

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Kurtalj

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Ćorić

Student:

Luka Kurtalj

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc Danku Ćoriću na pruženom znanju, strpljenju i pomoći pri izradi diplomskog rada, asistentu Tomislavu Rodingeru, mag.ing.mech. na velikom trudu i korisnim savjetima koji su neizmjereno pomogli, te tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na tehničkoj pomoći.

Također, hvala mojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

(Vlastoručni Potpis)

Luka Kurtalj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA KURTALJ** Mat. br.: 0035202975

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj relativne gustoće aluminijske pjene na vrijednosti savojne čvrstoće**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of aluminum foam relative density on the values of flexural strength**

Opis zadatka:

Metalne pjene predstavljaju relativno novu vrstu materijala razvijenog na osnovi oponašanja strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala. U odnosu na druge konstrukcijske materijale, prednosti su mala gustoća te povoljna specifična čvrstoća i specifična krutost. Temeljna svojstva aluminijskih pjena proizlaze od ćelijaste građe većeg ili manjeg stupnja poroznosti.

U radu je potrebno načiniti sljedeće:


1. Opisati metalne pjene i istaknuti njihova svojstva koristeći dostupne literaturne izvore.
2. Opisati postupak proizvodnje "alulight" pjena.
3. Načiniti uzorke aluminijske pjene različite relativne gustoće.
4. Provesti ispitivanja savijanjem u tri točke.
5. Usporediti dobivene rezultate te donijeti odgovarajuće zaključke.


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

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. METALNE PJENE.....	3
2.1. Općenito o metalnim pjenama	3
2.2. Česticama ojačane metalne pjene	4
2.3. Svojstva metalnih pjena	6
2.3.1. Vatrootpornost	8
2.3.2. Prigušenje vibracija.....	8
2.3.3. Akustična svojstva	8
2.3.4. Toplinska vodljivost.....	9
2.3.5. Savojna čvrstoća	9
2.3.5.1. Ispitivanje savijanjem u tri točke	10
2.3.5.2. Ispitivanje savijanjem u četiri točke	11
2.3.6. Relativna gustoća metalnih pjena	12
2.3.7. Usporedba svojstava metalnih pjena s ostalim ćelijastim materijalima.....	12
2.3.7.1. Polimerna pjena	12
2.3.7.2. Drvo	14
2.4. Primjena metalnih pjena.....	15
2.5. Proizvodnja metalnih pjena.....	17
2.5.1. Proizvodnja metalnih pjena iz rastaljenog metala.....	18
2.5.1.1. Direktno upjenjivanje.....	18
2.5.1.2. Eutektičko skrućivanje krutina – plin	21
2.5.1.3. Precizno lijevanje.....	22
2.5.1.4. Sintaktičke pjene.....	24
2.5.2. Proizvodnja metalnih pjena iz praha.....	24
2.5.2.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi (Fraunhofer proces)	24
2.5.2.2. Ekspanzija plina u talini.....	26
2.5.2.3. Upjenjivanje kaša.....	26
2.5.3. Proizvodnja metalnih pjena iz ioniziranog metala.....	27
3. SPAJANJE METALNIH PJENA.....	28
3.1. Spajanje ljepilima.....	28
3.2. Rastavljivi spojevi.....	28
3.3. Zavarivanje.....	30
4. „ALULIGHT“ PJENE	31

5. EKSPERIMENTALNI DIO	34
5.1. Priprema uzoraka	34
5.2. Gustoća upjenjenih uzoraka	38
5.3. Ispitivanje savijanjem u tri točke	39
6. ANALIZA REZULTATA	46
7. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	55

POPIS SLIKA

Slika 1.	Blokovi od aluminijske pjene proizvedeni u Ethyl korporaciji [2].....	1
Slika 2.	Metalne pjene s otvorenim ćelijama (lijevo) i zatvorenim ćelijama (desno) [4].....	3
Slika 3.	Struktura kosti (A) i metalne pjene (B) [1]	3
Slika 4.	Ovisnost granice razvlačenja o udjelu keramičkih čestica [5]	5
Slika 5.	Upijanje zvuka PU pjena, Al pjena, staklenih vlakana i aluminijska [7]	9
Slika 6.	Shema ispitivanja savijanjem u tri točke [8]	10
Slika 7.	Shema ispitivanja savijanjem u četiri točke [8].....	11
Slika 8.	Pjene sa zatvorenim ćelijama: a) PUR pjena [11]; b) metalna pjena [4]	13
Slika 9.	Element za apsorpciju udara (a) i CAD model konstrukcije automobila (b) [13]	15
Slika 10.	Stropovi od metalnih pjena [13]	16
Slika 11.	Funkcionalni proizvodi (filteri, prigušivači) napravljeni od metalnih pjena [13]..	16
Slika 12.	Izmjenjivači topline od metalnih pjena [13].....	17
Slika 13.	Shematski prikaz procesa direktnog upjenjivanja [14]	19
Slika 14.	Faze postupka direktnog upjenjivanja (MMC pjene) [6]	19
Slika 15.	Shematski prikaz „ALPORAS“ procesa [15].....	20
Slika 16.	Faze „ALPORAS“ procesa proizvodnje pjena [6]	20
Slika 17.	Shema procesa eutektičkog skrućivanja krutina-plin [7]	21
Slika 18.	Faze procesa eutektičkog skrućivanja krutina-plin [6].....	22
Slika 19.	Shema preciznog lijevanja metalnih pjena [7]	23
Slika 20.	Faze preciznog lijevanja metalnih pjena [6].....	23
Slika 21.	Faze procesa izrade sintaktičkih pjena [6]	24
Slika 22.	Shema Fraunhofer procesa proizvodnje metalnih pjena [16].....	25
Slika 23.	Sendvič konstrukcije proizvedene Fraunhofer procesom [6].....	25
Slika 24.	Proces ekspanzije plina u talini [18].....	26
Slika 25.	Faze postupka upjenjivanja kaše [6]	27
Slika 26.	Faze postupka proizvodnje metalnih pjena prevlačenjem [6]	27
Slika 27.	Povezivanje umetka i pjene [7]	28
Slika 28.	Metalne pjene spojene umetkom [7]	29
Slika 29.	Spajanje metalnih pjena vijcima i kutnim profilom [7]	29
Slika 30.	Proces zavarivanja metalnih pjena [7].....	30
Slika 31.	Specifična krutost „Alulight“ pjena u odnosu na druge materijale [20]	31
Slika 32.	Dijagram naprezanje-deformacija za materijale s dobrom apsorpcijom energije [21]	32
Slika 33.	Naplatak s jezgrom od „Alulight“ pjene [7].....	33
Slika 34.	Apsorberi energije kod: (a) Combino tramvaja; (b) Audiya Q7 [13]	33
Slika 35.	Gotovi prekursor u obliku traka	34
Slika 36.	Narezani prekursor u kalupu	35
Slika 37.	Zatvoreni kalup.....	35
Slika 38.	Elektrootporna zvonasta peć	36
Slika 39.	Gotovi uzorci	37
Slika 40.	Digitalna vaga RADWAG WLC 1/A2/C/2.....	37
Slika 41.	Kidalice WPM EU40mod	39
Slika 42.	Naprava za ispitivanje savijanjem u tri točke.....	40
Slika 43.	Shema savijanja u tri točke s dimenzijama	40
Slika 44.	Krivulja sila – progib, uzorak 1	41
Slika 45.	Uzorci nakon ispitivanja savijanjem u tri točke	42
Slika 46.	Određivanje točaka uz pomoć „WebPlotDigitizer“ alata.....	44
Slika 47.	Dijagram s ucrtanim karakterističnim točkama.....	44

Slika 48.	Konvertirani dijagram sila – progib s površinom ispod krivulje, uzorak 1	45
Slika 49.	Izmjerene vrijednosti maksimalne sile	46
Slika 50.	Izmjerene vrijednosti progiba.....	46
Slika 51.	Izmjerene vrijednosti savojne čvrstoće	47
Slika 52.	Izmjerene vrijednosti utrošene energije	47
Slika 53.	Ovisnost savojne čvrstoće o poroznosti aluminijske pjene.....	48
Slika 54.	Ovisnost utrošenog rada za kidanje o poroznosti aluminijske pjene	49
Slika 55.	Ovisnost progiba o poroznosti aluminijske pjene	50
Slika 56.	Krivulja sila – progib, uzorak 1	55
Slika 57.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 1	55
Slika 58.	Krivulja sila – progib, uzorak 2.....	56
Slika 59.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 2	56
Slika 60.	Krivulja sila – progib, uzorak 3.....	57
Slika 61.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 3	57
Slika 62.	Krivulja sila – progib, uzorak 4.....	58
Slika 63.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 4	58
Slika 64.	Krivulja sila – progib, uzorak 5.....	59
Slika 65.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 5	59
Slika 66.	Krivulja sila – progib, uzorak 6.....	60
Slika 67.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 6	60
Slika 68.	Krivulja sila – progib, uzorak 7.....	61
Slika 69.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 7	61
Slika 70.	Krivulja sila – progib, uzorak 8.....	62
Slika 71.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 8	62
Slika 72.	Krivulja sila – progib, uzorak 9.....	63
Slika 73.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 9	63
Slika 74.	Krivulja sila – progib, uzorak 10.....	64
Slika 75.	Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu <i>Graph</i> , uzorak 10 ...	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Izrazi za računanje svojstava metalnih pjena [1].....	6
Tablica 2. Svojstva nekih komercijalno dostupnih metalnih pjena [1]	7
Tablica 3. Masa, relativna gustoća i poroznost uzoraka.....	38
Tablica 4. Vrijednosti maksimalne sile i progiba.....	42
Tablica 5. Savojna čvrstoća i rad utrošen za kidanje uzoraka.....	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
a	mm	Udaljenost između točaka pritiska
b	mm	Širina uzorka
C_p	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet
E	GPa	Modul elastičnosti
E_f	GPa	Modul savitljivosti
F	N, kN	Sila
F_{max}	N, kN	Maksimalna sila
G	GPa	Modul smičnosti
h	mm	Visina uzorka
H	/	Tvrdoća
K_{IC}	MPa·m ^{1/2}	Lomna žilavost
l	mm	Razmak između oslonaca
L	mm	Dužina uzorka
L_1	kJ/kg	Latentna toplina taljenja
m	kg, g	Masa
m_{pjene}	kg, g	Masa pjene
r	mm	Polumjer uzorka
R	10 ⁻⁸ Ωm	Električni otpor
R_d	MPa	Dinamička izdržljivost
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
R_{ms}	MPa	Savojna čvrstoća
R_{mt}	MPa	Tlačna čvrstoća
S	%	Promjena specifične krutosti
T_m	K	Talište
T_{max}	K	Maksimalna radna temperatura
T_{min}	K	Minimalna radna temperatura
V_{kalupa}	m ³	Volumen kalupa
w	mm	Progib
W	mm ³	Moment otpora
W_k	J	Rad utrošen za kidanje uzoraka
W_v	J	Apsorbirana energija
α	10 ⁻⁶ /K	Toplinska rastezljivost
ε	%, mm/mm	Deformacija
ε_D	%, mm/mm	Deformacija pri zgušćivanju
ε_f	%, mm/mm	Vlačna duktilnost
η	%	Faktor gubitka
λ	W/mK	Toplinska vodljivost

ν	/	Poissonov faktor
v_{op}	mm/min	Brzina opterećivanja
ρ	kg/m ³	Gustoća
ρ_{Al}	kg/m ³	Gustoća aluminija
ρ_{metala}	kg/m ³	Gustoća metala
ρ_{pjene}	kg/m ³	Gustoća pjene
ρ_{rel}	%	Relativna gustoća
ρ_s	kg/m ³	Gustoća osnovnog materijala
σ	N/mm ²	Naprezanje
σ_{pl}	N/mm ²	Naprezanje na kraju platoa

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
MMC	Kompoziti s metalnom matricom

SAŽETAK

U ovom radu je ispitivano kako se mijenja savojna čvrstoća „Alulight“ pjena s promjenom poroznosti. Uzorci su pripremljeni od 85 g gotovog prekursora (AlSi10 + 0,8 % TiH₂ – aluminijska legura s 0,8 % TiH₂ agensa za upjenjivanje), a upjenjeni su u elektrootpornoj zvonastoj peći pri temperaturi 750 °C u vremenskom trajanju od 15 min. Upjenjeni uzorci su različite relativne gustoće zbog činjenice da je masa rastaljenog aluminijskog isteklog iz kalupa kod svakog pjenjenja bila drugačija. Time su ostvarene poroznosti koje su varirale od minimalne 71 % do maksimalne 76 %. Na gotovim uzorcima je napravljeno ispitivanje savijanjem u tri točke na univerzalnoj kralnici pri čemu su praćene vrijednosti sile i progiba.

