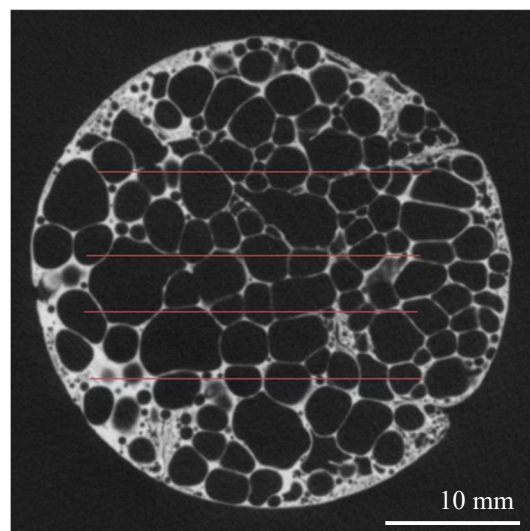
Slike 70, 71 i 72 prikazuju presjeke uzorka 6 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



Slika 70 Linijska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 6



**Slika 71** Linijska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 6



**Slika 72** Linijska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 6

Tablica 10 prikazuje vrijednosti dobivene linijskom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 6 te njihovu aritmetičku vrijednost.

Tablica 10 Vrijednosti za uzorak 6 dobivene linijskom analizom

Presjeci	Duljina preko ćelija, $l_{\check{c}}$ (mm)	Duljina pravca, $l_{uk}$ (mm)	Volumni udio ćelija, $V_{\check{c}}$ (%)	Broj ćelija, $n$	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_{\check{c}}$ (mm)	Duljina preko stijenki, $l_s$ (mm)	Srednja debljina stijenske ćelija, $\bar{d}_s$ (mm)
10 mm	88	100	88	40	1,1	12	0,15
20 mm	81	100	81	35	1,16	19	0,27
30 mm	78	100	78	40	0,98	22	0,28
$\bar{x}$			82,3		1,08		0,23

### 7.2.2. Točkasta analiza

Točkasta analiza također je jedna od metoda određivanja poroznosti uzorka. Na površinu uzorka se stavi mreža točaka. Što je mreža gušća dobit će se vjerodostojniji rezultati stoga je u ovom radu korištena mreža s 400 točaka. Princip određivanja poroznosti se zasniva na omjeru točaka koje leže na ćelijama i točaka koje pokrivaju površinu presjeka uzorka. Točke koje se nalaze djelomično u ćeliji, a djelomično na stijenkama ćelija se računaju kao pola točke

Poroznost ovom metodom se određuje prema jednadžbi (10):

$$V_{\check{c}} = \frac{n_{pu} + \frac{1}{2}n_{po}}{n} \times 100, \% \quad (10)$$

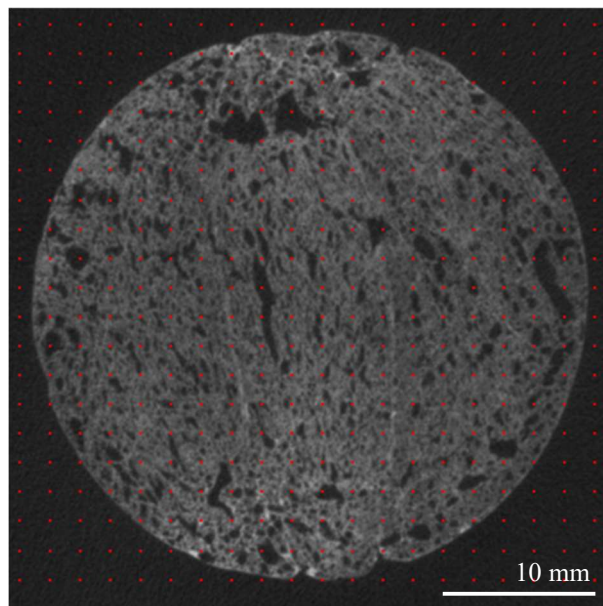
pri čemu su:

$n_{pu}$  – broj točaka koje leže potpuno na ćelijama

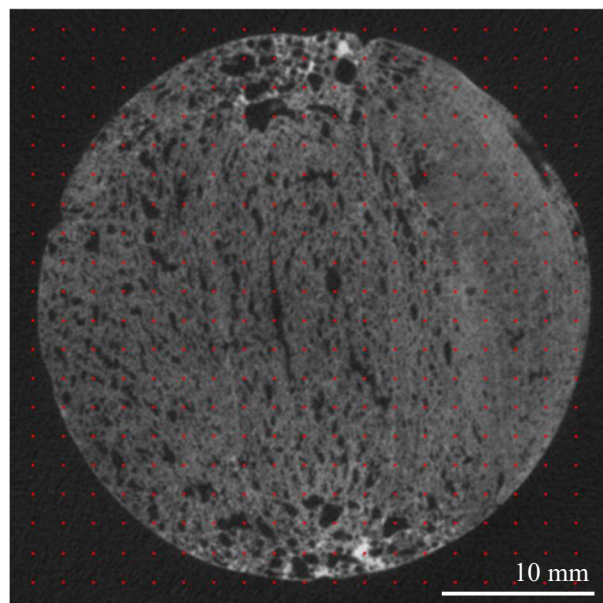
$n_{po}$  – broj točaka koje leže polovično na ćelijama

$n$  – broj točaka koje pokrivaju cijeli uzorak.

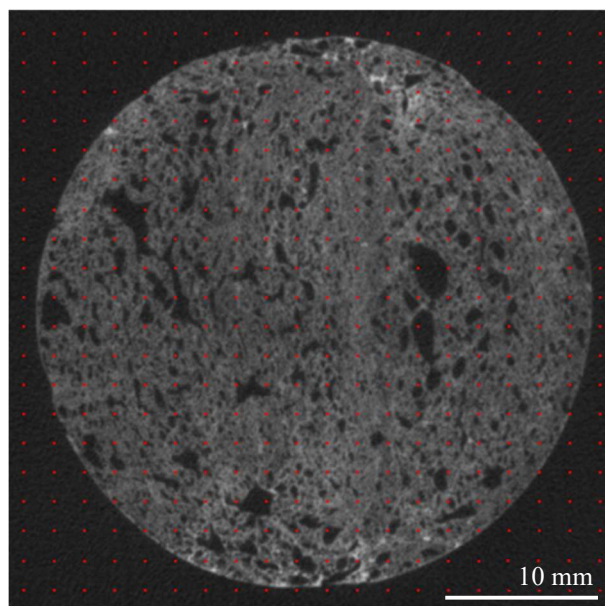
Slike 73, 74 i 75 prikazuju presjeke uzorka 1 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 73** Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 1



**Slika 74** Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 1



**Slika 75 Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 1**

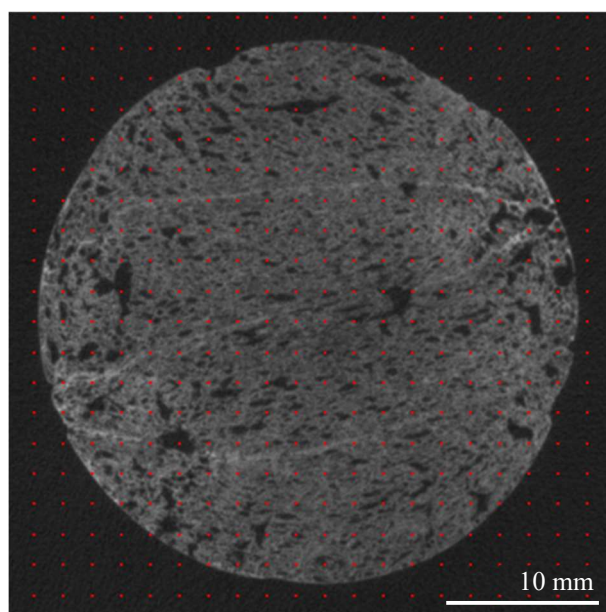
Tablica 11 prikazuje vrijednosti dobivene točkastom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 1 te njihovu aritmetičku vrijednost.

**Tablica 11 Vrijednosti za uzorak 1 dobivene točkastom analizom**

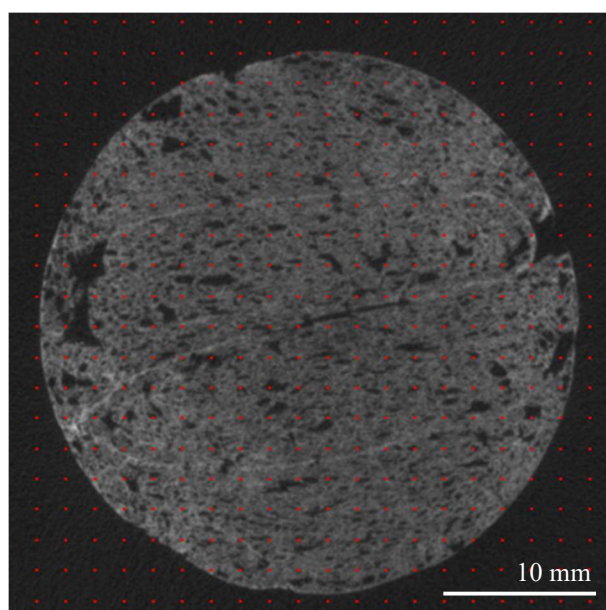
Presjeci	Broj točaka koje leže na ćelijama	Broj točaka koje leže na uzorku	Poroznost, %
10 mm	55	275	20,0
20 mm	63	275	22,9
30 mm	62	275	22,5
$\bar{x}$			21,8

Slike 76, 77 i 78 prikazuju presjeke uzorka 2 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.

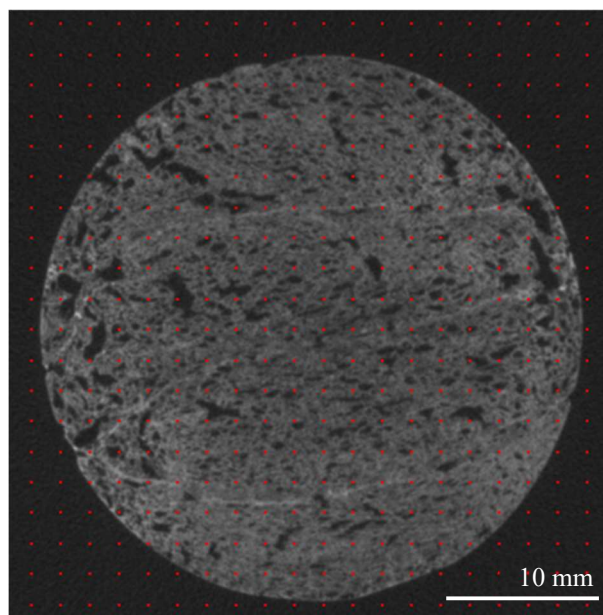




**Slika 76** Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 2



**Slika 77** Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 2



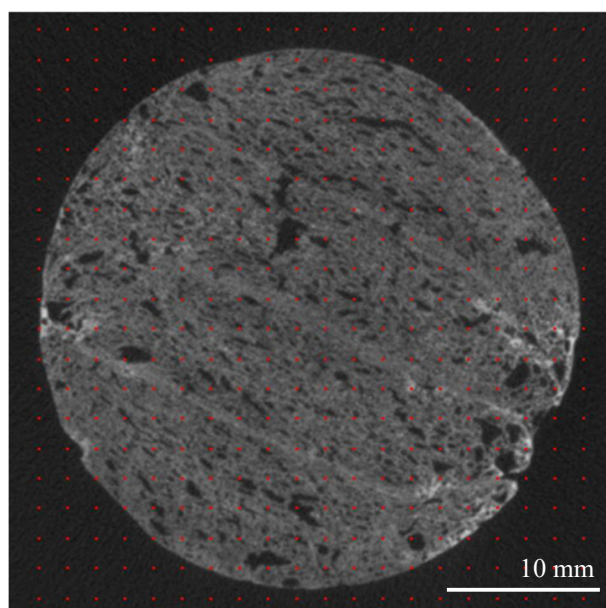
Slika 78 Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 2

Tablica 12 prikazuje vrijednosti dobivene točkastom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 2 te njihovu aritmetičku vrijednost.

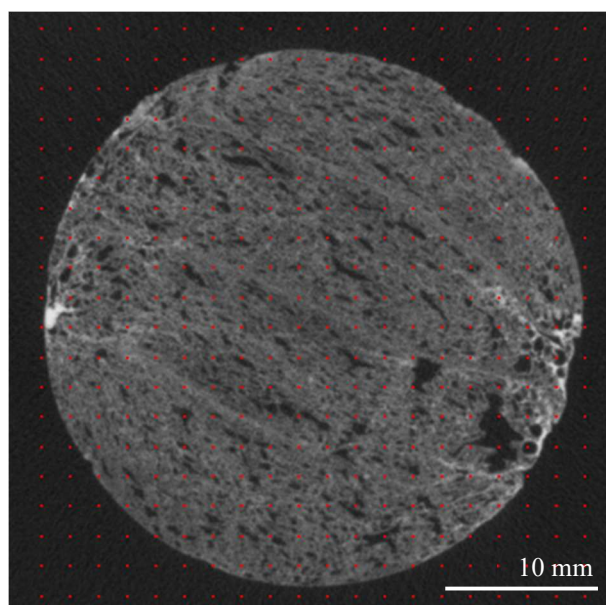
Tablica 12 Vrijednosti za uzorak 2 dobivene točkastom analizom

Presjeci	Broj točaka koje leže na ćelijama	Broj točaka koje leže na uzorku	Poroznost, %
10 mm	42	258	16,3
20 mm	40	258	15,5
30 mm	37	258	14,3
$\bar{x}$			15,4

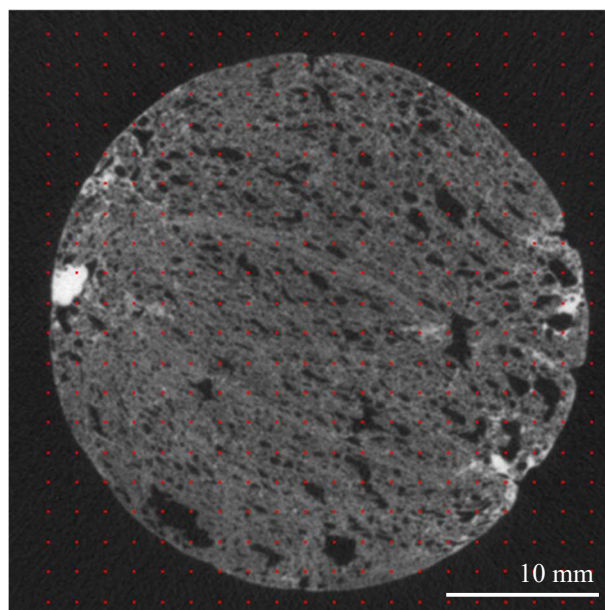
Slike 79, 80 i 81 prikazuju presjeke uzorka 3 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 79** Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 3



**Slika 80** Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 3



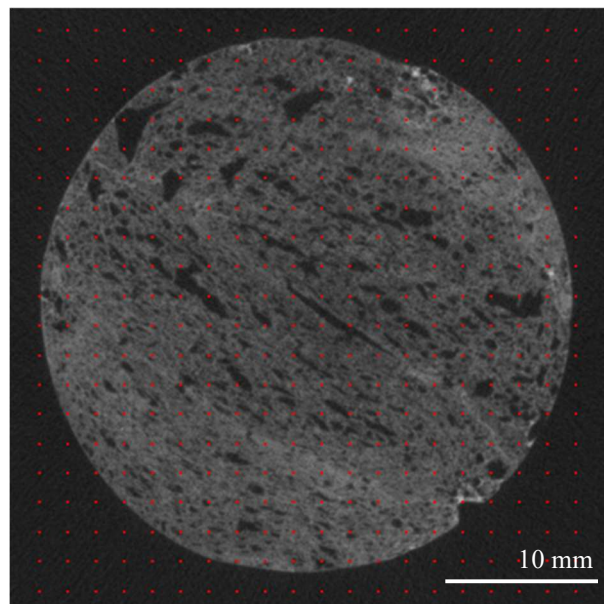
**Slika 81 Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 3**

Tablica 13 prikazuje vrijednosti dobivene točkastom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 3 te njihovu aritmetičku vrijednost.