Ključne riječi: Metalne pjene, aluminijske pjene, Alulight, savojna čvrstoća, poroznost

SUMMARY

In this thesis, it was analysed how the change in porosity of “Alulight” foam affects the flexural strength. The samples were prepared from 85 g of premade precursor (AlSi10 + 0.8 % TiH₂ – aluminum alloy with added 0.8 % of foaming agent TiH₂), and they were foamed in an electric resistance bell furnace at 750 °C for 15 minutes. The samples are of different porosity because the mass of aluminum that escaped from the mould during the foaming process was different for each sample. The resulting porosities range from a minimum of 71 % to a maximum of 76 %. Lastly, the three point bending test was conducted upon the samples on a universal testing machine, during which the force and the deflection were monitored.

Key words: Metal foams, Aluminum foams, Alulight, flexural strength, porosity

1. UVOD

Napretkom tehnologije proizlazi potreba za laganim materijalima koji imaju zadovoljavajuća mehanička, toplinska i druga svojstva. Na primjer, u zrakoplovnoj industriji, jedan od najčešćih materijala je aluminij zbog svojih vrhunskih svojstava, a male gustoće.

S obzirom na činjenicu da se ljudski rod napokon počeo baviti problematikom globalnog zatopljenja, za očekivati je da će se potražnja za materijalima niske gustoće višestruko povećati, zato što bi se korištenjem istih mogao povećati domet prijevoznih sredstava na električni pogon. Jedan od takvih materijala su i metalne pjene.

Metalne pjene se često nazivaju „novom tehnologijom“ [1], no prvi put su spomenute još 1925., u patentu kojeg je objavio De Meller. [2] Iako su njegove ideje bile slične današnjem procesu proizvodnje metalnih pjena, nedostajao mu je jedan ključni korak, a to je stabilizacija mjehurića plina. Taj problem je riješen kasnih 1960-ih u Ethyl korporaciji, te 1970-ih počinju s proizvodnjom metalnih pjena. Jedna od primjena koje su predložili su automobilski branici od aluminijske pjene za apsorpciju udarne energije. [2] Slika 1 prikazuje kako su izgledali prvi proizvodi od metalnih pjena.



Slika 1. Blokovi od aluminijske pjene proizvedeni u Ethyl korporaciji [2]

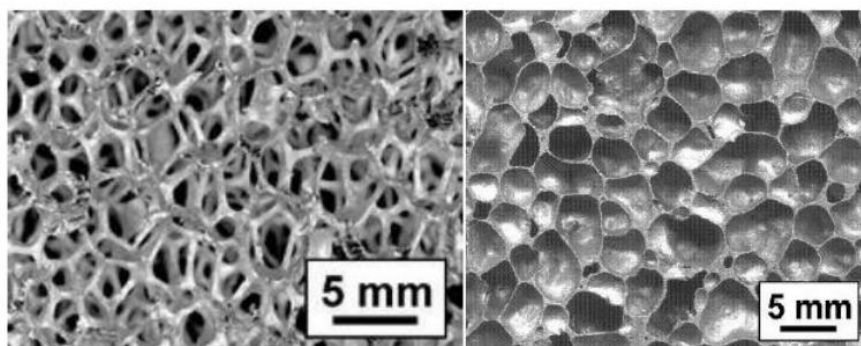
Tehnologija proizvodnje metalnih pjena se nastavila razvijati, ali danas se zbog relativno visoke cijene proizvodnje koriste samo u određenim nišama gdje cijena materijala nije toliko bitna, no daljnjim razvojem ova vrsta materijala mogla bi doživjeti puno širu primjenu.

2. METALNE PJENE

2.1. Općenito o metalnim pjenama

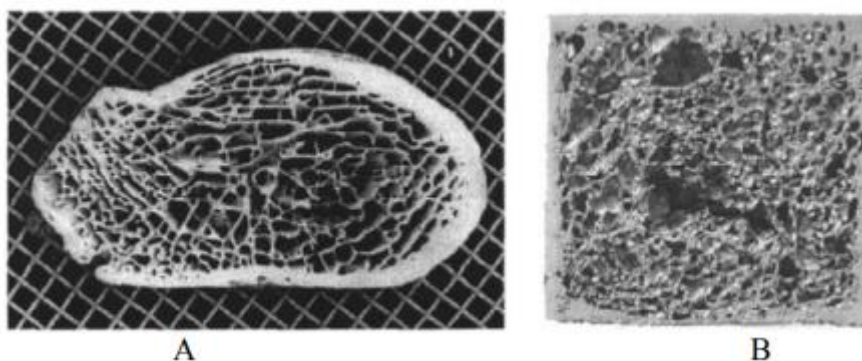
Metalne pjene su definirane kao mješavina plina i čvrstog metala. Taj plin formira ćelije (otvorene ili zatvorene), te uzrokuje visoku poroznost materijala (40-90 %) što uz vrstu osnovnog materijala definira mehanička, toplinska, akustična i druga svojstva pjene. [1]

Oblik ćelija proizlazi iz proizvodnog postupka, a oni će biti obrađeni u narednim poglavljima. Metalne pjene s otvorenim ćelijama u pravilu pokazuju veću duktilnost od onih sa zatvorenim ćelijama [3]. Slika 2 pokazuje razliku između otvorenih i zatvorenih ćelija pod mikroskopom.



Slika 2. Metalne pjene s otvorenim ćelijama (lijevo) i zatvorenim ćelijama (desno) [4]

Metalne pjene svojom strukturom oponašaju prirodne ćelijaste materijale, kao što su kosti, drvo i koralji. Slika 3 pokazuje sličnost u strukturi kosti i metalne pjene.



Slika 3. Struktura kosti (A) i metalne pjene (B) [1]

2.2. Česticama ojačane metalne pjene

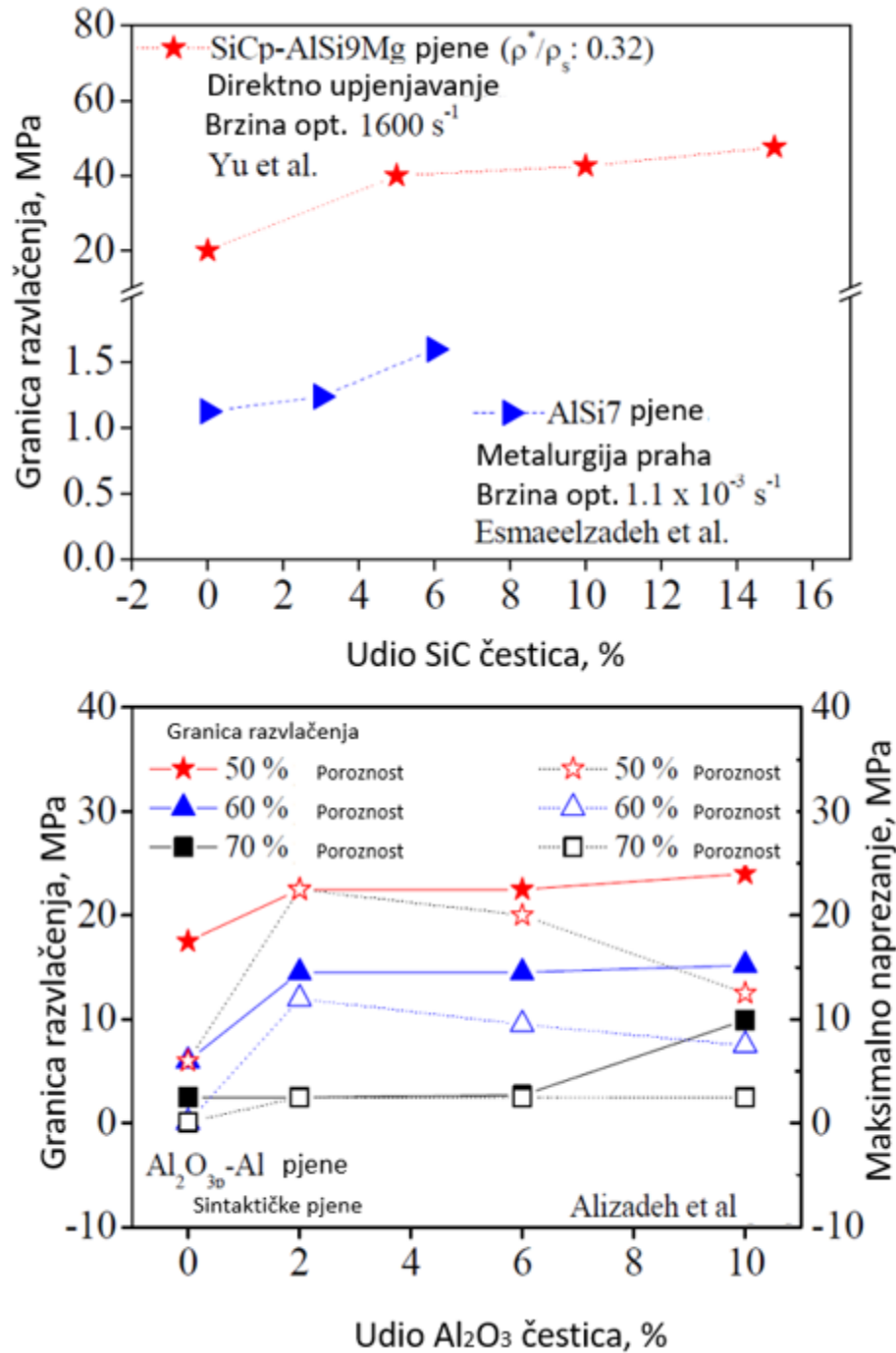
U početku, mikro-čestice keramike koristile su se za stabiliziranje pjena i kako bi se izbjeglo urušavanje formirane ćelijaste strukture. Te čestice povećavaju viskoznost taline, što omogućava formiranje stabilne pjene. Naravno, čestice keramike također utječu i na svojstva pjene, te se uvidjelo da one smanjuju duktilnost i povećavaju tvrdoću konačnog produkta, što je utjecalo na mogućnost obrade odvajanjem čestica te je limitiralo upotrebu prvih metalnih pjena. [5] Keramičke čestice se i danas koriste za stabilizaciju pjena u nekim procesima [6], no sve se više istražuje kako bi se čestice mogle koristiti za poboljšanje mehaničkih svojstava pjena.

Glavni problem na koji se nailazi je činjenica da čestice keramike u pjenama nisu uniformno raspršene po cijelom volumenu, već formiraju nakupine i stvaraju različite spojeve koji povećavaju viskoznost taline. Nije još u potpunosti poznato utječu li ti kemijski produkti pozitivno na stabilnost pjene. Neki radovi upućuju na to da utječu pozitivno, a drugi pokazuju da su oksidi najbitniji za postizanje stabilnosti [5].

Na činjenica jest da vrlo male čestice keramike pozitivno utječu na neka mehanička svojstva. Na primjer, dokazano je da je granica razvlačenja veća kod pjena ojačanih sitnim keramičkim česticama. [5] Slika 4 prikazuje dijagrame koji to potvrđuju.

Osim granice razvlačenja, dokazano je da čestice aluminijevog oksida (Al_2O_3) pozitivno utječu na vatrootpornost te povećavaju toplinski kapacitet metalnih pjena [1].

Za zaključiti je stoga da je potrebno pomno birati kada se isplati ojačavati metalne pjene česticama, a kada ne. Na primjer, ukoliko se bira materijal za neku laku nosivu konstrukciju, bolje je izabrati neojačanu metalnu pjenu jer je duktilnija, odnosno, moći će podnijeti veću plastičnu deformaciju od pjene ojačane keramičkim česticama. No ukoliko je potrebna na primjer veća tvrdoća ili vatrootpornost, a duktilnost nije presudna, onda je bolje odabrati metalnu pjenu ojačanu keramičkim česticama.



Slika 4. Ovisnost granice razvlačenja o udjelu keramičkih čestica [5]

2.3. Svojstva metalnih pjena

Zbog kompleksnosti i velikih razlika u mikrostrukтури, svojstva metalnih pjena dosta je teško ispitati. Nažalost, rezultati ispitivanja često znaju varirati i do nekoliko desetaka posto, što smanjuje povjerenje u ovu vrstu materijala. Stoga se postupci ispitivanja i dalje razvijaju, te imaju puno strože režime.[1] Tablica 1 prikazuje izraze za računanje svojstava metalnih pjena. Na prvi pogled odmah se može uočiti da neka svojstva ovise o tome radi li se o pjenama s otvorenim ili zatvorenim ćelijama.

Tablica 1. Izrazi za računanje svojstava metalnih pjena [1]

Mehaničko svojstvo	Otvorene ćelije	Zatvorene ćelije
Modul elastičnosti, (GPa), E	$E = (0,1-4) \cdot E_s \cdot (\rho/\rho_s)^2$	$E = (0,1-1) \cdot E_s \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^2 + 0,3(\rho/\rho_s))$
Modul smičnosti, (GPa), G	$G \approx (3/8) \cdot E$	
Modul savitljivosti, (GPa), E_f	$E_f \approx E$	
Tlačna čvrstoća, (MPa), R_{mt}	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{ms} \cdot (\rho/\rho_s)^{3/2}$	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{ms} \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^{2/3} + 0,3(\rho/\rho_s))$
Vlačna čvrstoća, (MPa), R_m	$R_m \approx (1,1-1,4) \cdot R_{mt}$	
Dinamička izd., (MPa), R_d	$R_d \approx (0,5-0,75) \cdot R_{mt}$	
Deform. pri zgušćivanju, ε_D	$\varepsilon_D = (0,9-1) \cdot (1-1,4\rho/\rho_s + 0,4(\rho/\rho_s)^3)$	
Koeficijent gubitka, η	$\eta \approx (0,95-1,05) \cdot \eta_s / (\rho/\rho_s)$	
Tvrdoća, H	$H = R_{mt} \cdot (1+2\rho/\rho_s)$	
Topl. vodljivost, (W/mK), λ	$(\rho/\rho_s)^{1,8} < (\rho/\rho_s)^{1,65}$	
El. otpor, ($10^{-8} \Omega m$), R	$(\rho/\rho_s)^{-1,6} < (\rho/\rho_s)^{-1,85}$	

*Indeks „s“ pokazuje da se svojstvo odnosi na osnovni materijal

Tablica 2 navodi svojstva nekih komercijalno dostupnih metalnih pjena.

Tablica 2. Svojstva nekih komercijalno dostupnih metalnih pjena [1]

Svojstvo,(jedinica),simbol	<i>Cymat</i>	<i>Alulight</i>	<i>Alporas</i>	<i>ERG</i>	<i>INCO</i>
Materijal	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Relativna gustoća, ρ/ρ_s	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Modul elastičnosti, (GPa), E	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Struktura, (Tip ćelije)	Zatvorene			Otvorene	
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, ν	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	1,9-3,5	1,0-2,4
Din. 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 zgušćivanju, ε_D	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačno istezanje, (-), ε_f	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka, (%), η	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
Tvrdoća, H	0,05-10	2,4-35	2,0-22	2,0-3,5	0,6-1,0
Lomna žilavost, (MPa·m ^{1/2}), 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
Max. radna temp., (K), T_{max}	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Min. radna temp., (K), T_{min}	1-2				
Specif. topl. kapacitet,(J/kgK), C_p	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Toplinska vodljivost, (W/mK), λ	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Topl. rastezljivost,(10 ⁻⁶ /K), α	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 ⁻⁸ Ωm), R	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500

2.3.1. Vatrootpornost

Postoje dvije vrste stradavanja koje uzrokuje vatra, a to su toplinsko i strukturno stradavanje. Toplinsko stradavanje nastupa u trenutku kada pjena izgubi izolacijski kapacitet, a strukturno stradavanje u trenutku kada pjena izgubi nosivost. Aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama ojačane Al_2O_3 pokazale su se iznimno vatrootpornima, a komercijalno dostupna pjena Alporas testirana je po njemačkim standardima i proglašena je vatrootpornom. [1]

2.3.2. Prigušenje vibracija

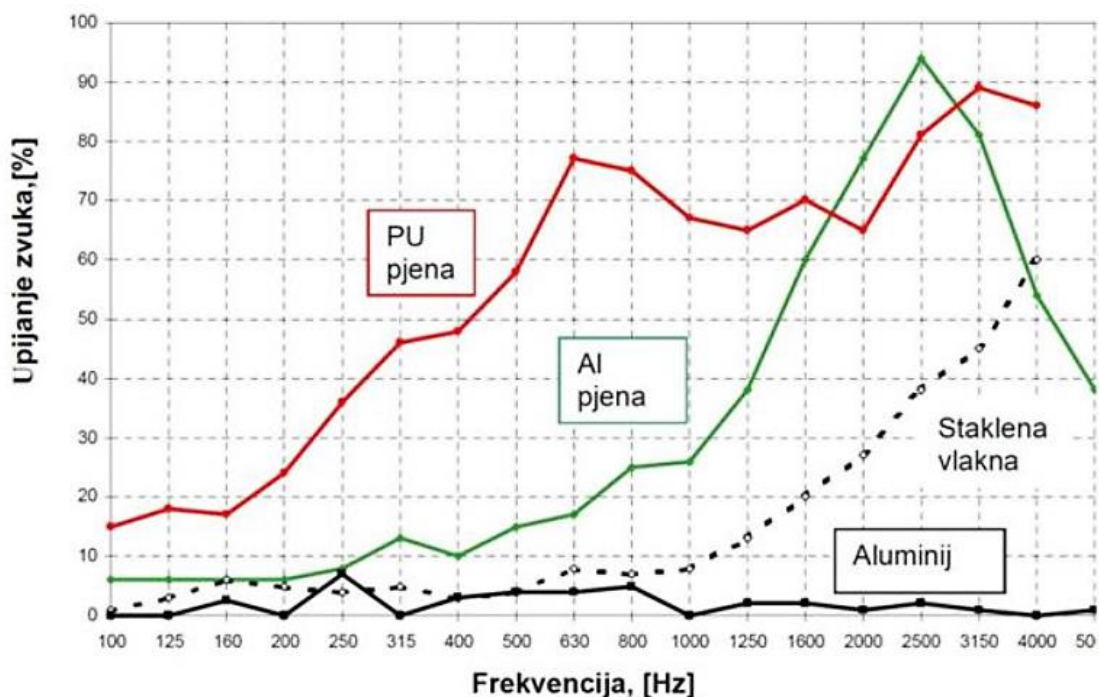
Ovo svojstvo je izuzetno važno za dijelove konstrukcija koji su izloženi djelovanju vibracija. Ispitivanje se vrši tako da se uzorak materijala podvrgne vanjskom izvoru vibracija, te se promatra ponašanje materijala u rezonanci nakon prestanka rada izvora vibracija. Problem s ispitivanjem događa se zbog nehomogenosti strukture, a na rezultate utječu poroznost strukture, veličina i tip ćelija, obrada samog uzorka itd. [1]

2.3.3. Akustična svojstva

Metalne pjene imaju vrlo dobra akustična svojstva zbog svoje porozne strukture, što im omogućava da apsorbiraju jako veliku količinu energije. Pjene s otvorenim tipom ćelija imaju najbolju mogućnost apsorpcije zvuka. Prednosti Alporas pjene nad staklenom vunom (koja se često koristi kao zvučni izolator) su sljedeće [1]:

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora ustabiliti s metalnom armaturom što nije slučaj kod Alporas pjene;
- vlakna staklene vune mogu biti uništena pod utjecajem vibracija i vjetra;
- staklena vuna pod utjecajem visoke temperature oslobađa otrovne plinove;
- staklena vuna puno brže upija vlagu;
- Alporas pjena se puno lakše montira zbog svoje vrlo male mase.

Slika 5 pokazuje usporedbu akustičnih svojstava nekih čestih izolatora i aluminijske pjene.



Slika 5. Upijanje zvuka PU pjena, Al pjena, staklenih vlakana i aluminija [7]

2.3.4. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost materijala je svojstvo koje pokazuje izolacijske sposobnosti materijala. S obzirom na činjenicu da čisti aluminij ima koeficijent toplinske vodljivosti (λ) 150-220 W/mK, a iz tablice 2 je vidljivo da se kod aluminijskih pjena λ kreće od 0,2 W/mK do 11 W/mK, te da nemetalni materijali imaju λ oko 3 W/mK, za zaključiti je da bi aluminijske pjene mogle biti vrlo dobar toplinski izolator. Parametri koji utječu na prijenos topline su: morfologija ćelija, relativna gustoća, koeficijent toplinske vodljivosti, emisivnost itd. [1]