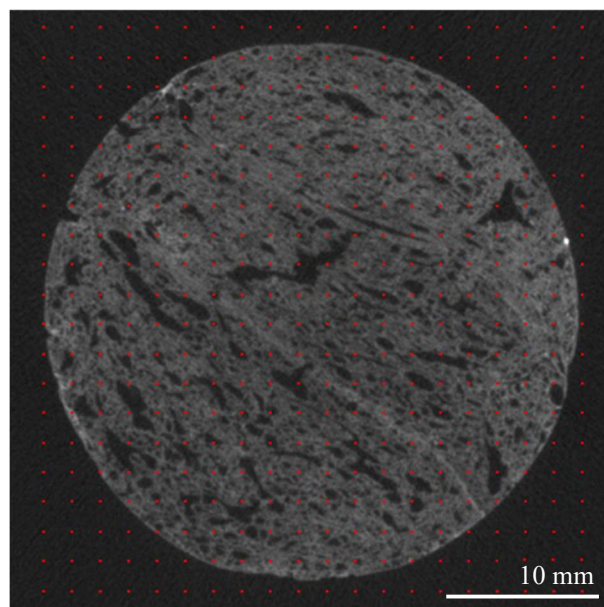
**Tablica 13 Vrijednosti za uzorak 3 dobivene točkastom analizom**

Presjeci	Broj točaka koje leže na ćelijama	Broj točaka koje leže na uzorku	Poroznost, %
10 mm	36	265	13,6
20 mm	52	265	19,6
30 mm	49	265	18,5
$\bar{x}$			17,2

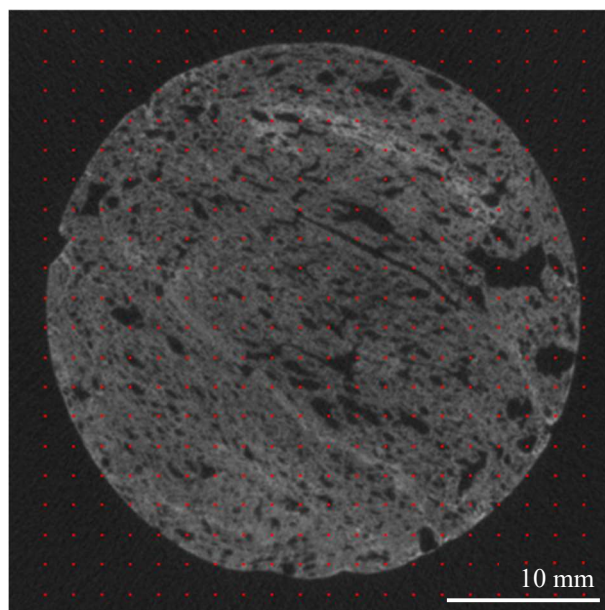
Slike 82, 83 i 84 prikazuju presjeke uzorka 4 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 82** Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 4



**Slika 83** Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 4



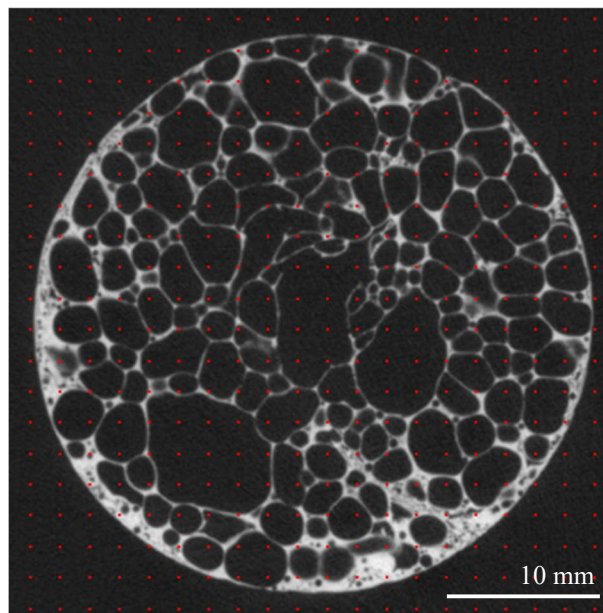
Slika 84 Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 4

Tablica 14 prikazuje vrijednosti dobivene točkastom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 4 te njihovu aritmetičku vrijednost.

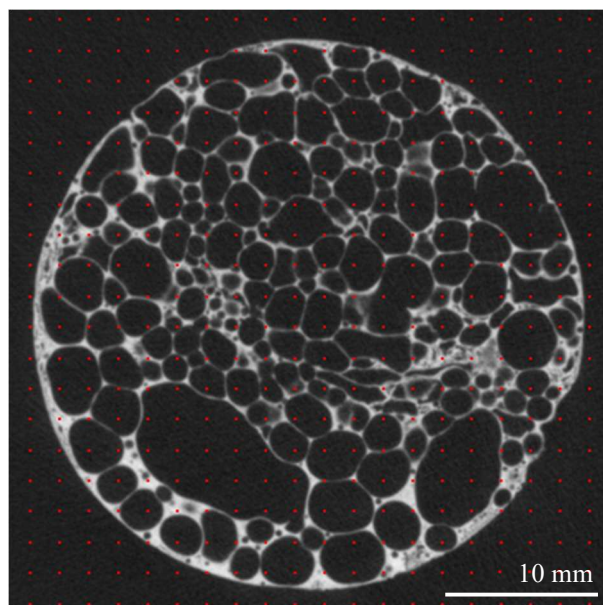
Tablica 14 Vrijednosti za uzorak 4 dobivene točkastom analizom

Presjeci	Broj točaka koje leže na ćelijama	Broj točaka koje leže na uzorku	Poroznost, %
10 mm	42	268	15,7
20 mm	51	268	19,0
30 mm	43	268	16,0
$\bar{x}$			16,9

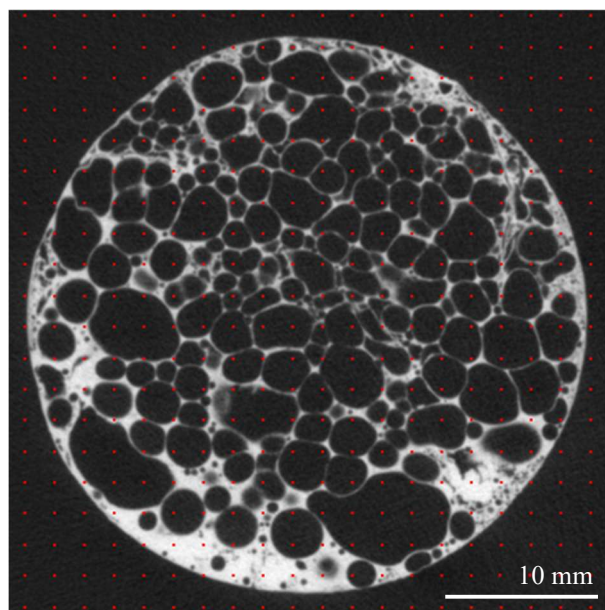
Slike 85, 86 i 87 prikazuju presjeke uzorka 5 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



Slika 85 Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 5



Slika 86 Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 5



Slika 87 Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 5

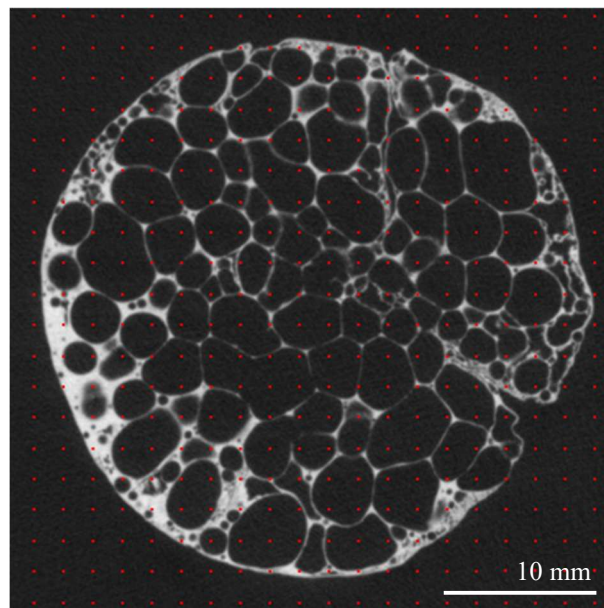
Tablica 15 prikazuje vrijednosti dobivene točkastom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 5 te njihovu aritmetičku vrijednost.

Tablica 15 Vrijednosti za uzorak 5 dobivene točkastom analizom

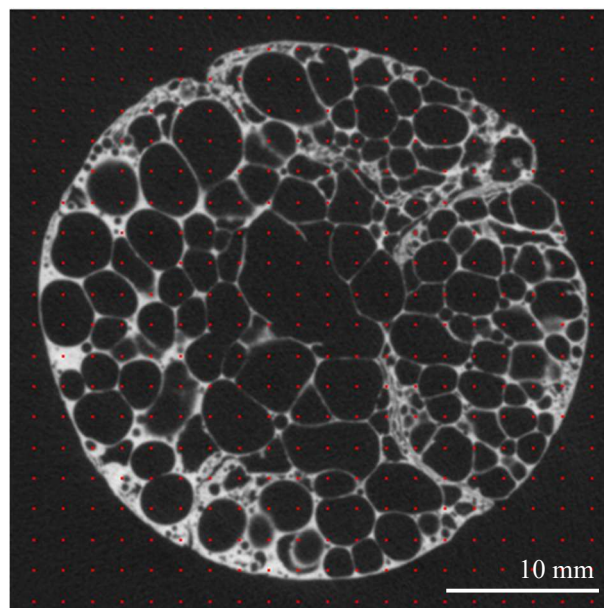
Presjeci	Broj točaka koje leže na ćelijama	Broj točaka koje leže na uzorku	Poroznost, %
10 mm	226	269	84,0
20 mm	221	269	82,2
30 mm	214	269	79,6
$\bar{x}$			81,9

Slike 88, 89 i 90 prikazuju presjeke uzorka 6 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.

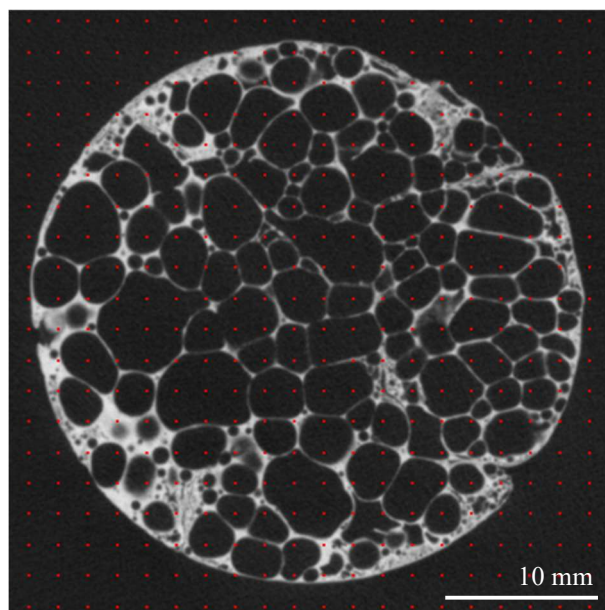




Slika 88 Točkasta analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 6



Slika 89 Točkasta analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 6



Slika 90 Točkasta analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 6

Tablica 16 prikazuje vrijednosti dobivene točkastom analizom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 6 te njihovu aritmetičku vrijednost.

Tablica 16 Vrijednosti za uzorak 6 dobivene točkastom analizom

Presjeci	Broj točaka koje leže na ćelijama	Broj točaka koje leže na uzorku	Poroznost, %
10 mm	212	260	81,5
20 mm	218	260	83,8
30 mm	213	260	81,9
$\bar{x}$			82,4

### 7.2.3. Metoda s krugom

Gustoća ćelija, odnosno poroznost, prema ovoj se metodi određuje temeljem slijedećeg izraza:

$$N_{\dot{c}} = M^2 \times \frac{n_u + \frac{1}{2}n_k}{A_k}, \text{ ćelija/cm}^2 \quad (11)$$

pri čemu su:

$M$  – povećanje, M2:1,

$n_u$  i  $n_k$  – broj ćelija unutar kruga odnosno na kružnici,

$A_k$  – površina kruga,  $\text{cm}^2$ .

Srednja površina ćelija slijedi iz jednadžbe:

$$\overline{A}_{\dot{c}} = \frac{1}{N_{\dot{c}}}, \text{ cm}^2 \quad (12)$$

dok srednji promjer ćelija određuje izraz:

$$\overline{d}_{\dot{c}} = \sqrt{\frac{A_{\dot{c}} \times 4}{\pi}}, \text{ mm} \quad (13)$$

Faktor oblika ćelija ( $F_{\dot{c}}$ ) predstavlja omjer minimalnog i maksimalnog promjera ćelije:

$$F_{\dot{c}} = \frac{d_{min}}{d_{maks}} \quad (14)$$

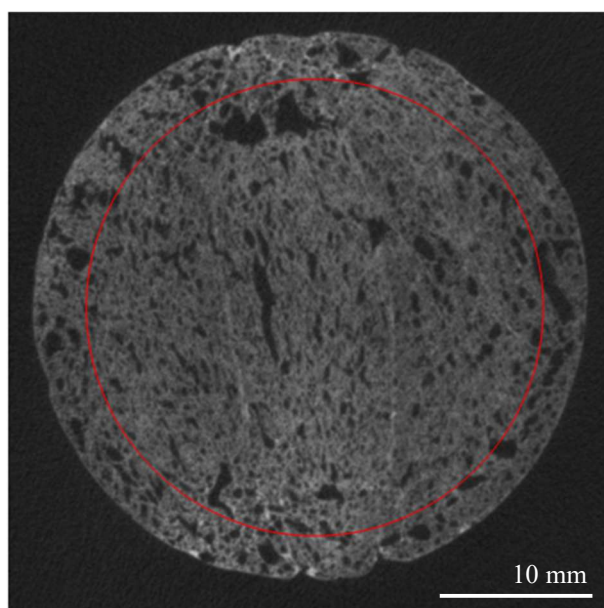
pri čemu su:

$d_{min}$  – minimalni izmjereni promjer ćelije

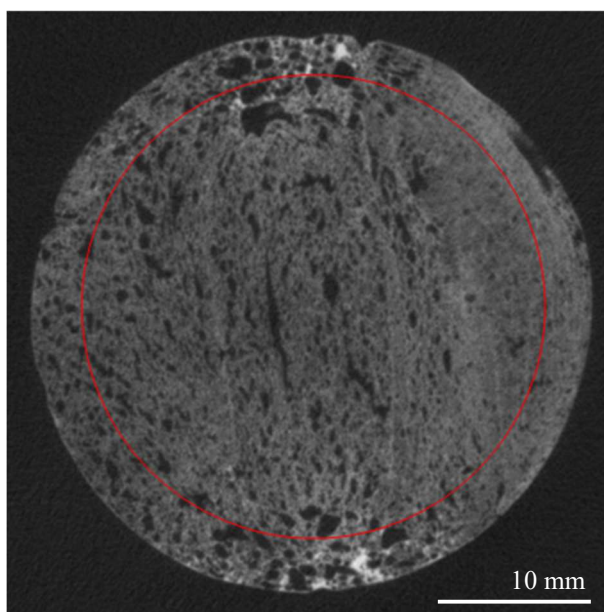
$d_{maks}$  – maksimalni izmjereni promjer ćelije.

Izmjereni su minimalni i maksimalni promjeri ćelija za sva tri presjeka pojedinog uzorka te je za faktor oblika ćelija svakog uzorka određena aritmetička sredina faktora oblika ćelija sva tri presjeka.

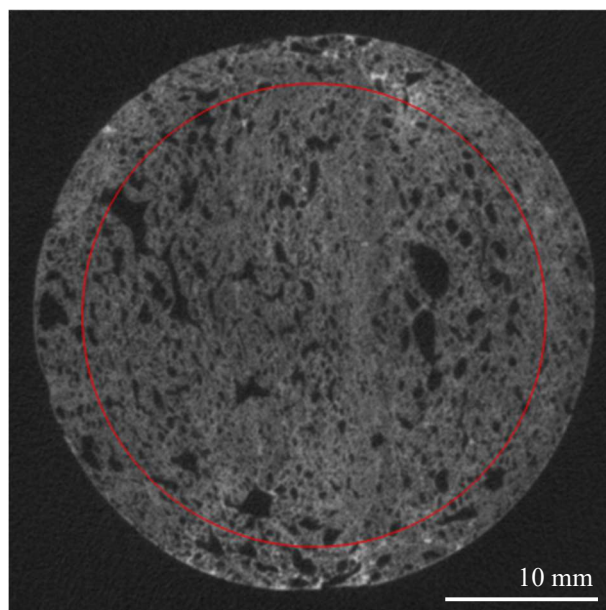
Slike 91, 92 i 93 prikazuju presjeke uzorka 1 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 91** Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 1



**Slika 92** Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 1



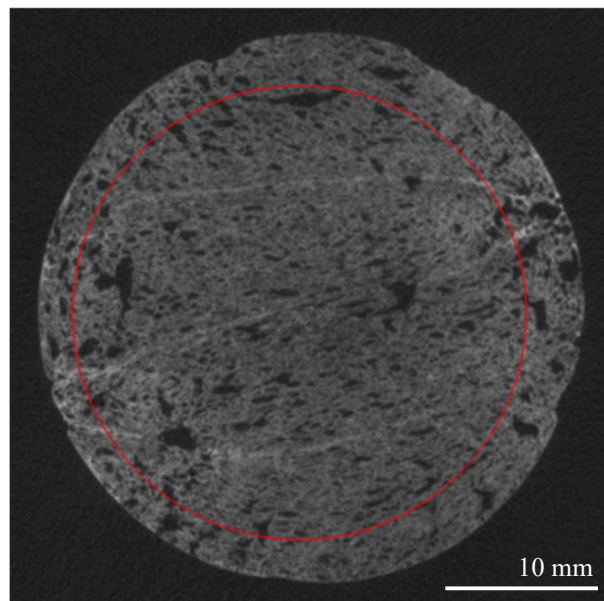
Slika 93 Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 1

Tablica 17 prikazuje vrijednosti dobivene metodom s krugom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 1.