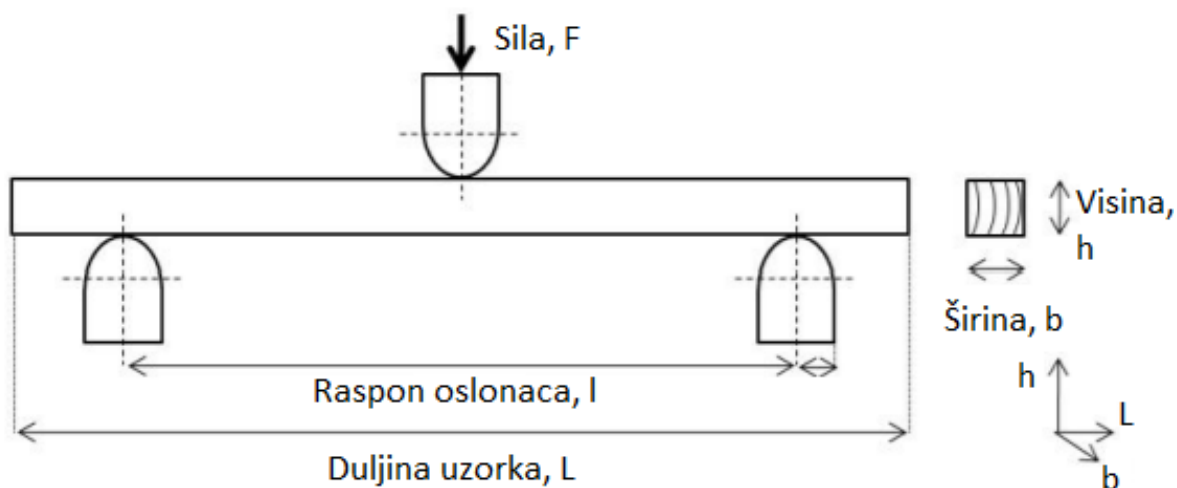
2.3.5. Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća je definirana kao sila koja uzrokuje pucanje uzorka pri ispitivanju savijanjem. U praksi, ona pokazuje nosivost materijala pri djelovanju savojnog opterećenja. [8]

Savojna čvrstoća može se ispitati na nekoliko načina, no najčešće se koriste ispitivanje savijanjem u tri točke i ispitivanje savijanjem u četiri točke. Važno je napomenuti da nije moguće uspoređivati rezultate dobivene različitim metodama. [8]

2.3.5.1. Ispitivanje savijanjem u tri točke

Ovo ispitivanje se provodi na univerzalnoj kidalici. Glavna prednost je jednostavnost pripreme uzoraka, no rezultati ispitivanja ovise o geometriji uzoraka, te ovo ispitivanje uglavnom pokazuje niže vrijednosti modula elastičnosti nego ispitivanje savijanjem u četiri točke. [8] Slika 6 pokazuje shemu ispitivanja savijanjem u tri točke.



Slika 6. Shema ispitivanja savijanjem u tri točke [8]

Na slici 6 vidljive su sve potrebne veličine za izračunavanje savojne čvrstoće pravokutnog uzorka koja se računa prema sljedećem izrazu [9]:

$$R_{ms} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2}, \quad \text{N/mm}^2 \quad (1)$$

gdje je:

R_{ms} – savojna čvrstoća, N/mm^2

F_{\max} – sila loma uzorka, N

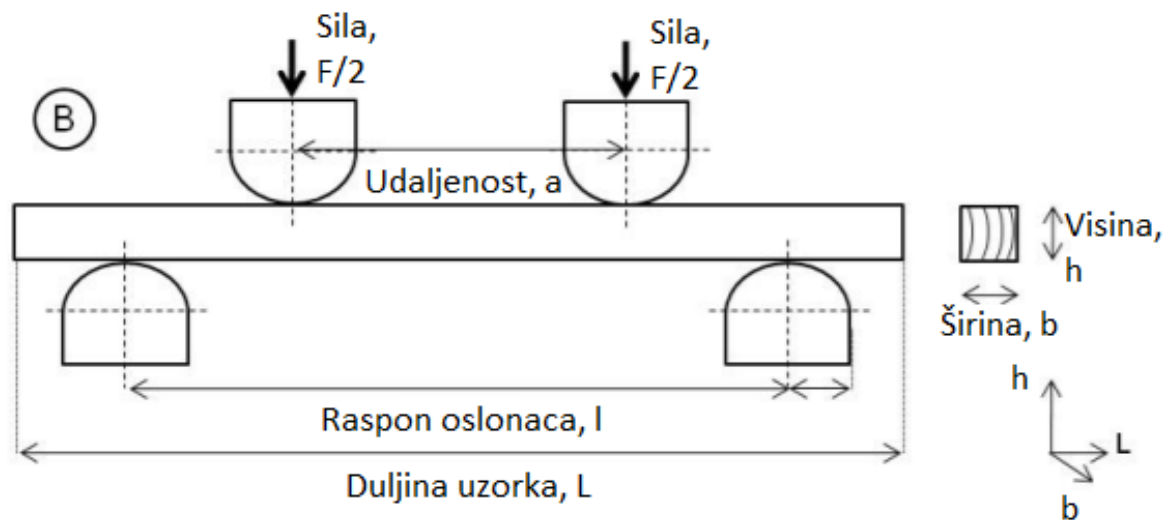
l – raspon oslonaca, mm

b – širina uzorka, mm

h – visina uzorka, mm

2.3.5.2. Ispitivanje savijanjem u četiri točke

Slika 7 prikazuje shemu ispitivanja savijanjem u četiri točke.



Slika 7. Shema ispitivanja savijanjem u četiri točke [8]

Na slici 7 prikazane su karakteristične veličine za izračunavanje savojne čvrstoće u četiri točke uzorka pravokutnog presjeka sukladno jednadžbi [8]:

$$R_{ms} = \frac{F_{\max} \cdot (l - a)}{4} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2}, \quad \text{N/mm}^2 \quad (2)$$

Gdje je:

R_{ms} – savojna čvrstoća, N/mm^2

F_{\max} – sila loma uzorka, N

a – udaljenost između točaka pritiska, mm

l – raspon oslonaca, mm

b – širina uzorka, mm

h – visina uzorka, mm

2.3.6. *Relativna gustoća metalnih pjena*

Relativna gustoća je definirana kao omjer gustoće materijala i neke reference. U slučaju metalnih pjena, referenca je gustoća osnovnog metala. [1] Izraz za izračun relativne gustoće metalne pjene je sljedeći [10]:

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho_{\text{pjene}}}{\rho_{\text{metala}}} \quad (3)$$

Gdje je:

ρ_{rel} – relativna gustoća

ρ_{pjene} – gustoća pjene, kg/m^3

ρ_{metala} – gustoća metala stijenke ćelije, kg/m^3

Relativna gustoća je bezdimenzijska veličina, a kod metalnih pjena ovo svojstvo se može regulirati u samom procesu proizvodnje, te utječe više-manje na sva druga svojstva metalnih pjena. U eksperimentalnom dijelu ovoga rada tako će se primjerice istražiti kako relativna gustoća utječe na savojnu čvrstoću. U tablici 2 vidljive su relativne gustoće nekih najčešćih metalnih pjena.

2.3.7. *Usporedba svojstava metalnih pjena s ostalim ćelijastim materijalima*

Kako bi se postigla kompetitivnost na tržištu, nova vrsta materijala mora pružati „nešto više“ od konvencionalnih materijala koji se koriste u iste svrhe. Iz tog razloga korisno je pogledati usporedbu svojstava metalnih pjena sa sličnim materijalima, drvom i polimernim pjenama.

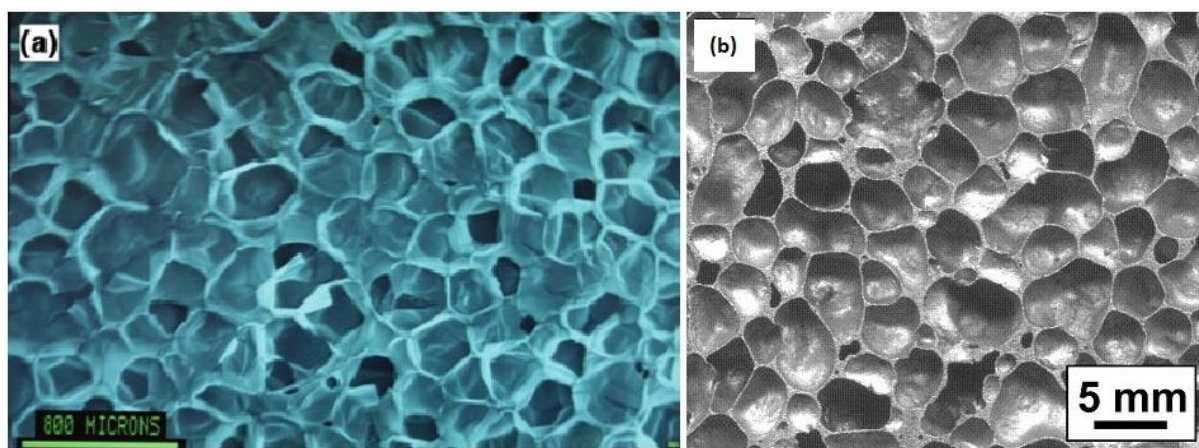
2.3.7.1. *Polimerna pjena*

Polimerne pjene su materijali sa saćastom mikrostrukturom, a uglavnom se proizvode na bazi polipropilena, poliuretana, polistirena i polietilena. Polimerne pjene također imaju dva tipa ćelija, otvorene i zatvorene. Pjene s otvorenim ćelijama su savitljive te se uglavnom koriste za proizvodnju namještaja, a pjene sa zatvorenim ćelijama se najčešće koriste za toplinsku izolaciju (najpoznatija je PUR pjena).[1]

Ako se usporede svojstva polimernih pjena i metalnih pjena, proizlazi sljedeće [1]:

- polimerne pjene imaju puno manju gustoću od metalnih pjena (10-ak puta nižu),
- metalne pjene imaju puno bolja mehanička svojstva od polimernih pjena, pogotovo na povišenim temperaturama,
- metalne pjene su toplinski stabilnije i mogu se koristiti pri znatno višim temperaturama,
- polimerne pjene imaju nešto bolja svojstva toplinske izolacije,
- metalne pjene imaju puno bolju vatrootpornost,
- polimerne pjene imaju puno razvijenije procese proizvodnje, jer su bolje istraženi materijali,
- polimerne pjene su jeftinije od metalnih.

Dakle, iz navedenog proizlazi da bi metalne pjene u budućnosti mogle preuzeti neke primjene polimernih pjena, ali pod uvjetom da se smanje troškovi proizvodnje i cijena osnovnog materijala. Polimerne pjene su jedan od najpoznatijih toplinskih izolatora, ali im je veliki nedostatak u tom pogledu činjenica da nisu vatrootporne. Razlika u koeficijentu toplinske vodljivosti između najgore polimerne pjene i najbolje metalne pjene nije velika (0,12 W/mK kod polimerne pjene i 0,2 W/mK kod metalne), stoga bi se u nekim slučajevima gdje je vatrootpornost bitna ubuduće mogle početi koristiti metalne pjene za izolaciju. Slika 8 pokazuje usporedbu struktura PUR pjene sa zatvorenim ćelijama i metalne pjene sa zatvorenim ćelijama.



Slika 8. Pjene sa zatvorenim ćelijama: a) PUR pjena [11]; b) metalna pjena [4]

2.3.7.2. Drvo

Drvo je prirodni kompozitni materijal porozne mikrostrukture koji je kroz povijest jedan od najzastupljenijih materijala. Može se reći da je ideja za sve upjenjene materijale došla upravo od drva. Drvo i danas ima izrazito široku primjenu, te je stoga dobro usporediti svojstva drva i metalnih pjena kako bi se vidjelo postoje li neke primjene gdje bi metalne pjene možda u budućnosti mogle istisnuti drvo.

Usporedbom svojstava drva i metalnih pjena može se uvidjeti sljedeće [1]:

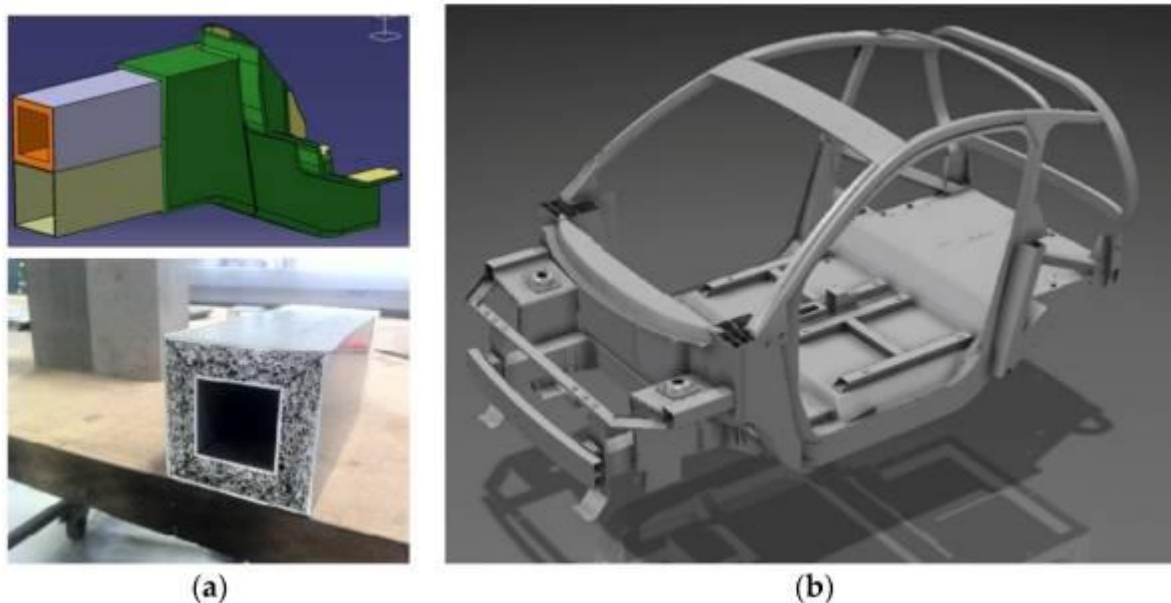
- metalne pjene imaju do 3 puta manju gustoću od drvnih vrsta, što znači da će konstrukcije od metalnih pjena biti lakše,
- drvo je anizotropan materijal, odnosno nema ista svojstva u smjeru vlakana i okomito na smjer vlakana. U smjeru vlakana drvo ima nešto bolja mehanička svojstva od metalnih pjena, a u smjeru okomitom na vlakna metalne pjene su bolje od drveta,
- metalne pjene se mogu koristiti na puno višim temperaturama nego drvo,
- drvo je izvrstan električni i toplinski izolator,
- drvo ima puno lošiju vatrootpornost od metalnih pjena. Također, drvo je puno sklonije propadanju zbog vlage i agresivnih medija,
- drvo je dimenzijski nestabilno,
- drvo je puno jeftinije od metalnih pjena.

Zaključak je ovdje sličan kao i kod polimernih pjena. Ukoliko se smanji cijena metalnih pjena, mogle bi se koristiti kao zamjena za drvo u onim slučajevima kada se zahtijeva vatrootpornost materijala. Na primjer, u SAD-u je drvo i dalje dominantni materijal za konstrukciju kuća, te podaci iz 2019. pokazuju da je čak 90 % domova u SAD-u napravljeno s drvenim okvirima [12].

S obzirom na činjenicu da su danas sve izraženiji šumski požari, neke procjene govore da bi se u SAD-u uskoro mogle graditi kuće i od drugih materijala, a jedan od njih svakako bi mogle biti metalne pjene u nosećim konstrukcijskim elementima.

2.4. Primjena metalnih pjena

Metalne pjene su još uvijek relativno skup materijal, što limitira široku komercijalnu primjenu. Međutim, pokazalo se da one eliminiraju osnovne probleme klasičnih čelijastih materijala budući da su savitljive, odlično podnose visoke temperature, a mogu se i reciklirati. Također, metalne pjene pružaju multifunkcionalnost koju drugi slični materijali ne mogu pružiti, npr., u isto vrijeme mogu prigušivati vibracije i služiti za apsorpciju udara kod ultra-laganih električnih automobila. Slika 9 prikazuje jedan koncept kako bi u budućnosti to moglo izgledati.



Slika 9. Element za apsorpciju udara (a) i CAD model konstrukcije automobila (b) [13]

Osim toga, ponekad cijena nije bitna, već se prednost daje estetici, pa metalne pjene mogu poslužiti kao nosive konstrukcije, ili ukrasni elementi u arhitekturi [13]. Slika 10 prikazuje dva takva primjera.



Slika 10. Stropovi od metalnih pjena [13]

Također, metalne pjene su zbog svoje dobre otpornosti na visoke temperature i dobre kemijske postojanosti, uz dobra svojstva prigušenja buke, te mogućnosti izrade strukture s vrlo sitnim otvorenim ćelijama pronašle upotrebu u izradi filtera, prigušivača i sličnih funkcionalnih proizvoda u kemijskoj i autoindustriji. Neki od tih proizvoda predloženi su slikom 11.



Slika 11. Funkcionalni proizvodi (filteri, prigušivači) napravljeni od metalnih pjena[13]

Metalne pjene imaju veliku aktivnu površinu i vrlo dobru toplinsku vodljivost, što ih čini odličnim materijalom za izradu izmjenjivača topline. Za izmjenjivače se najčešće koriste pjene s otvorenim ćelijama na bazi aluminija ili bakra, slika 12 [13]



Slika 12. Izmjenjivači topline od metalnih pjena [13]

Ovo su samo neki od primjera primjene, te je za očekivati da će se masovnija uporaba započeti smanjenjem troškova izrade takvih izmjenjivača topline.

2.5. Proizvodnja metalnih pjena

Proizvodni procesi za izradu metalnih pjena mogu se podijeliti na nekoliko načina, no najjednostavnije ih je klasificirati po stanju u kojem se metal nalazi prije početka proizvodnje. Procese tako možemo podijeliti na sljedeće tri skupine prema polaznom stanju materijala [6]:

- rastaljeni metal,
- metalni prah,
- ionizirani metal.

Nadalje, svaka od ovih kategorija sadrži nekoliko različitih procesa proizvodnje koji će biti opisani u nastavku ovog rada.

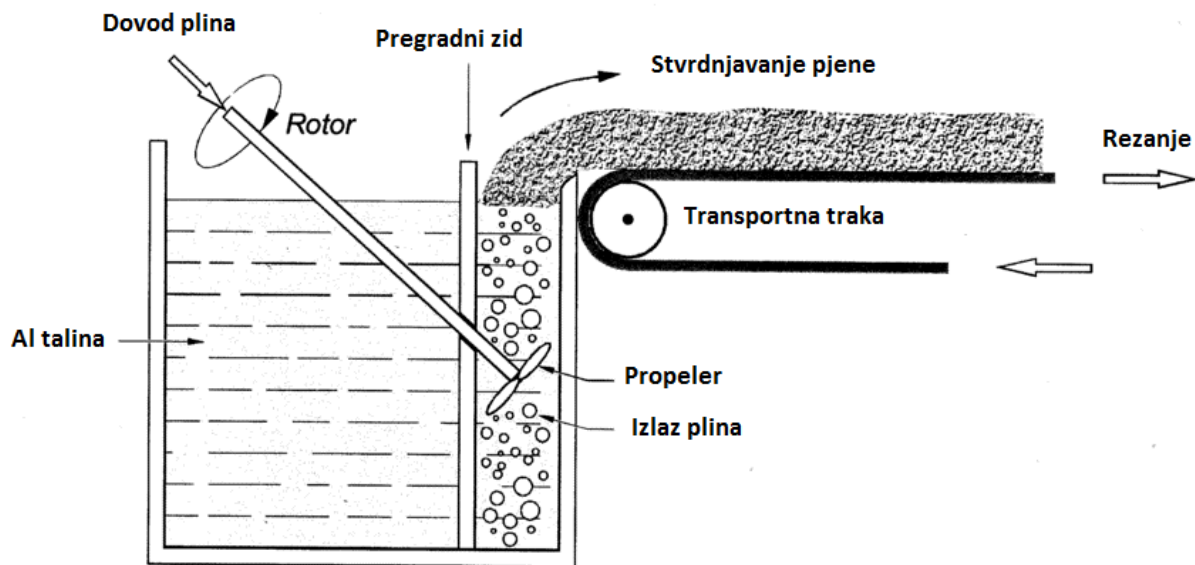
2.5.1. Proizvodnja metalnih pjena iz rastaljenog metala

Pjene se proizvode iz rastaljenog metala, a porozna struktura postiže se direktnim upjenjivanjem, indirektnim upjenjivanjem uz pomoć polimerne pjene, ili lijevanjem tekućeg metala oko drugih materijala koji osiguravaju mjesta za pore (ćelije), te se tako formira struktura pjene.

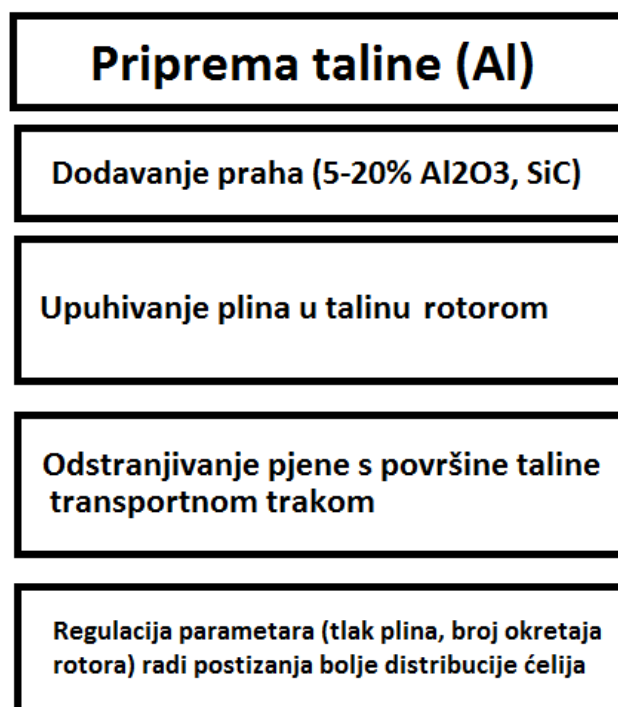
2.5.1.1. Direktno upjenjivanje

Direktno upjenjivanje postiže se upuhivanjem plina u rastaljeni metal pod određenim uvjetima. U normalnim slučajevima, mjehurići upuhanog plina bi se vrlo brzo dizali prema površini rastaljenog metala, te se ne bi postigla porozna struktura. Međutim, „bježanje“ mjehurića može se spriječiti smanjenjem viskoznosti taline dodavanjem finog keramičkog praha ili legirnih elemenata metalu. [6]

Trenutno su dostupna dva procesa za direktno upjenjivanje taline. Prvi se koristi za proizvodnju pretežito aluminijevih pjena, a za smanjenje viskoznosti taline koristi se fini prah silicijevog karbida (SiC) ili aluminijevog oksida (Al_2O_3). Plin (argon, zrak ili dušik) upuhuje se u talinu pomoću rotora, te se na površini stvara pjena koja se uz pomoć transportne trake odvaja od taline, slika 13. Tako se stvara pločasti oblik materijala debljine do 10 cm. Ovaj proces omogućuje proizvodnju kompozita s metalnom matricom (MMC).[6] Na slici 14 prikazane su osnovne faze ovog procesa.