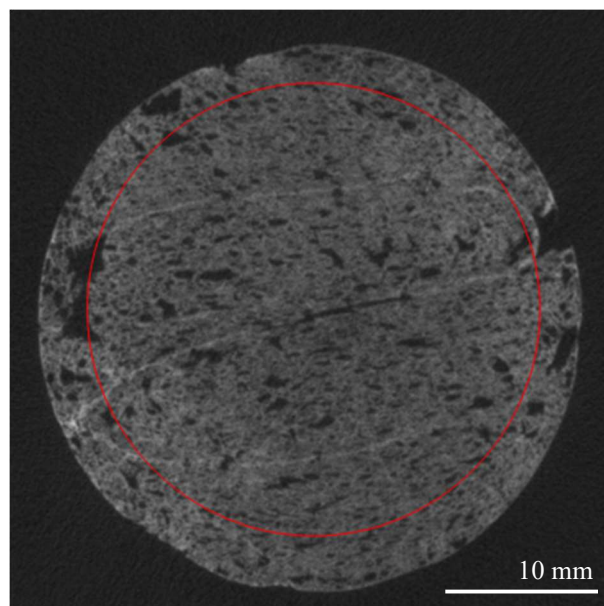
Tablica 17 Vrijednosti za uzorak 1 dobivene metodom s krugom

Presjeci	Površina kruga, $A_k$ (mm <sup>2</sup> )	Broj ćelija u krugu, $n_u$	Broj ćelija na kružnici, $n_k$	Gustoća ćelija, $N_{\acute{c}}$ (ćelija/cm <sup>2</sup> )	Srednja površina ćelija, $\bar{A}_{\acute{c}}$ (mm <sup>2</sup> )	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_{\acute{c}}$ (mm)	Faktor oblika ćelija, $F_{\acute{c}}$
10 mm	683,49	104	21	16,75	5,97	2,76	0,25
20 mm	683,49	97	17	15,44	6,48	2,87	0,33
30 mm	683,49	101	22	16,39	6,10	2,79	0,20
$\bar{x}$				16,19	6,18	2,81	0,26

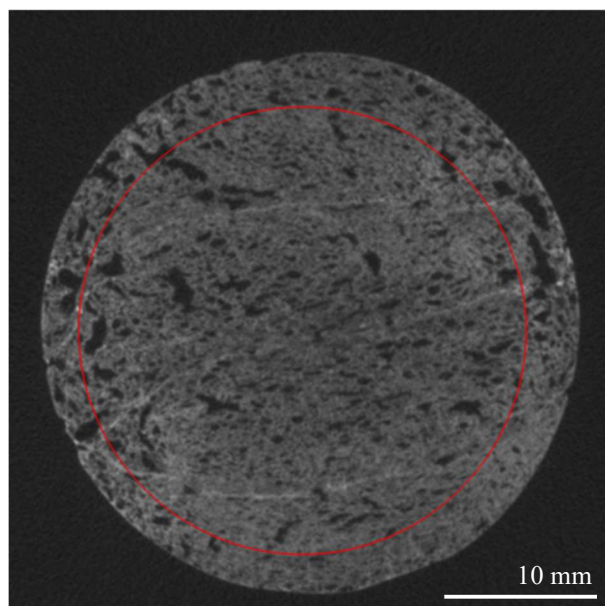
Slike 94, 95 i 96 prikazuju presjeka uzorka 2 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 94** Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 2



**Slika 95** Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 2



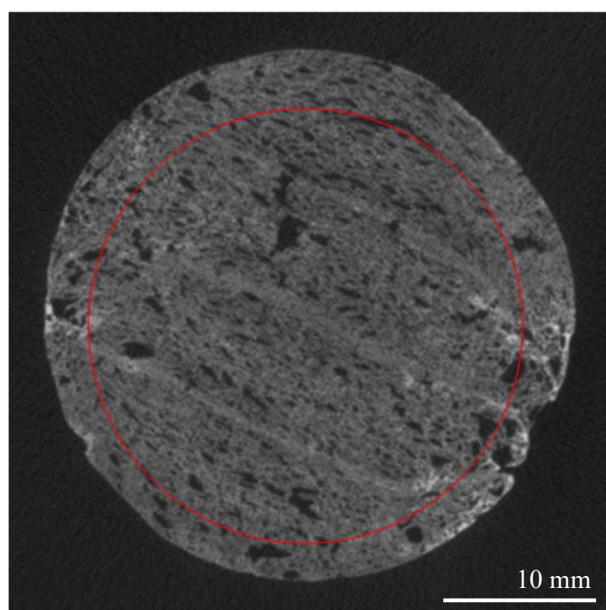
Slika 96 Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 2

Tablica 18 prikazuje vrijednosti dobivene metodom s krugom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 2.

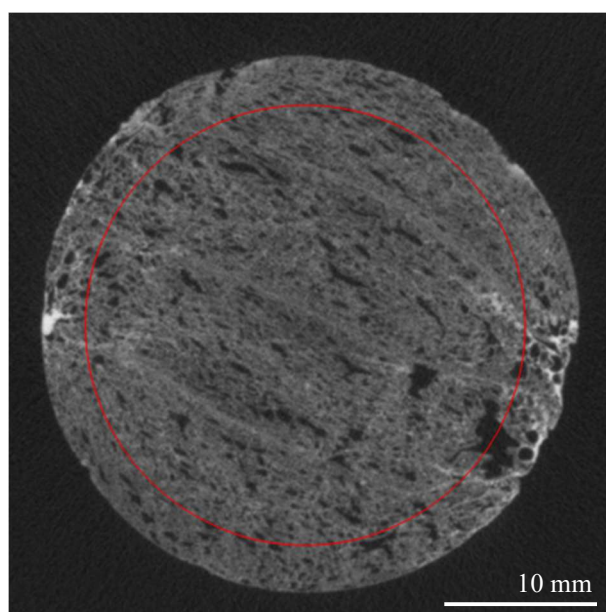
Tablica 18 Vrijednosti za uzorak 2 dobivene metodom s krugom

Presjeci	Površina kruga, $A_k$ (mm <sup>2</sup> )	Broj ćelija u krugu, $n_u$	Broj ćelija na kružnici, $n_k$	Gustoća ćelija, $N_{\epsilon}$ (ćelija/cm <sup>2</sup> )	Srednja površina ćelija, $\bar{A}_{\epsilon}$ (mm <sup>2</sup> )	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_{\epsilon}$ (mm)	Faktor oblika ćelija, $F_{\epsilon}$
10 mm	683,49	108	13	16,75	5,97	2,76	0,33
20 mm	683,49	103	9	15,73	6,36	2,85	0,50
30 mm	683,49	99	12	15,36	6,51	2,88	0,33
$\bar{x}$				15,95	6,28	2,83	0,39

Slike 97, 98 i 99 prikazuju presjeka uzorka 3 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.

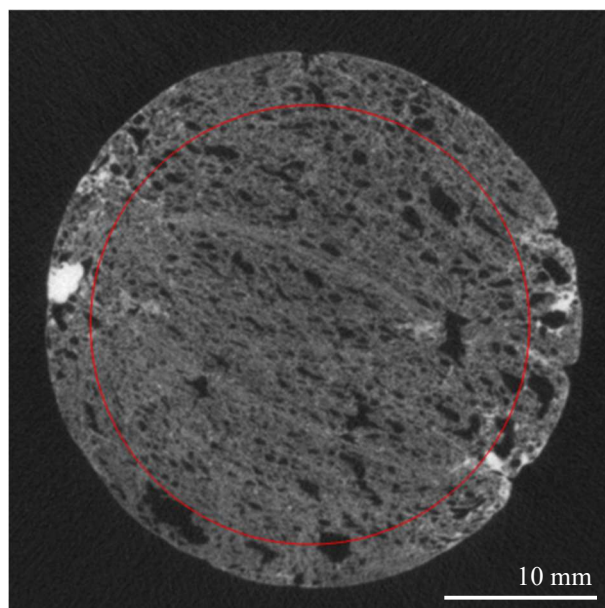


**Slika 97** Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 3



**Slika 98** Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 3





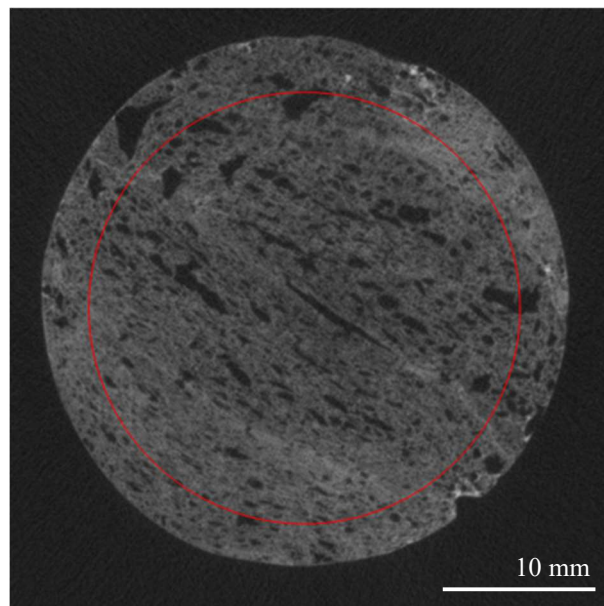
Slika 99 Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 3

Tablica 19 prikazuje vrijednosti dobivene metodom s krugom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 3.

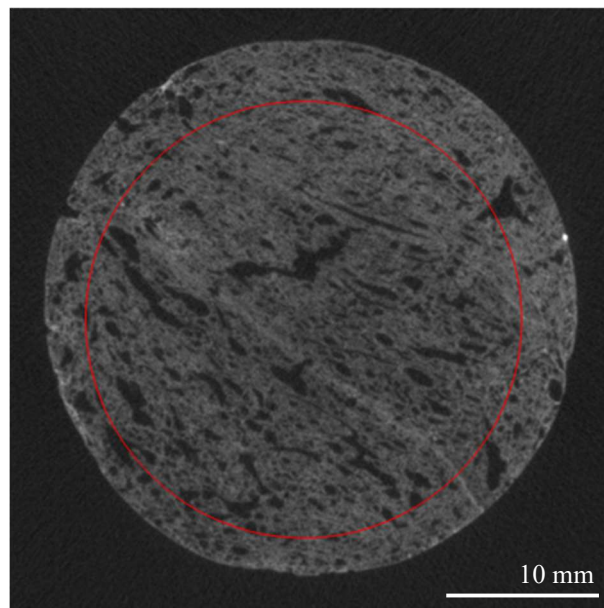
Tablica 19 Vrijednosti za uzorak 3 dobivene metodom s krugom

Presjeci	Površina kruga, $A_k$ ( $\text{mm}^2$ )	Broj ćelija u krugu, $n_u$	Broj ćelija na kružnici, $n_k$	Gustoća ćelija, $N_\zeta$ (ćelija/ $\text{cm}^2$ )	Srednja površina ćelija, $\bar{A}_\zeta$ ( $\text{mm}^2$ )	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_\zeta$ (mm)	Faktor oblika ćelija, $F_\zeta$
10 mm	683,49	94	8	14,34	6,97	2,98	0,33
20 mm	683,49	101	12	15,66	6,39	2,85	0,33
30 mm	683,49	108	11	16,61	6,02	2,77	0,50
$\bar{x}$				15,53	6,46	2,87	0,39

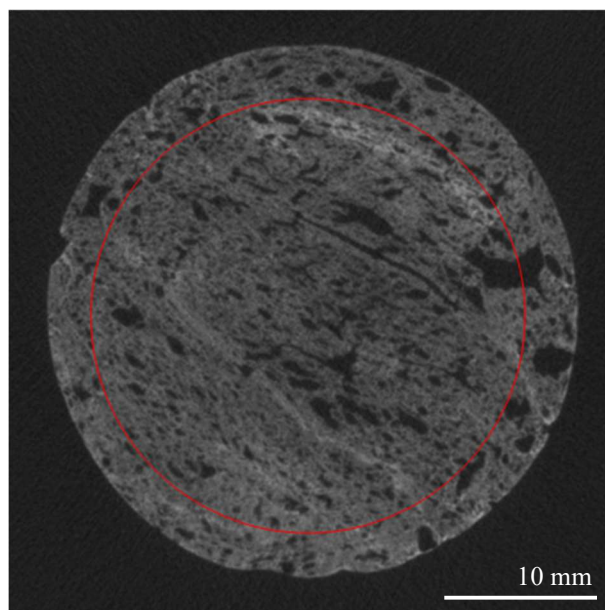
Slike 100, 101 i 102 prikazuju presjeke uzorka 4 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 100** Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 4



**Slika 101** Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 4



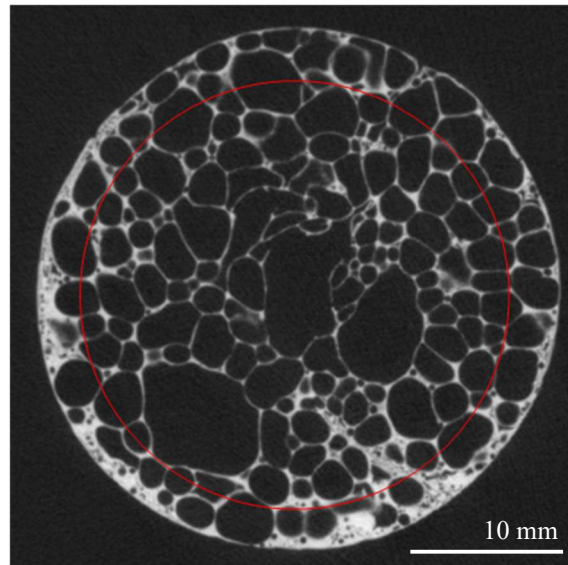
Slika 102 Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 4

Tablica 20 prikazuje vrijednosti dobivene metodom s krugom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 4.

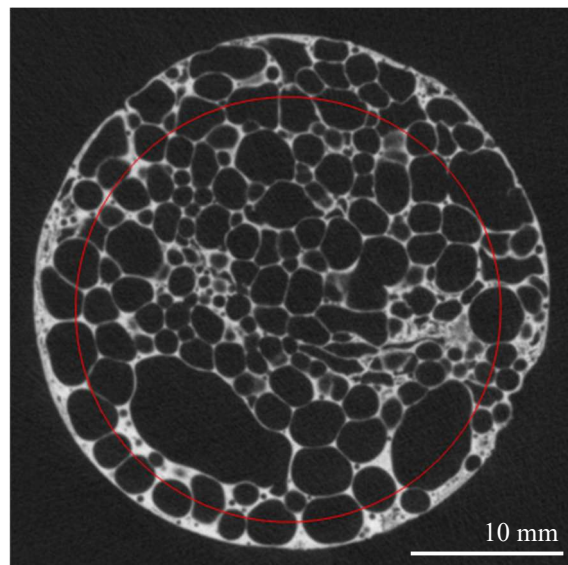
Tablica 20 Vrijednosti za uzorak 4 dobivene metodom s krugom

Presjeci	Površina kruga, $A_k$ (mm <sup>2</sup> )	Broj ćelija u krugu, $n_u$	Broj ćelija na kružnici, $n_k$	Gustoća ćelija, $N_\zeta$ (ćelija/cm <sup>2</sup> )	Srednja površina ćelija, $\bar{A}_\zeta$ (mm <sup>2</sup> )	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_\zeta$ (mm)	Faktor oblika ćelija, $F_\zeta$
10 mm	683,49	102	7	15,44	6,48	2,87	0,50
20 mm	683,49	109	13	16,90	5,92	2,75	0,50
30 mm	683,49	97	12	15,07	6,64	2,91	0,50
$\bar{x}$				15,80	6,34	2,84	0,50

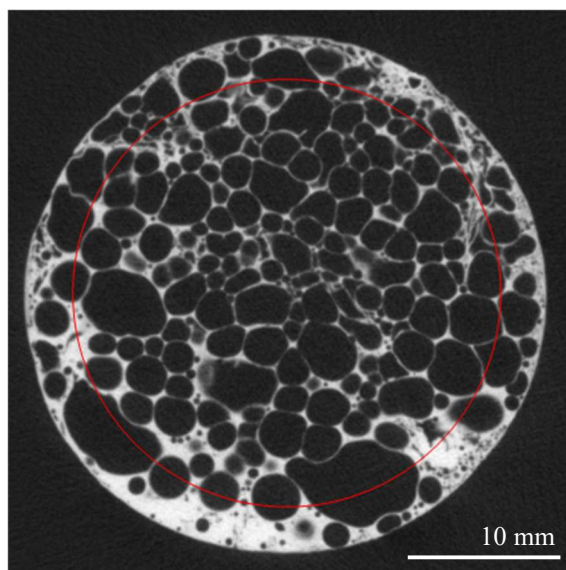
Slike 103, 104 i 105 prikazuju presjeke uzorka 5 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 103** Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 5



**Slika 104** Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 5



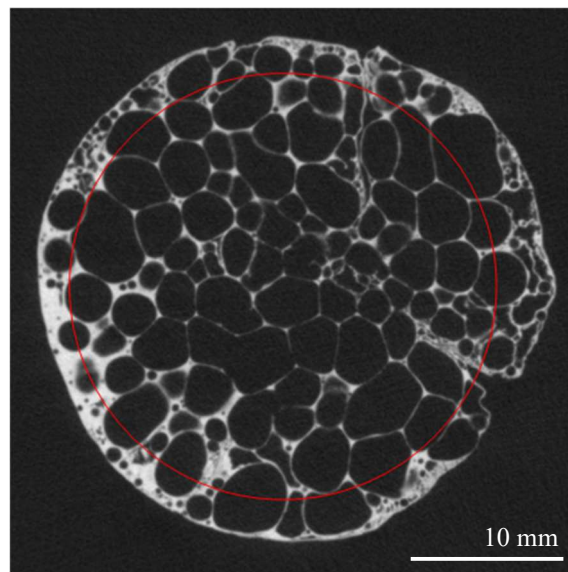
Slika 105 Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 5

Tablica 21 prikazuje vrijednosti dobivene metodom s krugom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 5.

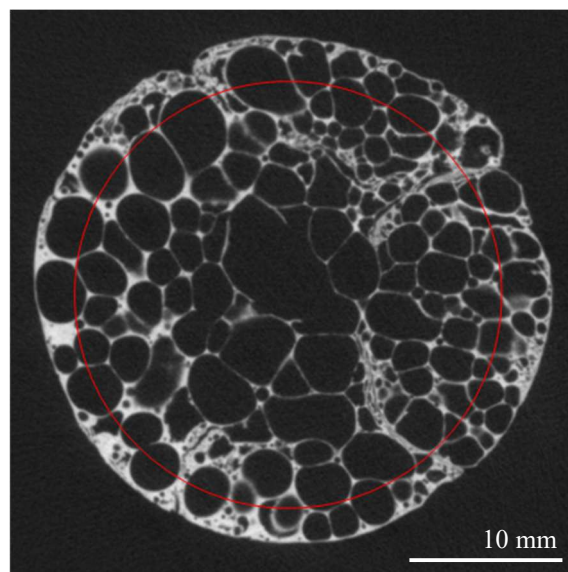
Tablica 21 Vrijednosti za uzorak 5 dobivene metodom s krugom

Presjeci	Površina kruga, $A_k$ (mm <sup>2</sup> )	Broj ćelija u krugu, $n_u$	Broj ćelija na kružnici, $n_k$	Gustoća ćelija, $N_{\epsilon}$ (ćelija/cm <sup>2</sup> )	Srednja površina ćelija, $\bar{A}_{\epsilon}$ (mm <sup>2</sup> )	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_{\epsilon}$ (mm)	Faktor oblika ćelija, $F_{\epsilon}$
10 mm	683,49	137	23	21,72	4,60	2,42	0,07
20 mm	683,49	152	31	24,51	4,08	2,28	0,06
30 mm	683,49	147	29	23,63	4,23	2,32	0,10
$\bar{x}$				23,29	4,31	2,34	0,08

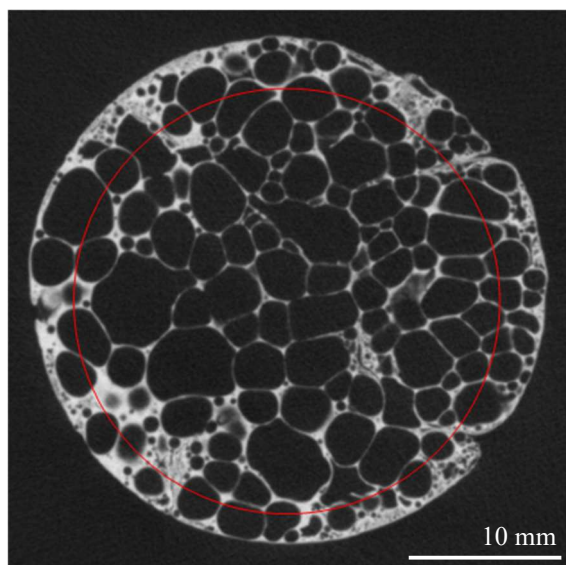
Slike 106, 107 i 108 prikazuju presjeke uzorka 6 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm.



**Slika 106** Metoda s krugom, presjek na visini 10 mm, uzorak 6



**Slika 107** Metoda s krugom, presjek na visini 20 mm, uzorak 6



Slika 108 Metoda s krugom, presjek na visini 30 mm, uzorak 6

Tablica 22 prikazuje vrijednosti dobivene metodom s krugom za svaki od tri odabrana presjeka uzorka 6.

Tablica 22 Vrijednosti za uzorak 6 dobivene metodom s krugom

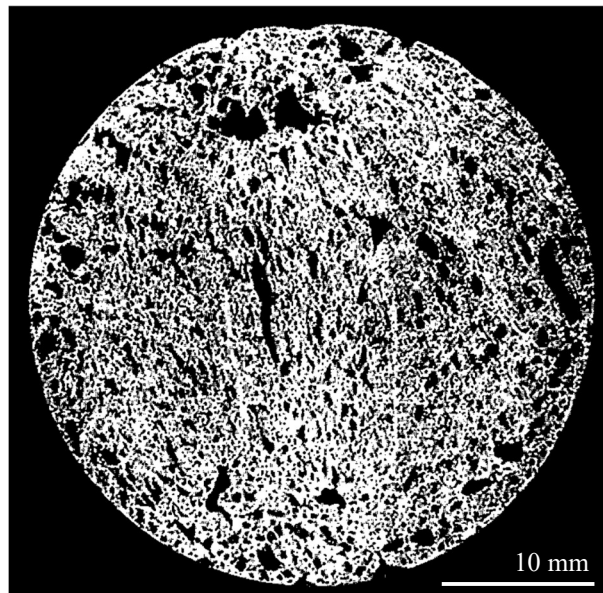
Presjeci	Površina kruga, $A_k$ (mm <sup>2</sup> )	Broj ćelija u krugu, $n_u$	Broj ćelija na kružnici, $n_k$	Gustoća ćelija, $N_\epsilon$ (ćelija/cm <sup>2</sup> )	Srednja površina ćelija, $\bar{A}_\epsilon$ (mm <sup>2</sup> )	Srednji promjer ćelija, $\bar{d}_\epsilon$ (mm)	Faktor oblika ćelija, $F_\epsilon$
10 mm	683,49	127	27	20,56	4,87	2,49	0,10
20 mm	683,49	119	37	20,12	4,97	2,52	0,07
30 mm	683,49	131	34	21,65	4,62	2,43	0,10
$\bar{x}$				20,78	4,82	2,48	0,09

#### 7.2.4. Automatska analiza

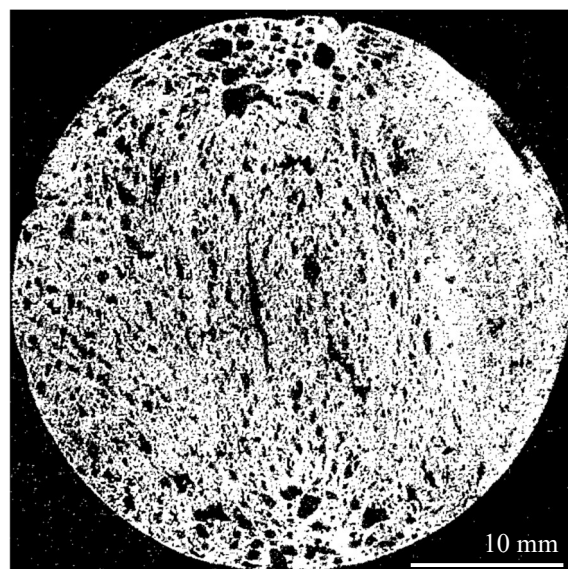
Automatska analize slike općenito podrazumijeva snimanje ili u ovom slučaju skeniranje strukture, prijenos toga zapisa u računalo, njegovu digitalizaciju, te obradu digitalnog zapisa nekim od komercijalno dostupnih programa. U ovom radu automatska je analiza provedena pomoću računalnog programa ImageJ koji se bazira na prebrojavanju piksela tamnih i svijetlih područja slike. Stoga je za kvalitetnu obradu nužno pravilno prilagoditi oštrinu slike i njenu

svjetloću. Slika u pravilu treba biti što veće rezolucije odnosno treba sadržati što veći broj piksela kako bi se mogla jasno razdvojiti tamnija i svjetlija područja. [31]

Slike 109, 110 i 111 prikazuju presjeke uzorka 1 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm obrađene računalnim automatskom analizom.

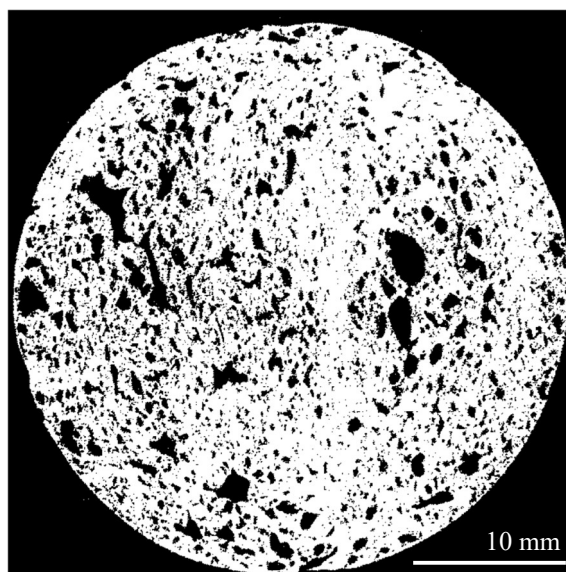


**Slika 109** Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 1



**Slika 110** Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 1





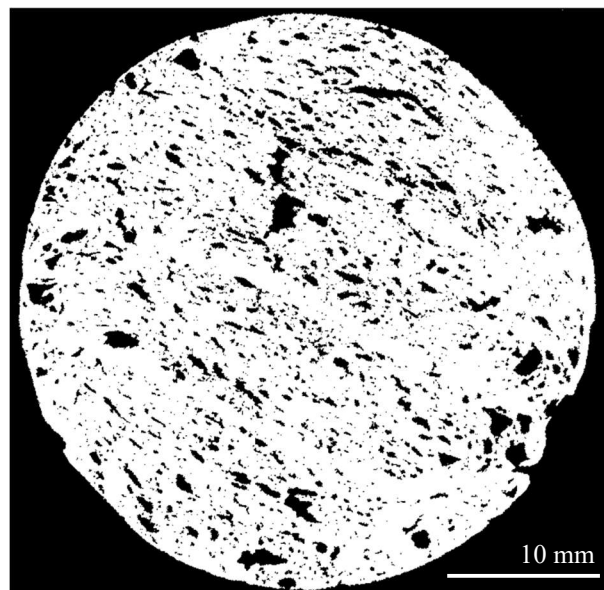
Slika 111 Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 1

Tablica 23 prikazuje vrijednosti dobivene automatskom analizom za svaki od tri odabrana uzorka 1.

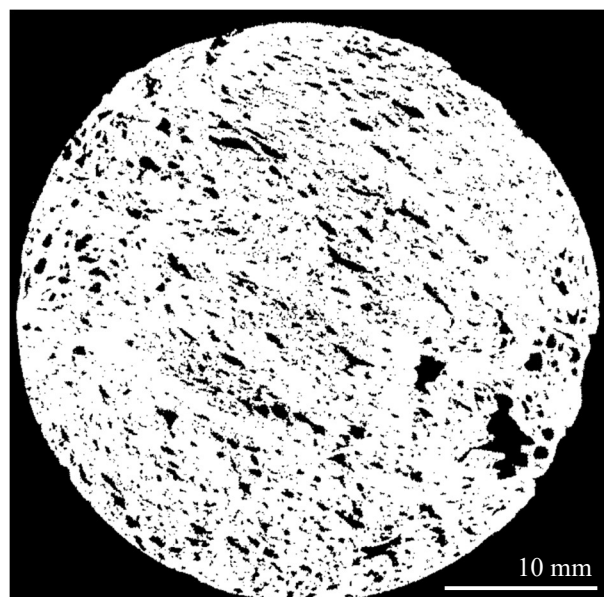
Tablica 23 Vrijednosti za uzorak 1 dobivene automatskom analizom

Presjeci	Poroznost, %
10 mm	23,4
20 mm	20,7
30 mm	25,2
$\bar{x}$	23,1

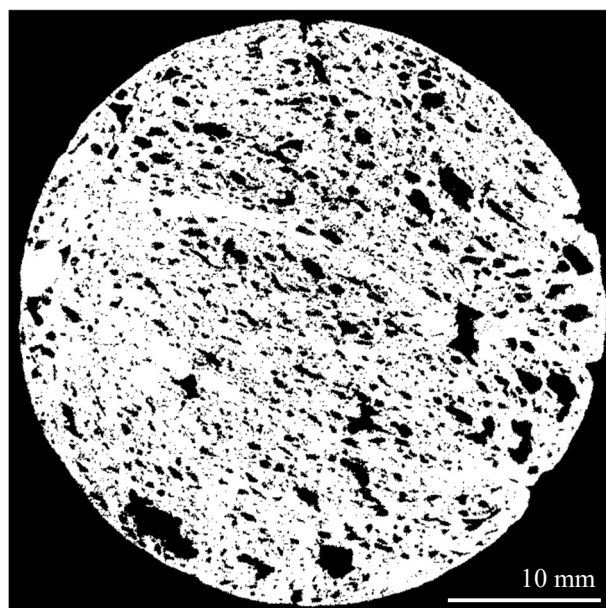
Slike 112, 113 i 114 prikazuju presjeke uzorka 2 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm obrađene računalnim automatskom analizom.



Slika 112 Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 2



Slika 113 Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 2



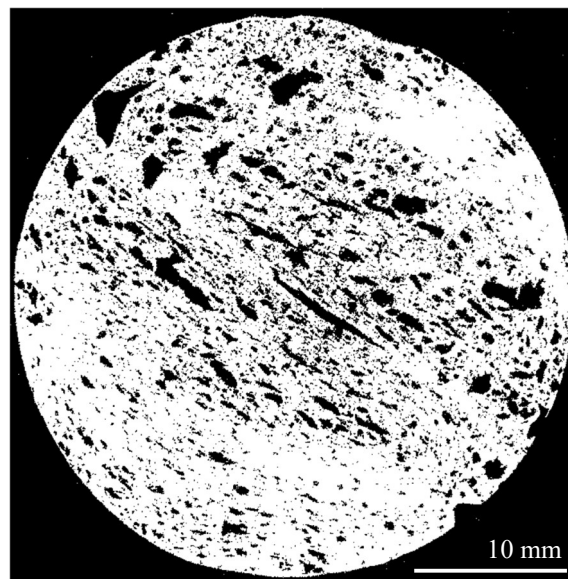
Slika 114 Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 2

Tablica 24 prikazuje vrijednosti dobivene automatskom analizom za svaki od tri odabrana uzorka 2.

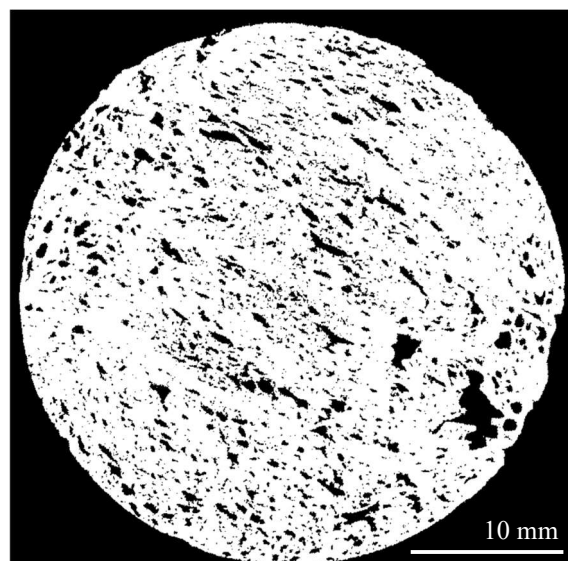
Tablica 24 Vrijednosti za uzorak 2 dobivene automatskom analizom

Presjeci	Poroznost, %
10 mm	19,6
20 mm	18,2
30 mm	17,6
$\bar{x}$	18,5

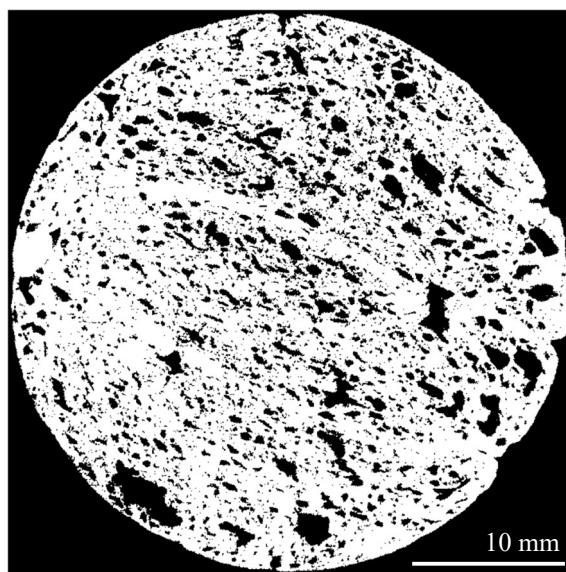
Slike 115, 116 i 117 prikazuju presjeke uzorka 3 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm obrađene računalnim automatskom analizom.