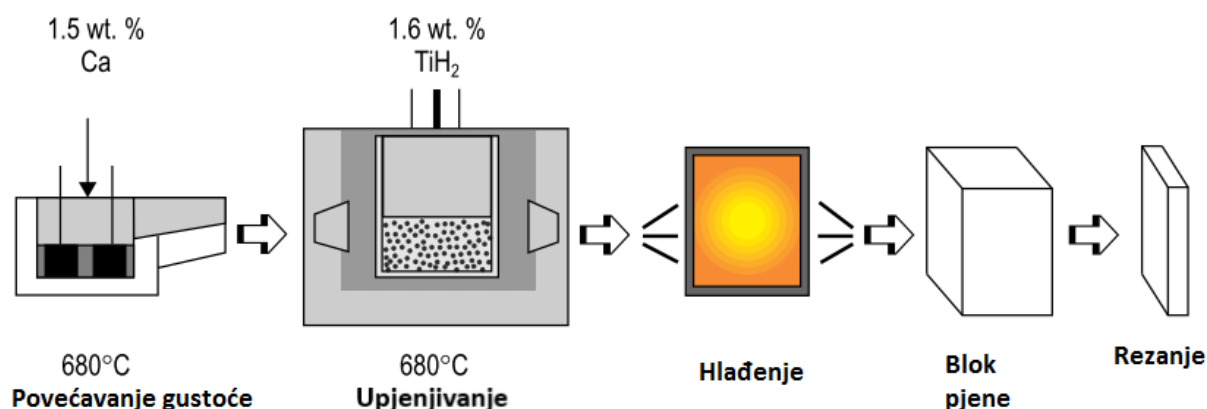
Slika 13. Shematski prikaz procesa direktnog upjenjivanja [14]



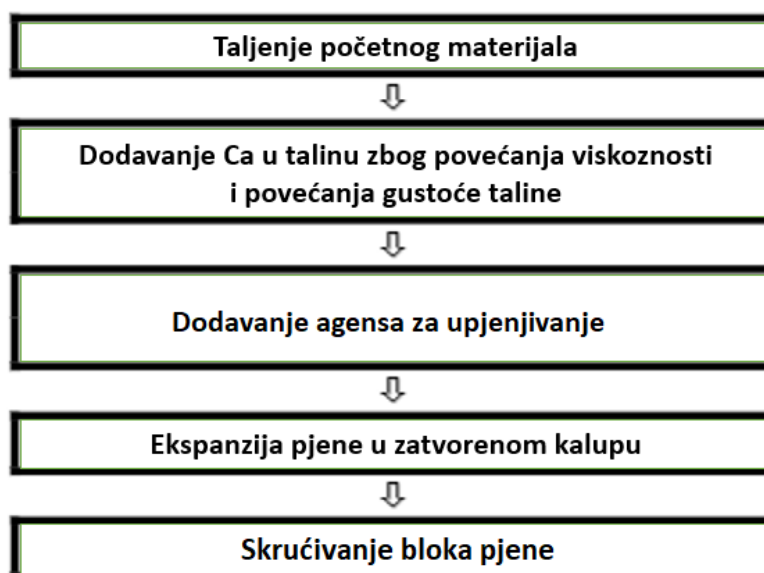
Slika 14. Faze postupka direktnog upjenjivanja (MMC pjene) [6]

Ovo je najjeftiniji način proizvodnje metalnih pjena, a čestice keramike povećavaju tvrdoću. Glavni problem nastaje kod oblikovanja i rezanja pjene zbog povišene krhkosti i tvrdoće.

Drugi proces za direktno upjenjivanje taline je uz dodatak agensa za upjenjivanje umjesto upuhivanja plina, a naziva se „ALPORAS“ proces. Agens se pod povišenom temperaturom tali i otpušta plin koji potiče upjenjivanje. U jednoj varijanti ovog procesa viskoznost taline povećava kalcij, a agens za upjenjivanje je TiH_2 . Ovim procesom uglavnom se proizvode pjene dimenzija 2000 mm x 1000 mm x 600 mm, te se naknadno režu na željenu debljinu (najčešće 10 mm) [6]. Slika 15 prikazuje shemu „ALPORAS“ procesa, a slika 16 faze ovog procesa.



Slika 15. Shematski prikaz „ALPORAS“ procesa [15]

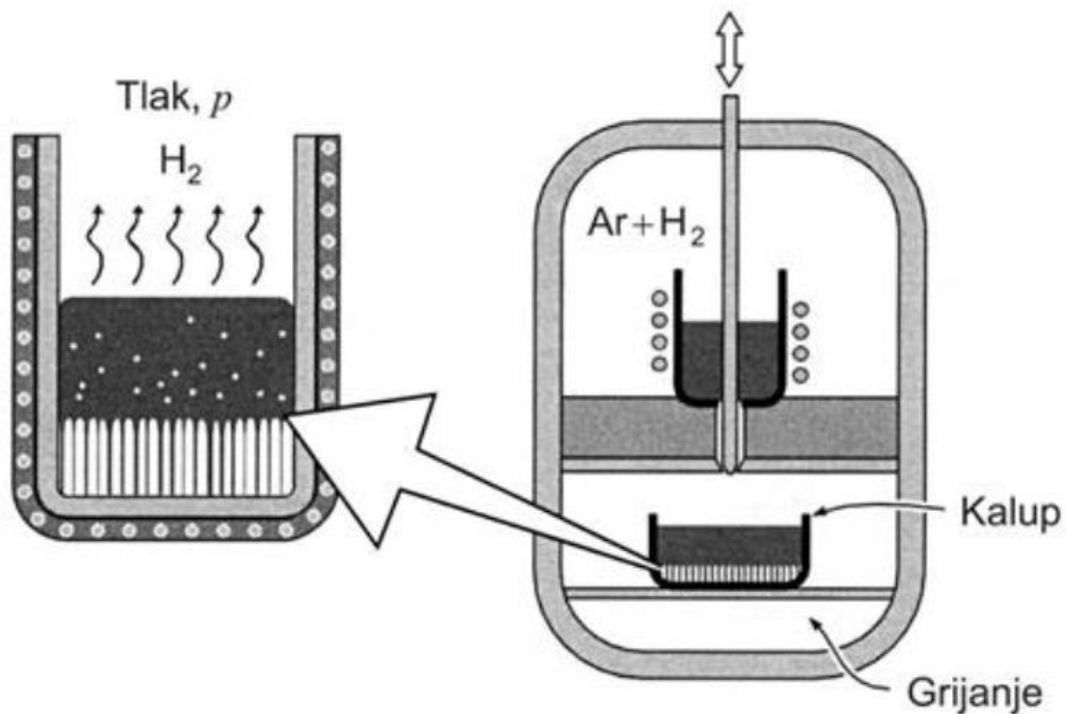


Slika 16. Faze „ALPORAS“ procesa proizvodnje pjena [6]

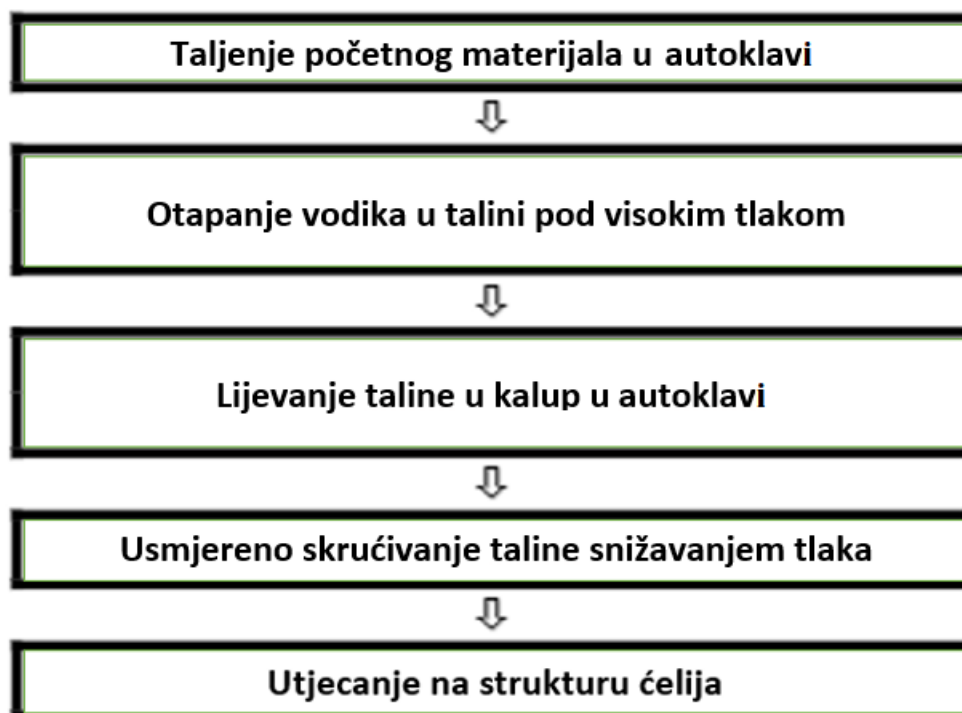
Pjene proizvedene „ALPORAS“ procesom uglavnom su skuplje od pjena proizvedenih upuhivanjem plina i imaju poprilično ravnomjerno raspoređene ćelije.

2.5.1.2. Eutektičko skrućivanje krutina – plin

Ovaj proces iskorištava pojavu pri kojoj metali stvaraju eutektički sustav s vodikom. Prvo je potrebno pripremiti talinu jednog od metala (Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn i Ni) s otopljenim vodikom pod visokim tlakom (50 atm.). Smanjenjem temperature ispod eutektičke talina prolazi eutektičku reakciju u heterogeni dvofazni sustav krutina + plin. Ukoliko se dobro odrede parametri procesa (brzina hlađenja i tlak), u talini se formiraju sitni mjehurići plina, te se tako stvara pjena. [6] Slika 17 prikazuje shemu procesa eutektičkog skrućivanja čije su faze navedene na slici 18.



Slika 17. Shema procesa eutektičkog skrućivanja krutina-plin [7]

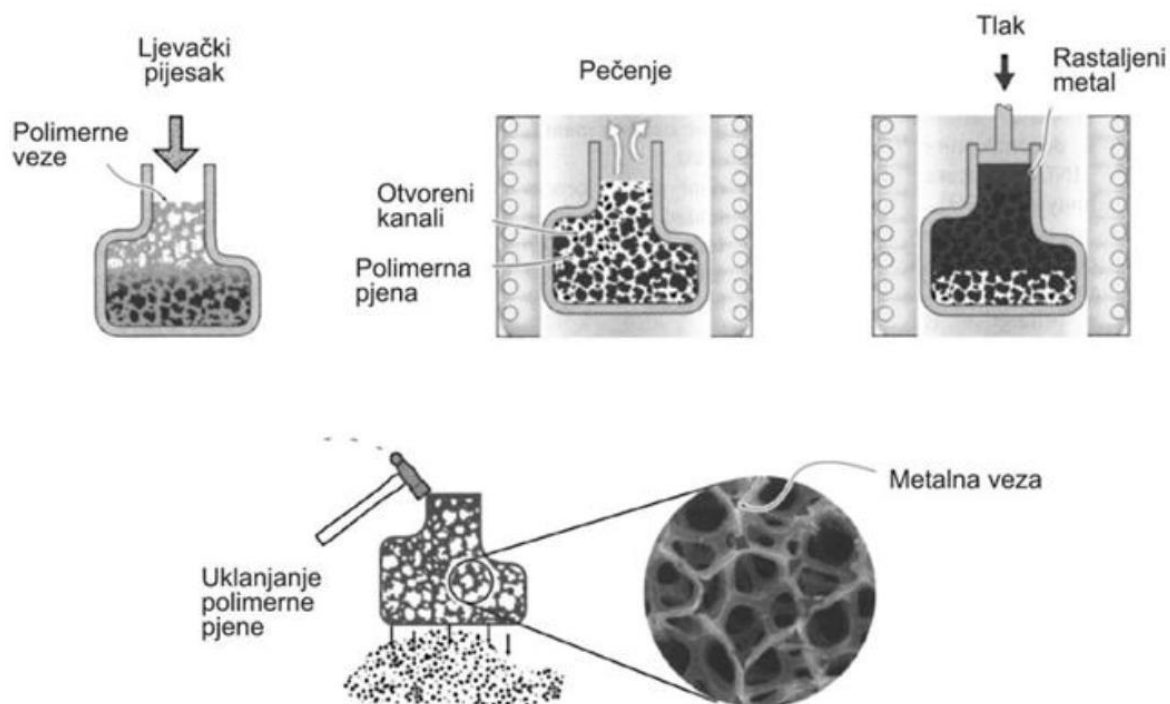


Slika 18. Faze procesa eutektičkog skrućivanja krutina-plin [6]