Slika 115 Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 3



Slika 116 Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 3



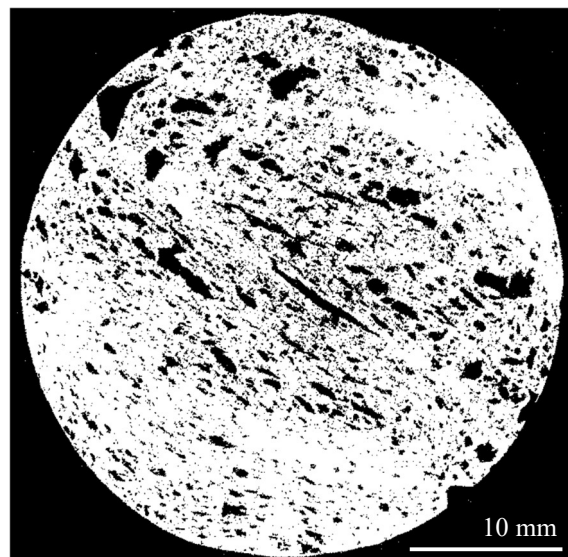
Slika 117 Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 3

Tablica 25 prikazuje vrijednosti dobivene automatskom analizom za svaki od tri odabrana uzorka 3.

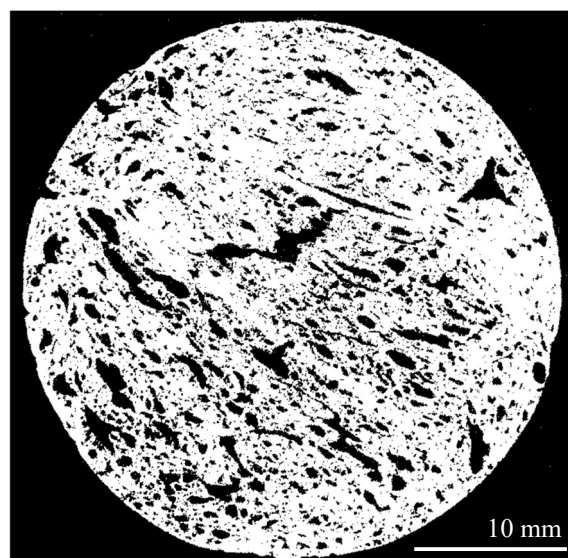
Tablica 25 Vrijednosti za uzorak 3 dobivene automatskom analizom

Presjeci	Poroznost, %
10 mm	14,9
20 mm	15,2
30 mm	23,9
$\bar{x}$	18,0

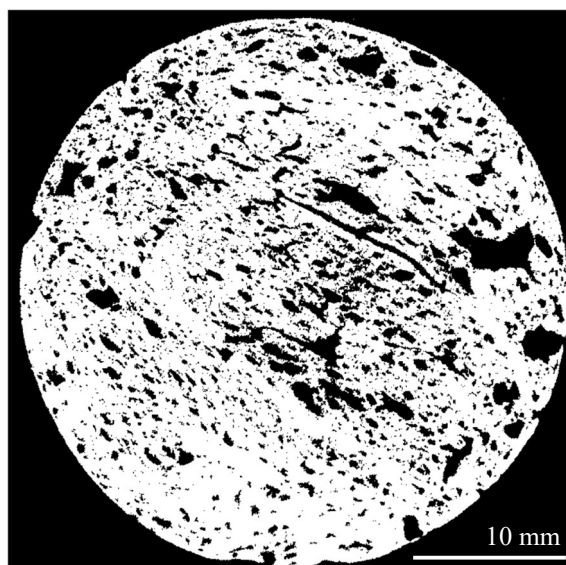
Slike 118, 119 i 120 prikazuju presjeke uzorka 3 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm obrađene računalnim automatskom analizom.



Slika 118 Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 4



Slika 119 Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 4



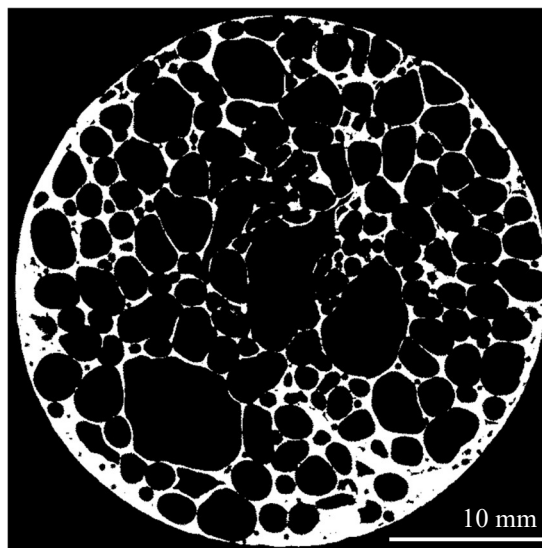
Slika 120 Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 4

Tablica 26 prikazuje vrijednosti dobivene automatskom analizom za svaki od tri odabrana uzorka 4.

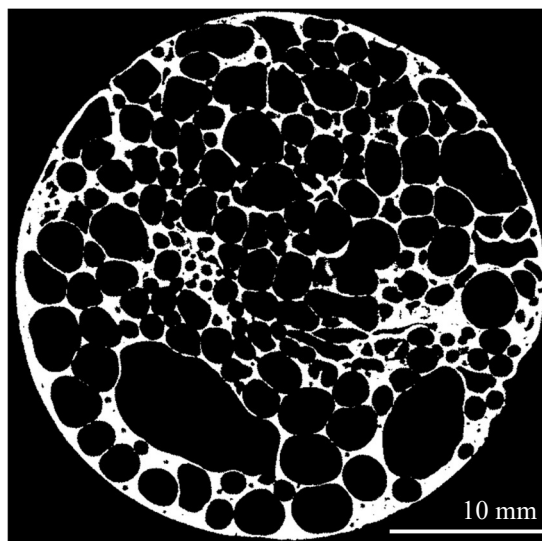
Tablica 26 Vrijednosti za uzorak 4 dobivene automatskom analizom

Presjeci	Poroznost, %
10 mm	21,7
20 mm	24,8
30 mm	23,1
$\bar{x}$	23,2

Slike 121, 122 i 123 prikazuju presjeke uzorka 5 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm obrađene računalnim automatskom analizom.

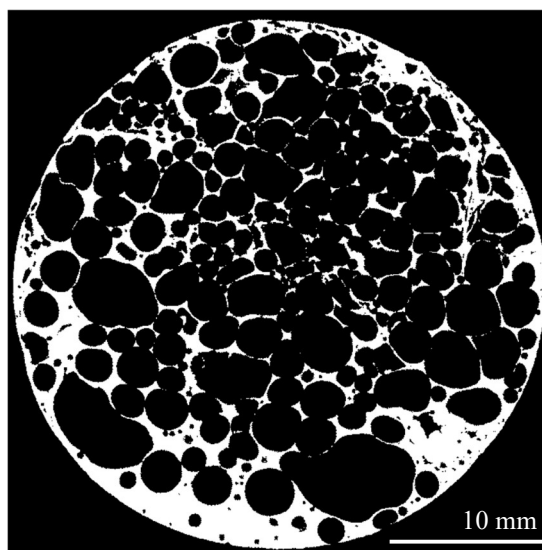


Slika 121 Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 5



Slika 122 Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 5





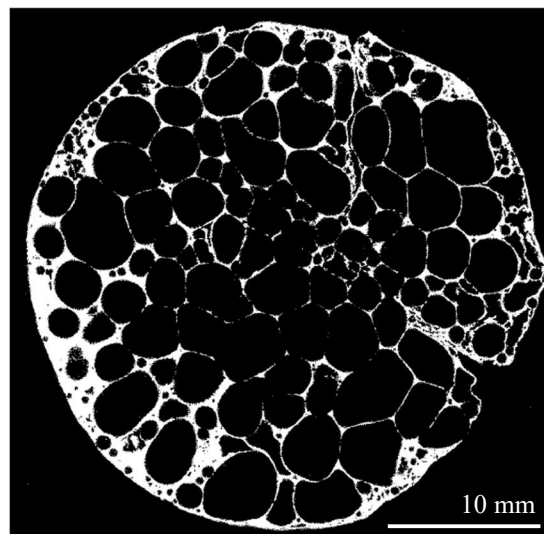
Slika 123 Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 5

Tablica 27 prikazuje vrijednosti dobivene automatskom analizom za svaki od tri odabrana uzorka 5.

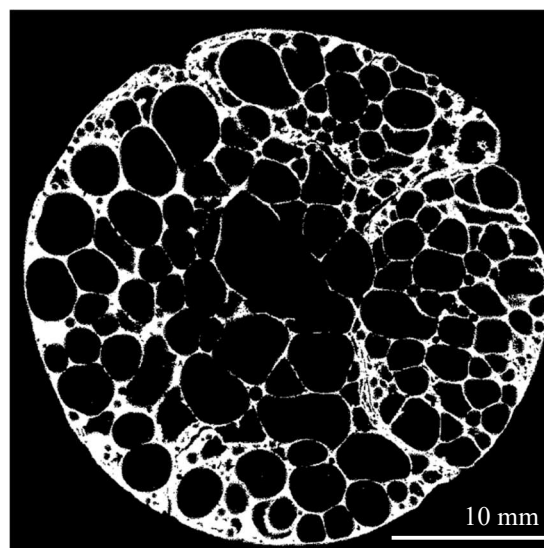
Tablica 27 Vrijednosti za uzorak 5 dobivene automatskom analizom

Presjeci	Poroznost, %
10 mm	82,4
20 mm	82,0
30 mm	84,7
$\bar{x}$	83,0

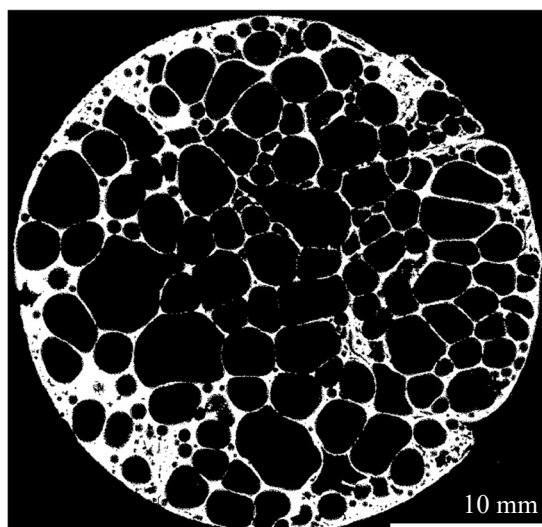
Slike 124, 125 i 126 prikazuju presjeke uzorka 6 na visinama od 10 mm, 20 mm i 30 mm obrađene računalnim automatskom analizom.



Slika 124 Automatska analiza, presjek na visini 10 mm, uzorak 6



Slika 125 Automatska analiza, presjek na visini 20 mm, uzorak 6



Slika 126 Automatska analiza, presjek na visini 30 mm, uzorak 6

Tablica 28 prikazuje vrijednosti dobivene automatskom analizom za svaki od tri odabrana uzorka 6.

Tablica 28 Vrijednosti za uzorak 6 dobivene automatskom analizom

Presjeci	Poroznost, %
10 mm	84,3
20 mm	81,1
30 mm	79,6
$\bar{x}$	81,6

### 7.3. Tlačno ispitivanje uzoraka

Uzorci su podvrgnuti tlačnom ispitivanju u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitni uređaj je bila univerzalna kidalica oznake EU 40 mod, proizvođača WPM, Njemačka. Sposobna je ostvariti tlačnu silu do 400 kN. Brzina ispitivanja je iznosila 30 mm/min. Na slici 127 prikazan je uzorak prilikom tlačnog ispitivanja, a na slici 128 su predloženi uzorci nakon provedenog ispitivanja.

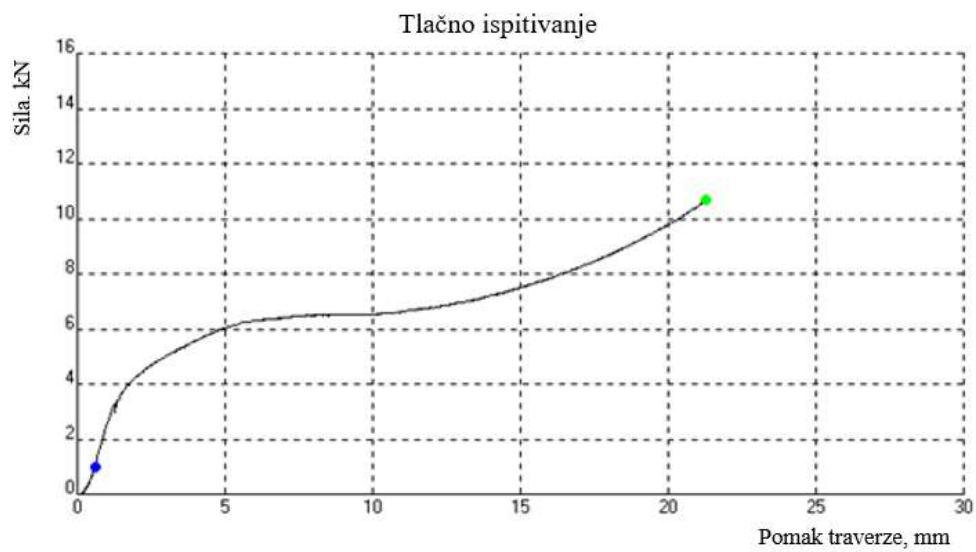


**Slika 127 Tlačno ispitivanje uzorka**

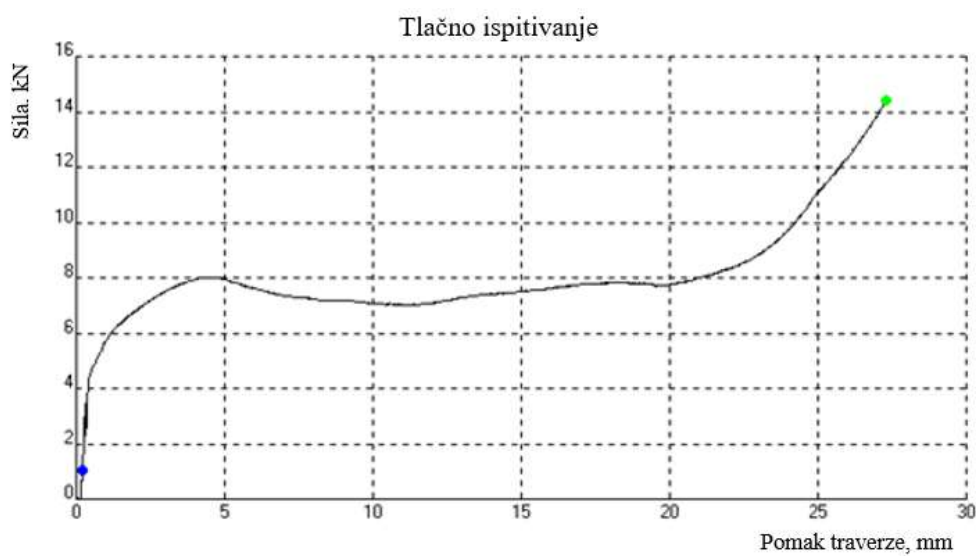


**Slika 128 Uzorci nakon tlačnog ispitivanja**

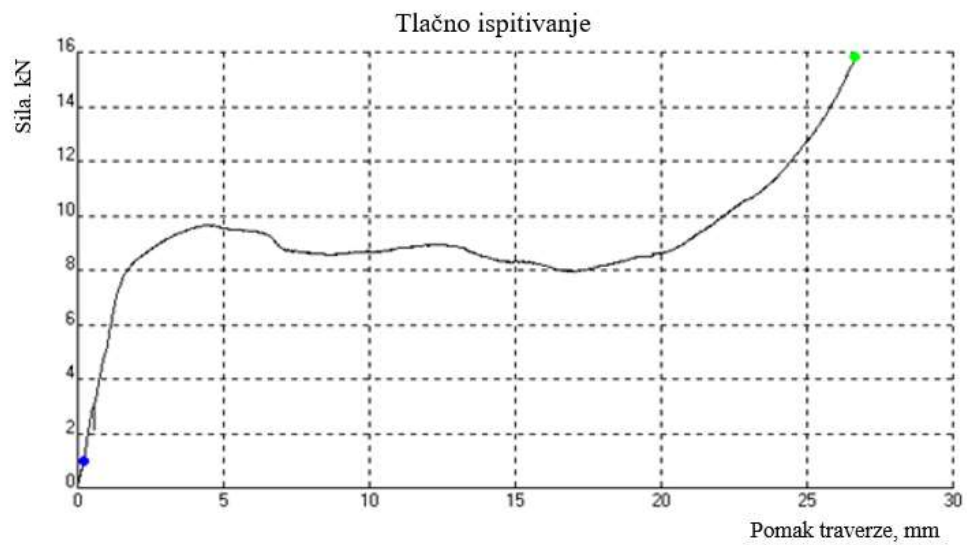
Na slikama 129 – 134 prikazani su dijagrami sila – pomak traverze dobiveni tlačnim ispitivanjem na univerzalnoj kidalici.



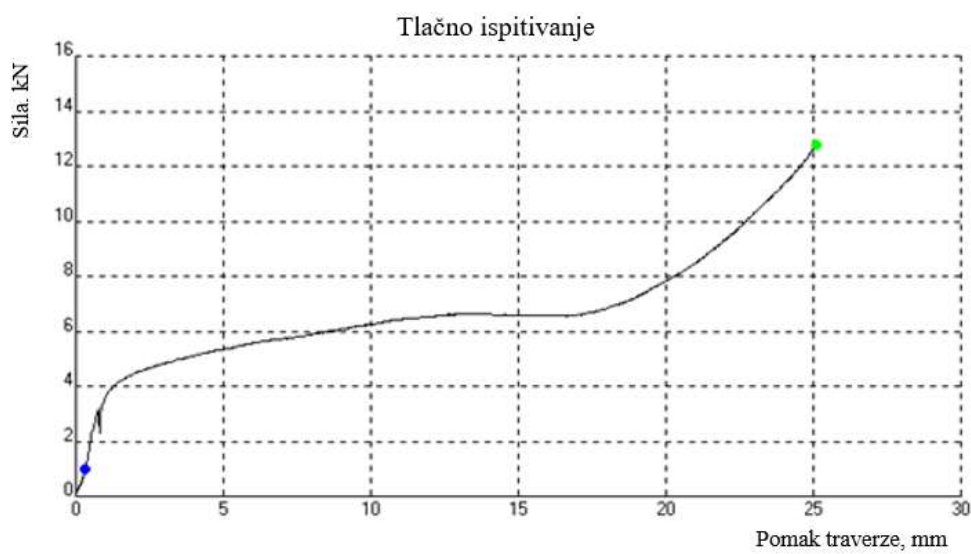
Slika 129 Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 1



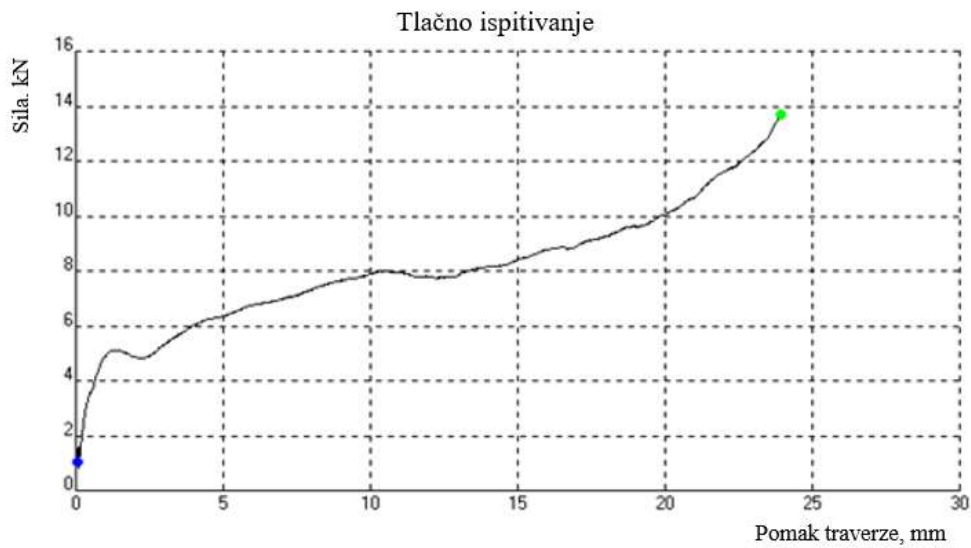
Slika 130 Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 2



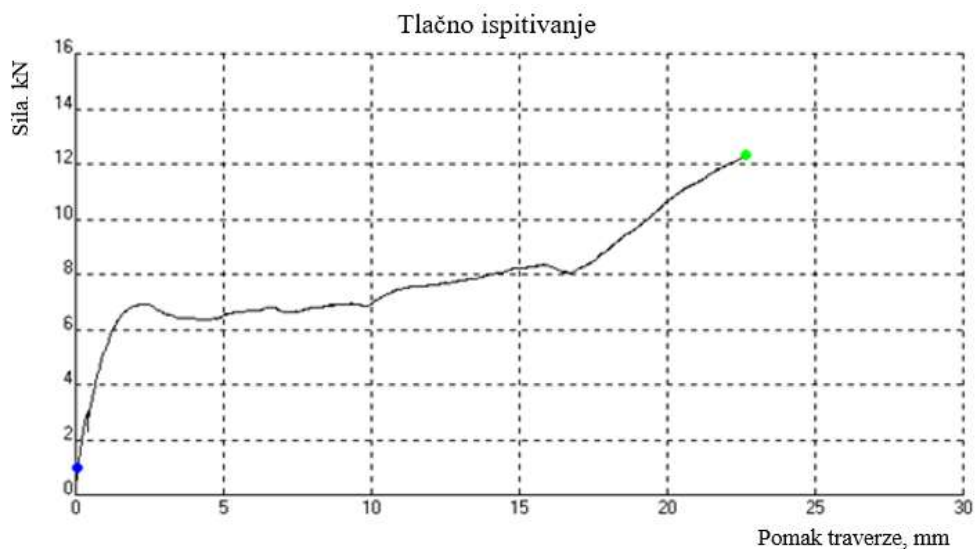
Slika 131 Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 3



Slika 132 Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 4

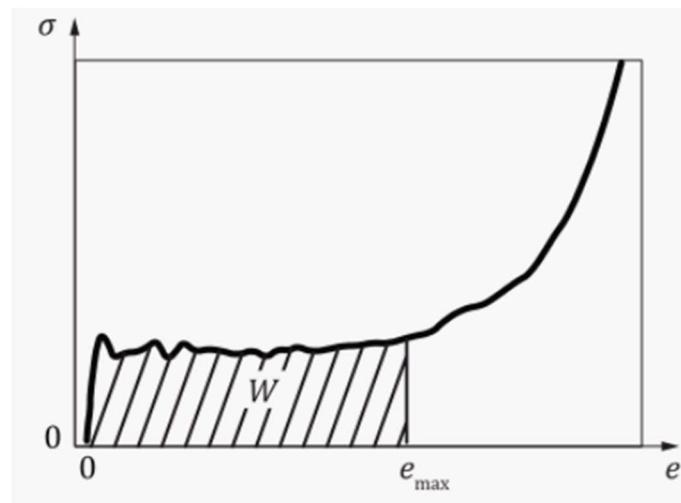


Slika 133 Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 5



Slika 134 Dijagram sila – pomak traverze, uzorak 6

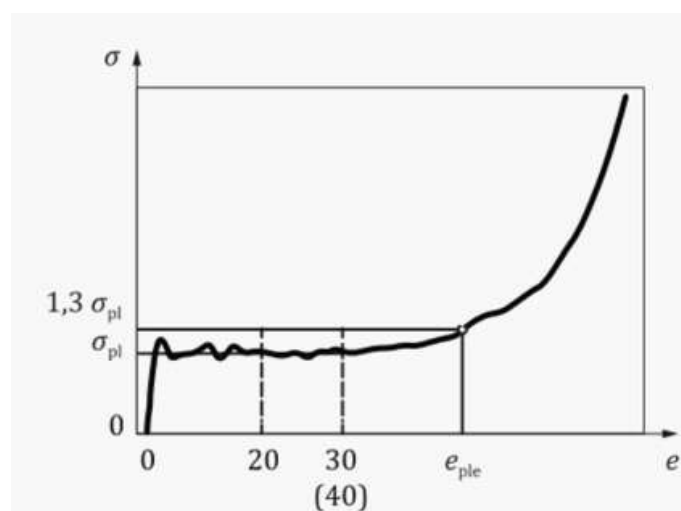
Osnovna namjena metalnih pjena jest apsorpcija energije. Energija koju su uzorci pri tlačenju apsorbirali se izražava površinom ispod krivulje naprezanje – deformacija kako je prikazano na slici 135. [32]



Slika 135 Dijagram naprezanje – deformacija s označenom specifičnom apsorpcijom energije

[32]

Kako bi se izračunala sposobnost apsorpcije energije potrebno je odrediti deformaciju pri 30 % većem naprezanju od platoa naprezanja kojeg karakteriziraju granične deformacije od 20 % do 30 % odnosno 20 % do 40 %. Slika 136 opisuje određivanje platoa naprezanja te onog višeg za 30 % od samog platoa. [32]



Slika 136 Dijagram naprezanje – deformacija s označenim platoom naprezanja kao i 130 % višim naprezanjem i pripadajućom deformacijom [32]



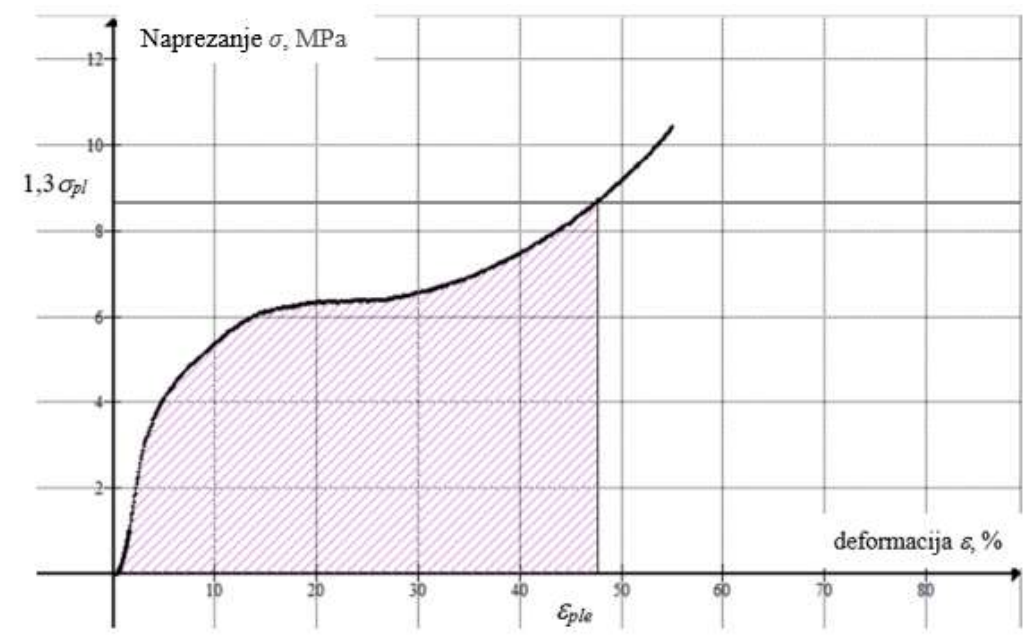
Za određivanje specifične apsorpcije energije ( $W$ ) koristi se jednačba (15):

$$W = \frac{1}{100} \int_0^{\varepsilon_{ple}} \sigma d\varepsilon, \text{ MJ/m}^3 \quad (15)$$

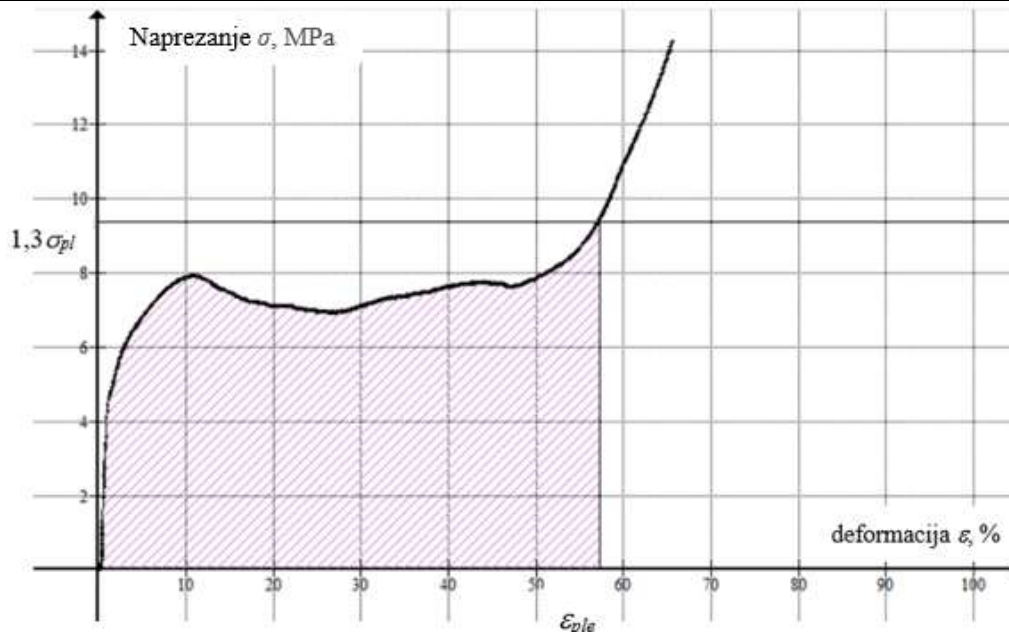
dok se efikasnost asporbirane energije ( $W_e$ ) se određuje iz izraza (16):

$$W_e = \frac{W}{1,3\sigma_{pl} \times \varepsilon_{ple}} \times 10^4, \% \quad (16)$$

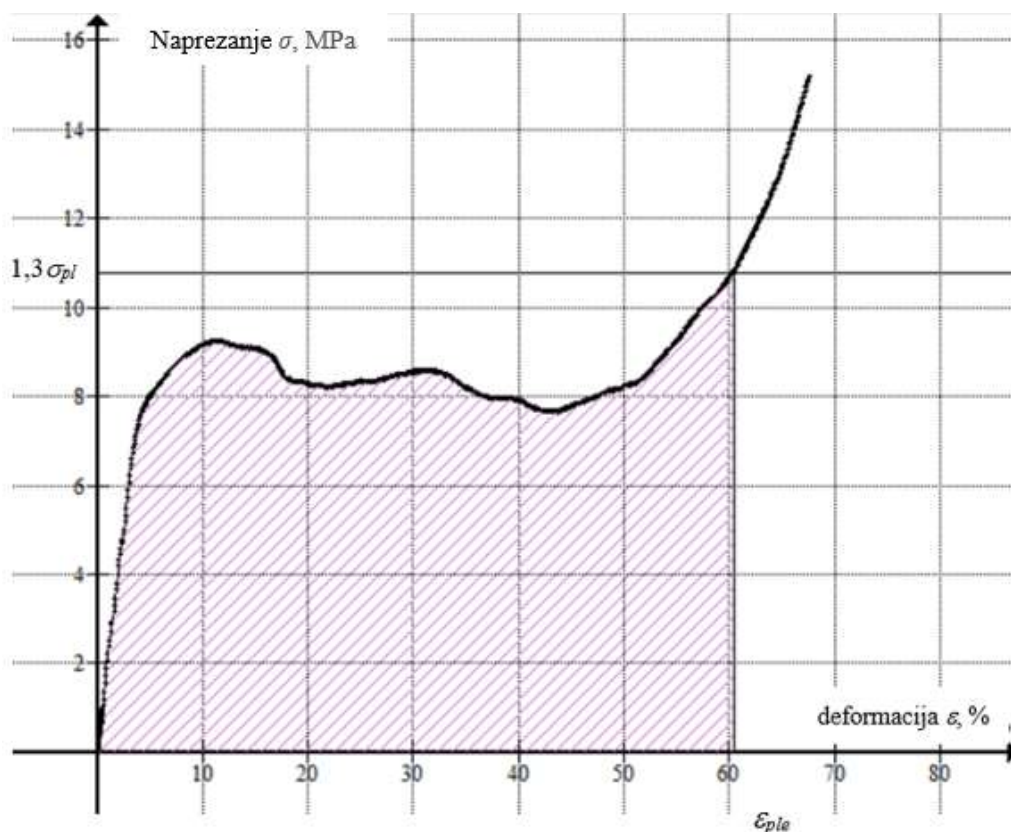
S ciljem utvrđivanja specifične apsorpcije energije konstruirani su dijagrami naprezanje – deformacija uz pomoć programskog paketa Graph, prikazani na slikama 137 do 142, te je određena površina ispod krivulje kako je prethodno definirano.