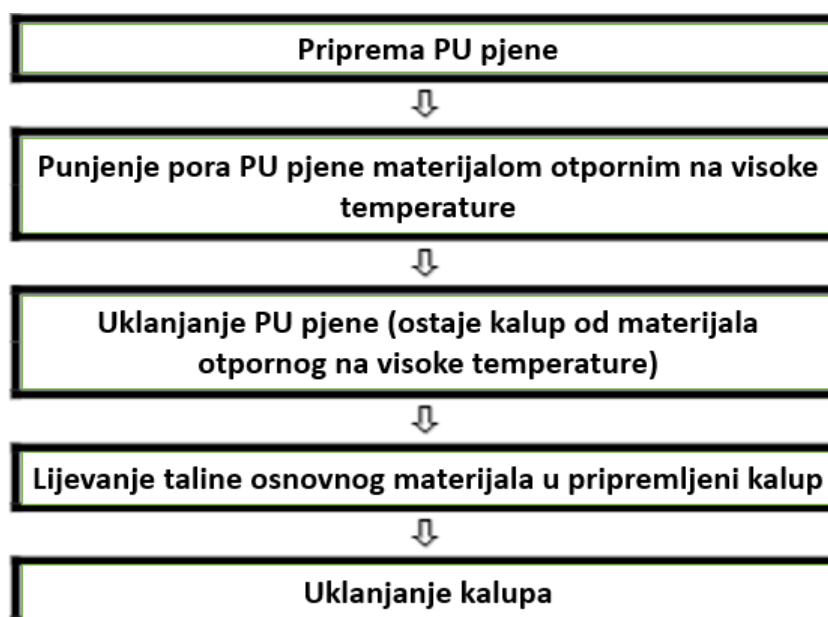
Prednost ovog procesa je činjenica da se mogu raditi pjene od metala sa srednjim i visokim temperaturama taljenja (bakar i nikal), te mogućnost stvaranja izduženih pora usmjerenim skrućivanjem. Glavni problemi su relativno niska poroznost (5-75 %) i činjenica da je struktura ćelija dosta problematična. [6]

2.5.1.3. Precizno lijevanje

Ovaj proces koristi polimernu pjenu kao kalup po kojem se formira metalna pjena. Polimerna pjena se popunjava mješavinom mulita, fenolne smole i kalcijevog karbonata, i tako se stvara kalup. Nakon toga se odstranjuje polimerna pjena, a u šupljinu novonastalog kalupa se ulijeva metalna talina. Kada se talina ohladi, kalup se odstranjuje, a ostaje metalna pjena koja je kopija polimerne pjene. Ovim procesom mogu se dobiti izuzetno porozne pjene (80 - 97 % poroziteta), te se mogu stvarati kompleksni oblici [6]. Slike 19 i 20 predočavaju ovaj proces uključujući njegove karakteristične faze.



Slika 19. Shema preciznog lijevanja metalnih pjena [7]

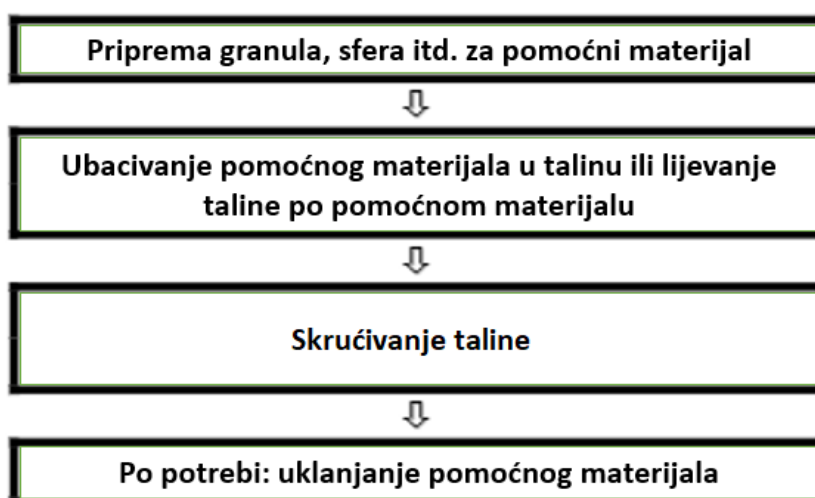


Slika 20. Faze preciznog lijevanja metalnih pjena [6]

2.5.1.4. Sintaktičke pjene

U ovom procesu, talina se ili lijeva oko anorganskih granula i šupljih kuglica male gustoće, ili se ti materijali ubacuju u talinu. Osim navedenih materijala mogu se koristiti i granule gline, kuglice staklene pjene ili šuplje kuglice aluminijskog oksida. [6]

Toplinski kapacitet granula je vrlo nizak, te stoga ne ometa previše tečenje taline. Problem je velika površinska napetost tekućeg metala, te se stoga preporuča djelovanje vanjske sile ili rad u vakuumu. Ovim procesom, čije su faze vidljive na slici 21, mogu se napraviti pjene brojnih metala, npr. Al, Mg, Zn, Pb, itd. [6].



Slika 21. Faze procesa izrade sintaktičkih pjena [6]

2.5.2. *Proizvodnja metalnih pjena iz praha*

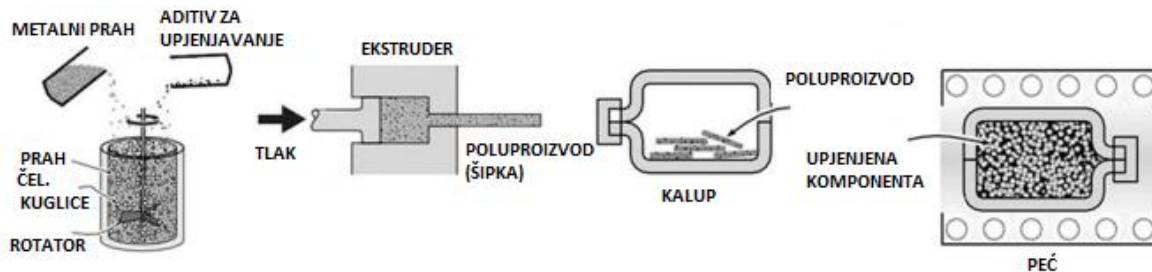
Ovi procesi za izradu pjena koriste metalne prahove kao polazno stanje materijala. Glavna prednost je mogućnost jednostavnog kombiniranja različitih prahova kako bi se metalne pjene ojačale česticama ili drugim ojačalima. [5] [6] [16] [17]

2.5.2.1. *Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi (Fraunhofer proces)*

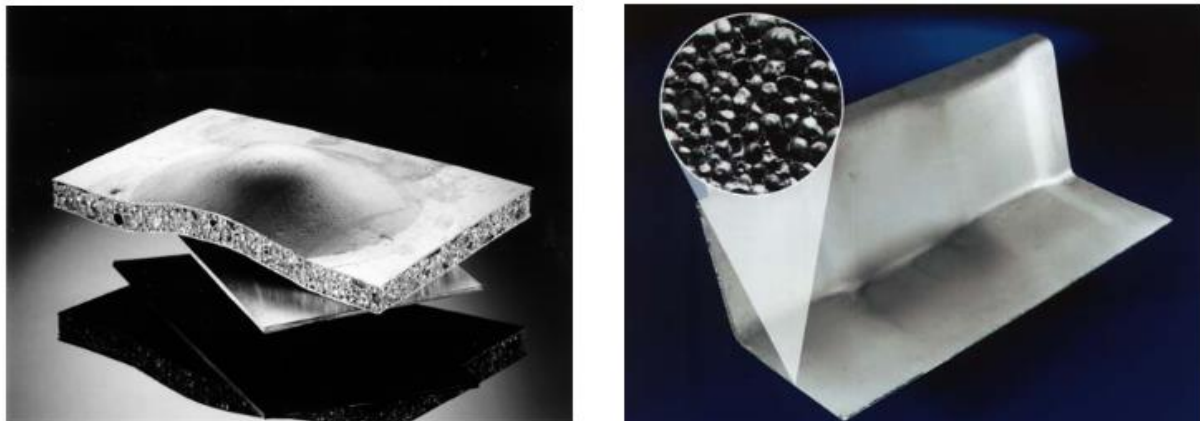
Proizvodnja počinje miješanjem metalnog praha (prah čistog metala, legure ili mješavina više elementarnih prahova) s agensom za upjenjivanje, najčešće titanijevim hidridom (TiH_2), slika 22. Nakon toga se ta smjesa sabija u poluproizvod (prekursor). Sabijanje se može postići bilo kojim klasičnim procesom koji se koristi u metalurgiji praha, te ovisi isključivo o obliku prekursora, no ekstruzija je danas najzastupljenija i ekonomski najisplativija metoda.

Nakon sabijanja potrebno je prekursor staviti u kalup te zagrijati iznad solidus temperature, što omogućava postizanje polučvrste faze, te raspadanje agensa za upjenjavanje. [16] Poroznost metalne pjene može se kontrolirati regulacijom količine dodanog agensa za upjenjavanje. [6]

Ovaj proces proizvodnje odličan je za izradu kompozitnih metalnih pjena. Metalni prah može se pomiješati s finim keramičkim prahom što rezultira proizvodnjom česticama ojačanih metalnih pjena, a moguća je i izrada sendvič konstrukcija koje za jezgru koriste metalnu pjenu. Vanjske površine tih sendvič konstrukcija najčešće su napravljene od čelika ili aluminija, slika 23.