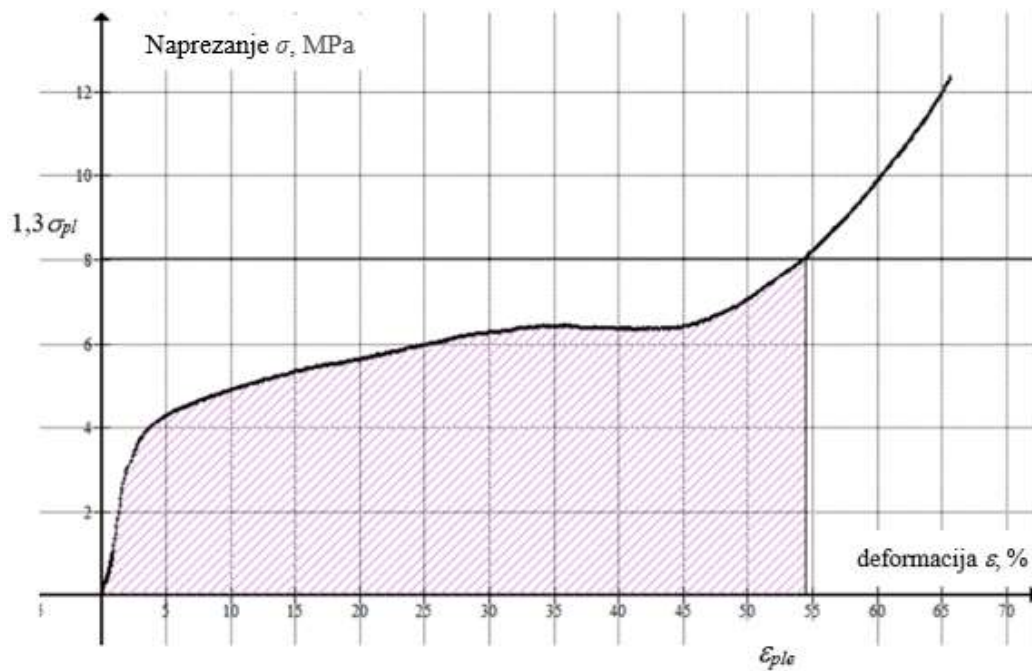
Slika 137 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 1



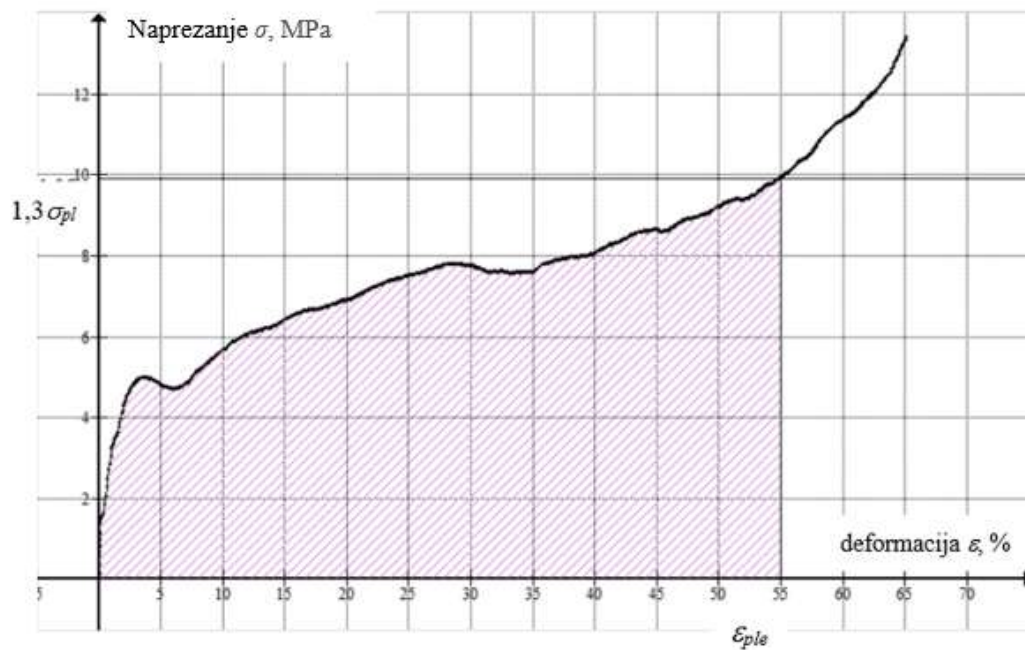
Slika 138 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 2



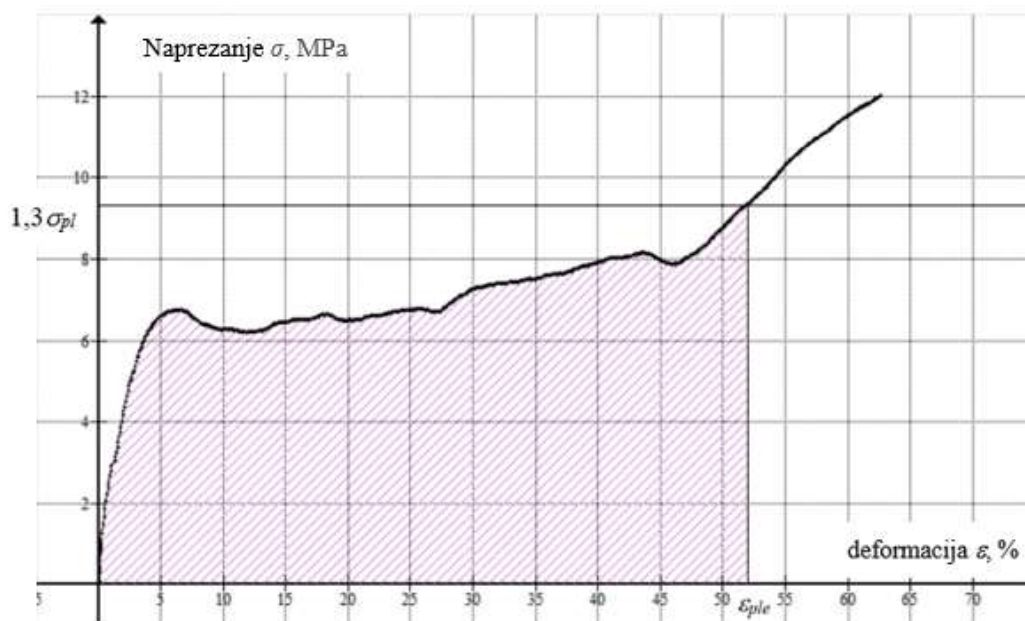
Slika 139 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 3



Slika 140 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 4



Slika 141 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 5



Slika 142 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 6

U tablici 29 predočene su vrijednosti platoa naprezanja ( $\sigma_{pl}$ ) određene graničnim deformacijama od 20 % do 40 % , kao i 130 % višeg naprazanja od platoa ( $1,3\sigma_{pl}$ ) te pripadajuće deformacije ( $\varepsilon_{ple}$ ) koja predstavlja desnu granicu integrala kojim se računa specifična apsorpcija energije ( $W$ ). Efikasnost apsorbirane energije ( $W_e$ ) dana je u posljednjem stupcu tablice. [32]

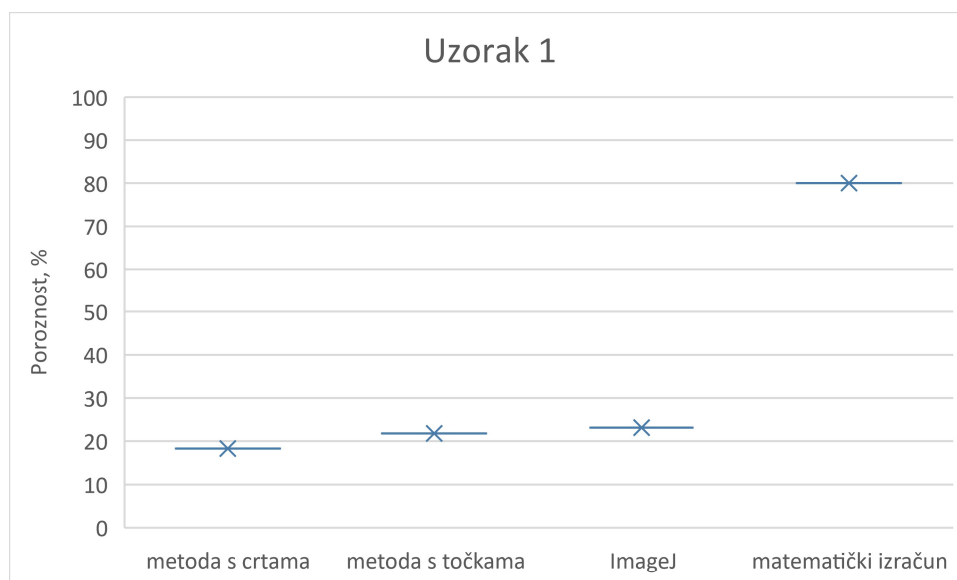
Tablica 29 Rezultati tlačnog ispitivanja

Uzorak	$\sigma_{pl}$ , (MPa)	$1,3\sigma_{pl}$ , (MPa)	$\varepsilon_{ple}$ , (%)	$W$ , (MJ/m <sup>3</sup> )	$W_e$ , (%)
1	6,673	8,675	47,672	2,900	70,124
2	7,202	9,363	57,306	4,202	78,314
3	8,297	10,786	60,446	4,989	76,522
4	6,180	8,034	54,405	3,128	71,564
5	7,621	9,907	54,941	3,954	72,644
6	7,159	9,307	51,937	3,612	74,724

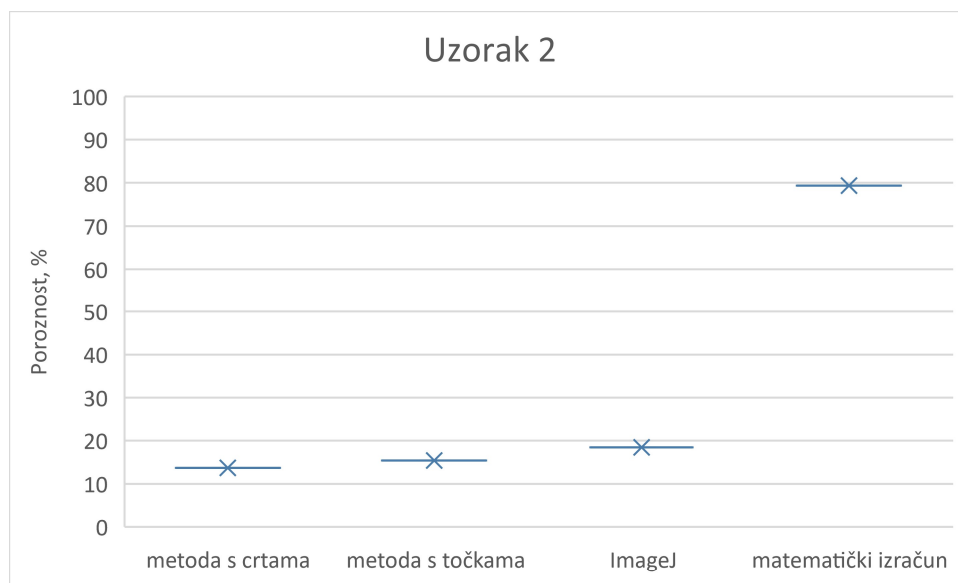
## 8. ANALIZA PODATAKA

Prilikom analize morfologije uzoraka korištene su linijska analiza, točkasta analiza, metoda s krugom te automatska analiza pomoću programa ImageJ. Za uzorke upjenjene s kalcijevim karbonatom je bilo iznimno zahtjevno odrediti poroznost te veličinu i oblik ćelija. Razlog tomu s jedne strane je vrlo mala veličina ćelija pa zbog relativno niske rezolucije CT uređaja male su ćelije tijekom skeniranja stopljene sa stijenkama. Također, do dodatnog pogoršanja rezolucije dolazi prilikom prebacivanja iz 3D modela u 2D presjek. Rezultati dobiveni analizom uzoraka upjenjenih kalcijevim karbonatom su u znatnom odstupanju od stvarnih vrijednosti. S obzirom da su upotrijebljene metode dale dobre rezultate za uzorke upjenjene titanijevim hidridom, evidentno je da odabrani agens igra veliku ulogu pri odabiru metoda kojima će se provesti analiza morfologije.  $TiH_2$  proizvodi veće ćelije, te je granica između ćelija i stijenki jasno vidljiva. Time se u direktnu vezu dovodi veličina ćelija i agens za upjenjavanje.

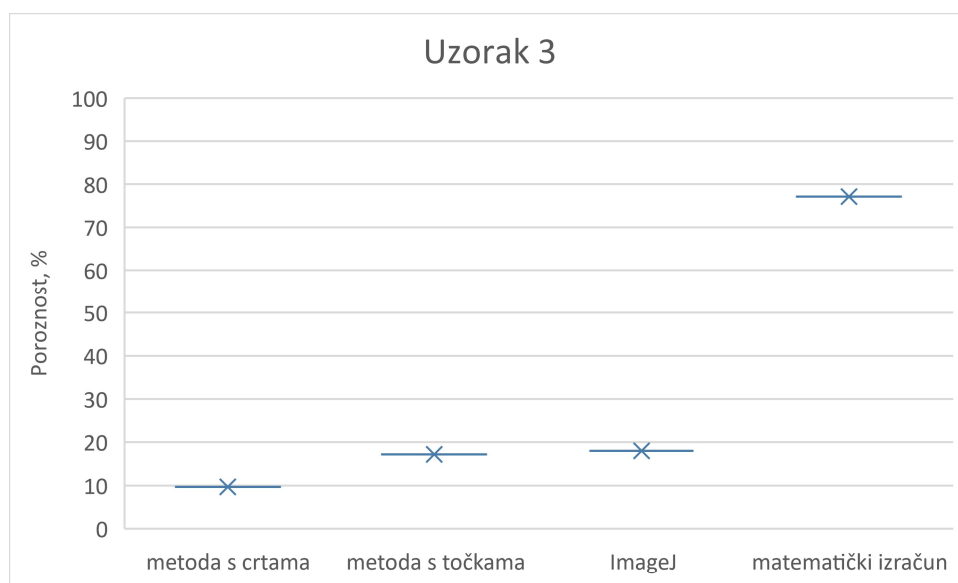
Grafovi na slikama 143 – 148 prikazuju podatke za poroznost dobivene različitim metodama. Na točnost podataka ponajviše je utjecala veličina ćelija koja je usko vezana s osjetljivošću pojedine metode, općenito, što su ćelije manje greška će biti veća.



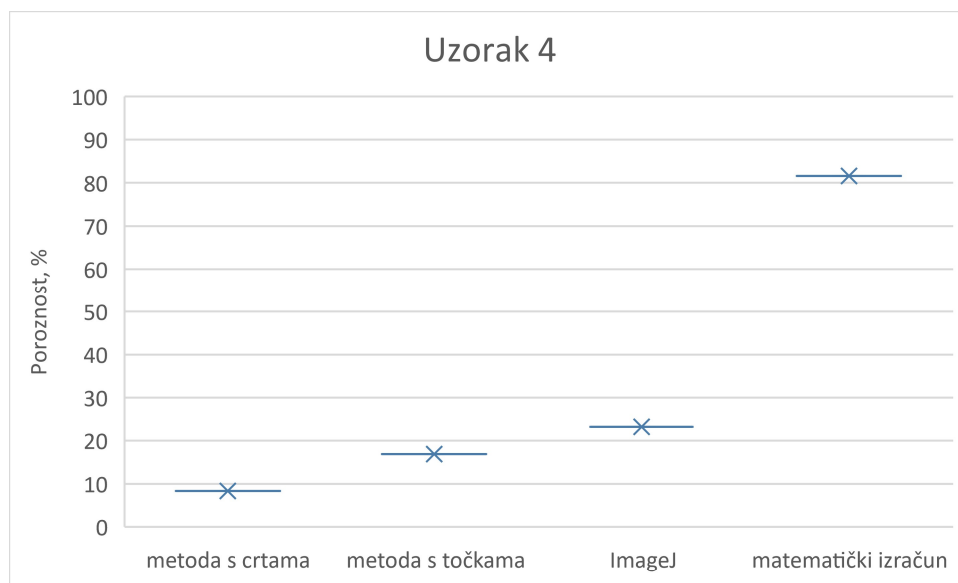
Slika 143 Poroznost uzorka 1



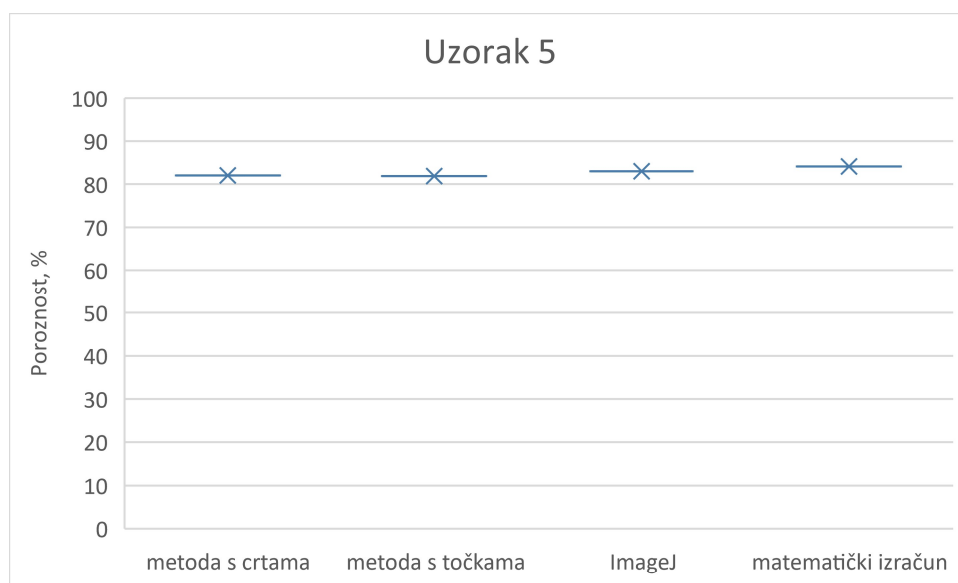
Slika 144 Poroznost uzorka 2



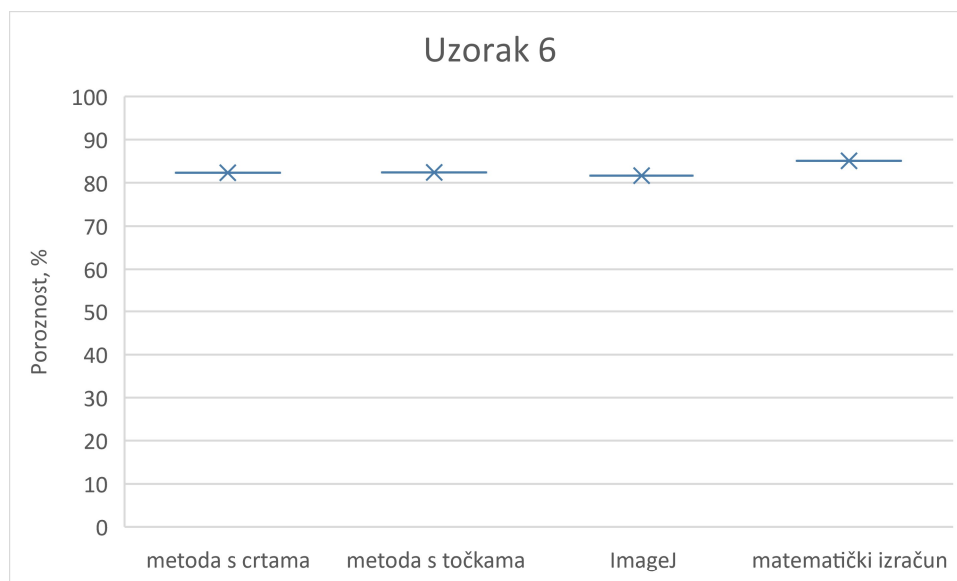
Slika 145 Poroznost uzorka 3



Slika 146 Poroznost uzorka 4



Slika 147 Poroznost uzorka 5

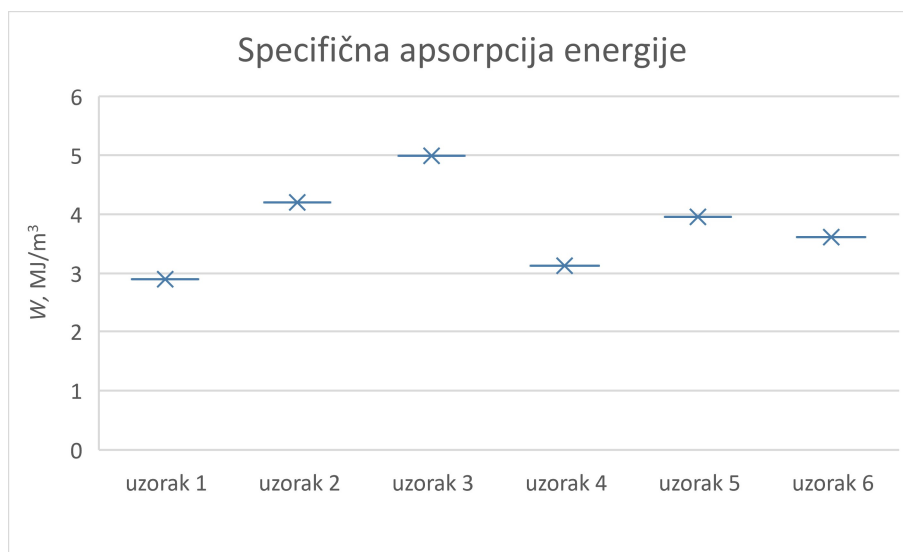


**Slika 148 Poroznost uzorka 6**

Iz prethodnih grafova se jasno vidi da kod uzoraka 5 i 6, upjenjenih titanijevim hidridom, morfološke metode daju poroznost podjednaku onoj matematički izračunatoj iz omjera mase i volumena uzorka u odnosu na gustoću osnovnog metala. Primijenjene metode stereološke analize 2D presjeka skeniranih modela nisu se pokazale prikladnima za uzorke vrlo malih ćelija upjenjenih kalcijevim karbonatom.

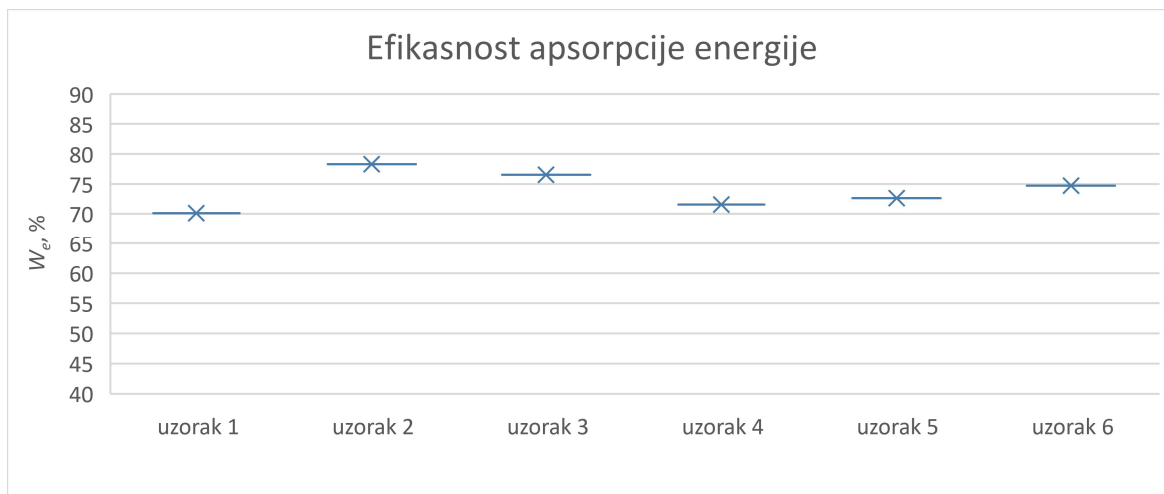
Slika 149 prikazuje graf specifične apsorpcije energije za različite uzorke ispitivanih metalnih pjena. Uzorci 1 i 2 upjenjeni su sa 3 %  $\text{CaCO}_3$ , uzorci 3 i 4 sa 5 %  $\text{CaCO}_3$ , dok je za uzorke 5 i 6 korišteno 0,4 %  $\text{TiH}_2$ . Iz grafa je jasno vidljivo da nema jasne korelacije između tlačnog ponašanja i vrste agensa za upjenjavanje odnosno njegovog masenog udjela. Vrijednosti se razlikuju zbog nehomogenosti strukture uzoraka te ispitivanja bez provedenih ponavljanja, usprkos činjenici da je za metalne pjene karakteristično veliko rasipanje rezultata.





Slika 149 Specifična apsorpcija energije uzoraka metalnih pjena

Slika 150 predočava efikasnost apsorpcije energije za tri različite skupine ispitivanih uzoraka. Njene vrijednosti približno su jednake za sve uzorke i kreću se oko 74 %.



Slika 150 Efikasnost apsorpcije energije uzoraka metalnih pjena

---

## 9. ZAKLJUČAK

Metalne pjene svojim karakteristikama se izdvajaju kao materijal višestruke namjene. Prilagodбом proizvodnih postupka moguće je dobiti dobre vodiče ili izolatore ovisno radi li se o pjenama s otvorenim ili zatvorenim ćelijama. Tehnologija proizvodnje koči njihovu masovnu upotrebu zbog visoke cijene te još uvijek nedovoljno istraženih utjecaja sastava sirovine i tehnologije izrade na konačna svojstva. Postupci proizvodnje iz tekuće faze spadaju među najjeftinije, ali su ograničeni samo na metale niskog tališta te neraktivne metale. Postupci s punilima imaju dobru kontrolu nad veličinom i oblikom ćelija. Ne postoji univerzalan postupak proizvodnje metalnih pjena za sve metale. Ovisno o odabiru polaznog materijala potrebno je odabrati prikladan postupak. Aditivna proizvodnja metalnih pjena još uvijek nije dostupna za masovnu proizvodnju zbog njene dugotrajnosti te velikih ulaganja u potrebnu opremu.

S vremenom će metalne pjene zbog svojih dobrih karakteristika apsorpiranja energije zauzeti prvo mjesto kada je riječ o sigurnosnim standardima u transportu. Mala masa te negorivost uz dobra toplinska svojstva sve više osiguravaju mjesto metalnim pjenama u građevinskom sektoru. Zbog postojanosti pri višim temperaturama te dobre krutosti imaju veći spektar primjene od polimernih pjena, ali im je cijena, koja igra odlučujuću ulogu, još uvijek previsoka u usporedbi s polimernim pjenama.

Ispitivani uzorci su uspješno upjenjeni s relativno visokim iznosima poroznosti od 77,14 % sve do 85,07 %. Uzorci aluminija, odnosno AlMgSi0,6 legure, su upjenjeni različitim agensima ( $\text{CaCO}_3$  i  $\text{TiH}_2$ ) te različitim volumnim udjelima agensa (3 i 5 %  $\text{CaCO}_2$ , 0,4 %  $\text{TiH}_2$ ). Fokus je bio na analizi morfologije uzoraka temeljem primjene različitih metoda analize 2D presjeka iz 3D modela dobivenog skeniranjem na CT uređaju. Za svaki uzorak napravljena su 3 presjeka na 10 mm, 20 mm i 30 mm. S obzirom na jako male ćelije, pjene upjenjene kalcijevim karbonatom nisu pogodne za ovakva morfološka ispitivanja temeljena na 3D modelima. Analiza u programu za obradu trodimenzionalnih modela dala bi točnije rezultate jer ne bi bilo potrebno prebacivati presjeke iz jednog programa u drugi čime se gubi kvaliteta slike. Također su razmatrane razlike u tlačnim svojstvima metalnih pjena te nije uspostavljena jednoznačna veza s polaznom strukturom uveliko determiniranom agensom za upjenjavanje. Razlog za to je mali broj provedenih ispitivanja.

---

**LITERATURA**

- [1] Orbulov IN, Szlancsik A, Kemény A, Kincses D. Low-Cost Light-Weight Composite Metal Foams for Transportation Applications. *J Mater Eng Perform.* 2022 Sep 1;31(9):6954–61. doi: 10.1007/s11665-022-06644-4
- [2] Károly D, Iklódi Z, Kemény A, Kincses DB, Orbulov IN. Production and Functional Properties of Graded Al-Based Syntactic Metal Foams. *Metals (Basel).* 2022 Feb 1;12(2). doi: 10.3390/met12020263
- [3] Banhart J. Light-metal foams - History of innovation and technological challenges. Vol. 15, *Advanced Engineering Materials.* 2013. p. 82–111. doi: 10.1002/adem.201200217
- [4] Ubertalli G, Ferraris S. Al-based metal foams (AMF) as permanent cores in casting: State-of-the-art and future perspectives. Vol. 10, *Metals.* MDPI AG; 2020. p. 1–20. doi: 10.3390/met10121592
- [5] Kuwahara T, Osaka T, Saito M, Suzuki S. Compressive properties of A2024 alloy foam fabricated through a melt route and a semi-solid route. *Metals (Basel).* 2019;9(2). doi: 10.3390/met9020153
- [6] Kalpakoglou T, Yiatros S. Metal foams: A review for mechanical properties under tensile and shear stress. Vol. 9, *Frontiers in Materials.* Frontiers Media S.A.; 2022. doi: 10.3389/fmats.2022.998673
- [7] Jiang B, He C, Zhao N, Nash P, Shi C, Wang Z. Ultralight metal foams. *Sci Rep.* 2015 Sep 8;5. doi: 10.1038/srep13825
- [8] Parveez B, Jamal NA, Anuar H, Ahmad Y, Aabid A, Baig M. Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review. Vol. 15, *Materials.* MDPI; 2022. doi: 10.3390/ma15155302
- [9] Filetin Tomislav, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju (Zagreb). *Metalne pjene : proizvodnja, svojstva i primjena.* Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju; 2003.
- [10] Monno M, Negri D, Mussi V, Aghaei P, Groppi G, Tronconi E, et al. Cost-Efficient Aluminum Open-Cell Foams: Manufacture, Characterization, and Heat Transfer Measurements. *Adv Eng Mater.* 2018 Aug 1;20(8). doi: 10.1002/adem.201701032

- 
- [11] Tatt TK, Muhamad N, Sulong AB, Paramasivam S, Huey HS, Anuar SA. Review on Manufacturing of Metal Foams. *ASM Science Journal*. 2021;16:1–8. doi: 10.32802/asmscj.2021.794
- [12] Atwater MA, Guevara LN, Darling KA, Tschopp MA. Solid State Porous Metal Production: A Review of the Capabilities, Characteristics, and Challenges. Vol. 20, *Advanced Engineering Materials*. Wiley-VCH Verlag; 2018. doi: 10.1002/adem.201700766
- [13] Lehmhus D, Vesenjajk M, de Schampheleire S, Fiedler T. From stochastic foam to designed structure: Balancing cost and performance of cellular metals. Vol. 10, *Materials*. MDPI AG; 2017. doi: 10.3390/ma10080922
- [14] García-Moreno F. Commercial applications of metal foams: Their properties and production. Vol. 9, *Materials*. MDPI AG; 2016. doi: 10.3390/ma9020085
- [15] Zhou C, Liang G, Liu Y, Zhang H, Chen X, Li Y. Pore structure of porous Mg-1Mn-xZn alloy fabricated by metal–gas eutectic unidirectional solidification. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022 Aug 1;10(8):2137–46. doi: 10.1016/j.jma.2021.03.026
- [16] Juan L, Qinglin J, Tianwu Y, Zaijiu L, Ming X. Pore Morphology of Lotus-type Porous Silver Fabricated by Gasar Process in Oxygen Atmosphere. *Rare Metal Materials And Engineering*. 2016 Oct;45(10):2519–23.
- [17] Güner A, Arıkan MM, Nebioglu M. New approaches to aluminum integral foam production with casting methods. Vol. 5, *Metals*. MDPI AG; 2015. p. 1553–65. doi: 10.3390/met5031553
- [18] Szyniszewski ST, Smith BH, Hajjar JF, Schafer BW, Arwade SR. The mechanical properties and modeling of a sintered hollow sphere steel foam. *Mater Des*. 2014 Feb;54:1083–94. doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.045
- [19] Zhu L, Li N, Childs PRN. Light-weighting in aerospace component and system design. *Propulsion and Power Research*. 2018 Jun 1;7(2):103–19. doi: 10.1016/j.jprr.2018.04.001
- [20] Voillat R, Gallien F, Mortensen A, Gass V. Hypervelocity impact testing on stochastic and structured open porosity cast Al-Si cellular structures for space applications. *Int J Impact Eng*. 2018 Oct 1;120:126–37. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.002

- 
- [21] Huisseune H, De Schampheleire S, Ameel B, De Paepe M. Comparison of metal foam heat exchangers to a finned heat exchanger for low Reynolds number applications. *Int J Heat Mass Transf.* 2015 Oct;89:1–9. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.013
- [22] Degischer H-Peter, Kriszt Brigitte. *Handbook of cellular metals : production, processing, applications.* Wiley-InterScience; 2002. 373 p.
- [23] Duarte I, Fiedler T, Krstulović-Opara L, Vesenjajk M. Brief review on experimental and computational techniques for characterization of cellular metals. Vol. 10, *Metals.* MDPI AG; 2020. doi: 10.3390/met10060726
- [24] Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Prog Mater Sci.* 2001 Jan;46(6):559–632. doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [25] Simon M, Sauerwein C, Tiseanu I, Burdairon S. Multi-Purpose 3d Computed Tomography System.
- [26] Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG. *Metal Foams: A Design Guide* Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data [Internet]. Dostupno na: <http://www.bh.com>
- [27] ISO 13314:2011 – Mechanical testing of metals – Ductility testing – Compression test for porous and cellular metals.
- [28] Vesenjajk M, Duarte I, Baumeister J, Göhler H, Krstulović-Opara L, Ren Z. Bending performance evaluation of aluminium alloy tubes filled with different cellular metal cores. *Compos Struct.* 2020 Feb;234:111748. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111748
- [29] Styles M, Compston P, Kalyanasundaram S. The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures. *Compos Struct.* 2007 Oct;80(4):532–8. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.07.002
- [30] Liu PS. Mechanical relations for porous metal foams under several typical loads of shearing, torsion and bending. *Materials Science and Engineering A.* 2010 Nov 15;527(29–30):7961–6. doi: 10.1016/j.msea.2010.08.027
- [31] Ćorić D, Begović T, Aleksandrov-Fabijanić T. Karakterizacija morfologije metalnih pjena. *Tehnički glasnik.* 2015;9:285–90.
- [32] ISO 17340:2020 – Metallic materials – Ductility testing – High speed compression test for porous and cellular metals.