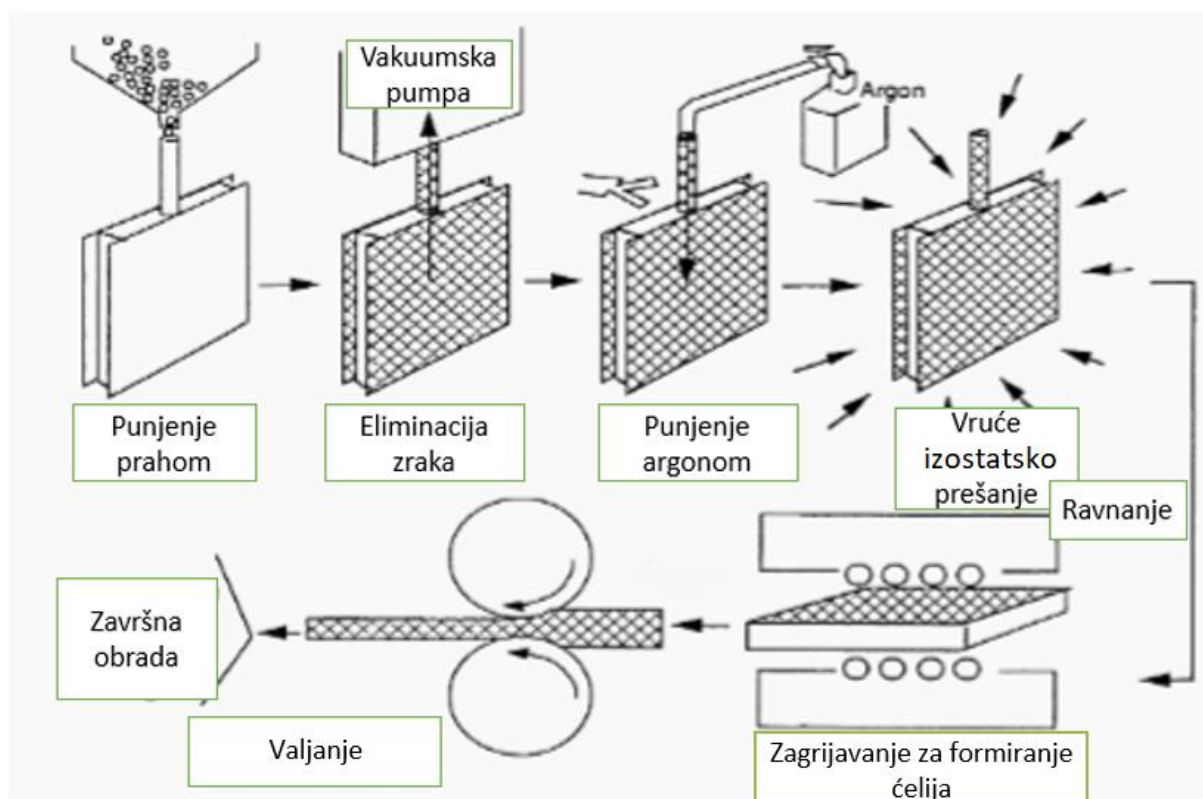
Slika 22. Shema Fraunhofer procesa proizvodnje metalnih pjena [16]



Slika 23. Sendvič konstrukcije proizvedene Fraunhofer procesom [6]

2.5.2.2. Ekspanzija plina u talini

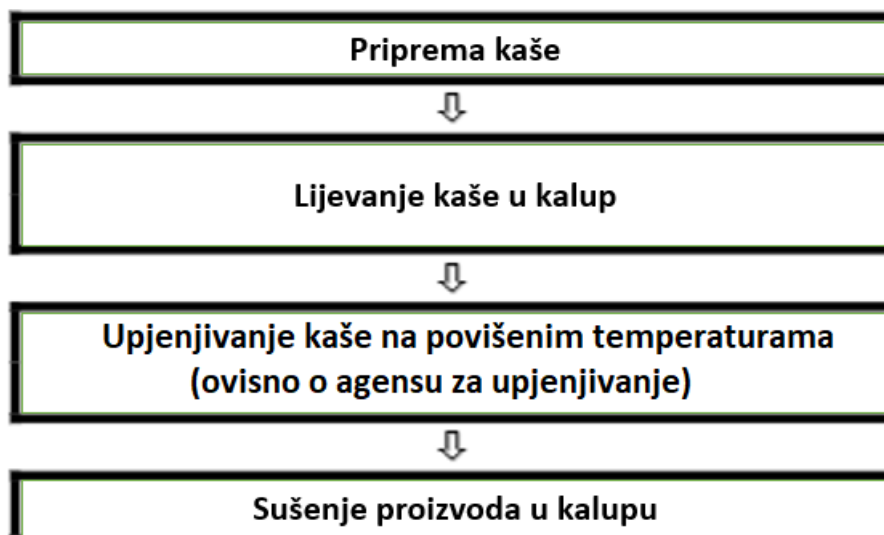
Ovaj proces razvijen je primarno za proizvodnju titanijevih pjena. Proces započinje ubacivanjem metalnog praha u spremnik koji je pod vakuumom, te se zatim spremnik puni argonom. Prah se nakon toga izostatski preša te upjenjuje zagrijavanjem na temperaturu $0,6 \cdot T_m$ i dodatno valja ako je potrebno [18], slika 24.



Slika 24. Proces ekspanzije plina u talini [18]

2.5.2.3. Upjenjivanje kaša

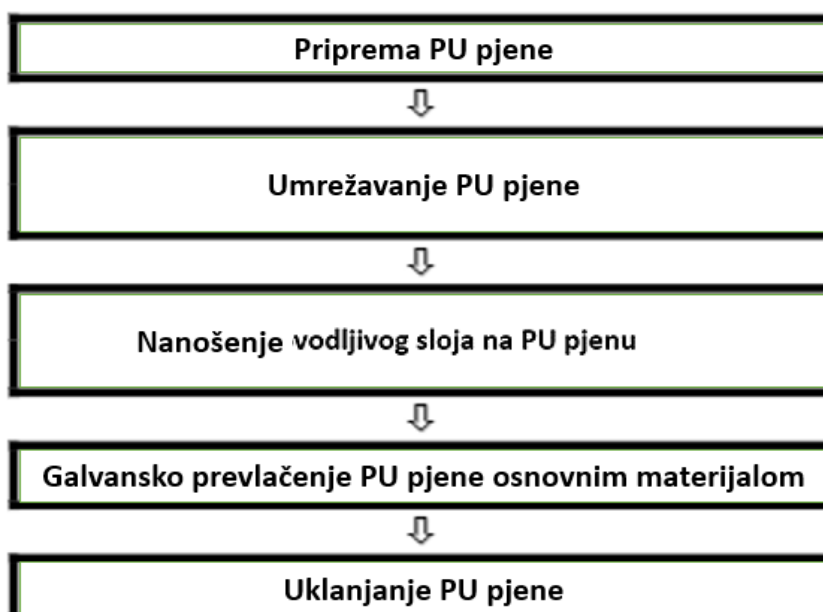
Kaše (engl. „*Slurries*“) su mješavine metalnih prahova i agensa za upjenjivanje kao što su fosforna i klorovodična kiselina. Takva smjesa se ulijeva u kalup, te se na povišenoj temperaturi suši. Povišena temperatura uzrokuje aktivaciju agensa za upjenjivanje koji se počinje rastvarati u plin. Ukoliko je poduzeto dovoljno koraka za stabilizaciju, smjesa se može osušiti i tako stvoriti metalnu pjenu. Koraci ovog procesa sažeti su na slici 25.



Slika 25. Faze postupka upjenjivanja kaše [6]

2.5.3. *Proizvodnja metalnih pjena iz ioniziranog metala*

Metalne pjene se proizvode iz ioniziranog metala različitim postupcima prevlačenja. Proces proizvodnje počinje modifikacijom polimerne pjene s ciljem povećanja njene električne vodljivosti, slika 26. To se postiže uranjanjem polimera u grafitnu otopinu ili prevlačenjem tankog sloja metala. Nakon toga, osnovni metal se galvanski nanosi na polimernu pjenu koja se naknadno eliminira, najčešće zagrijavanjem, kako bi ostala čista metalna pjena. [6]



Slika 26. Faze postupka proizvodnje metalnih pjena prevlačenjem [6]

3. SPAJANJE METALNIH PJENA

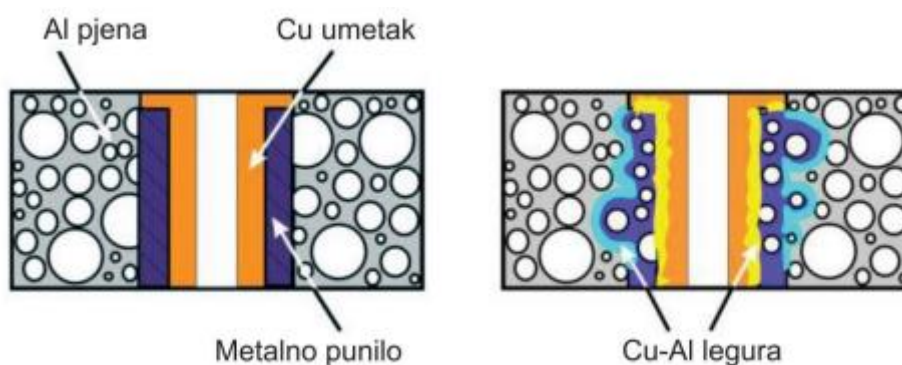
Općenito je pravilo kod spajanja materijala da spoj mora imati ista ili bolja svojstva od samog materijala. To je kod metalnih pjena nešto teže postići zbog porozne strukture, te se stoga mora obratiti posebna pozornost pri spajanju. Metalne pjene mogu se spojiti na tri načina: spajanje ljepilima, stvaranje rastavljivih spojeva te zavarivanjem. [7]

3.1. Spajanje ljepilima

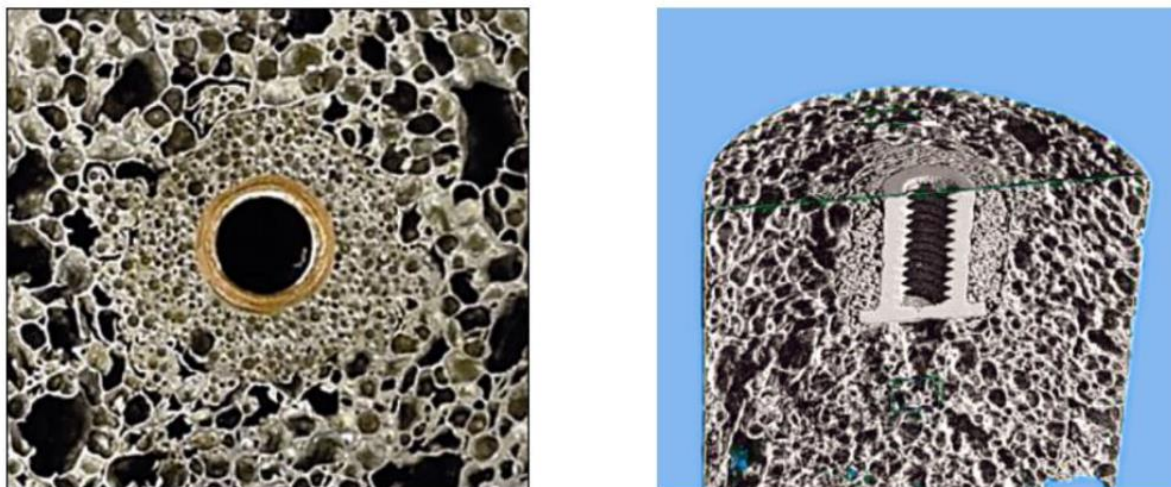
Ovaj način spajanja najčešće se koristi kod proizvodnje sendvič konstrukcija kojima je jezgre metalna pjena. Kao prijanjalo između vanjskih slojeva i jezgre najčešće se koristi epoksidna smola, a problemi koji se javljaju su sljedeći: smanjenje toplinske stabilnosti te smanjenje koeficijenta toplinske odnosno električne vodljivosti. [7]

3.2. Rastavljivi spojevi

S obzirom na činjenicu da metalne pjene imaju sličnu strukturu kao i drvo, moguće je koristiti iste tehnologije spajanja koje se koriste i za drvo. [19] Zbog toga se često koriste vijci koji su izrađeni za spajanje drva ili metalni umetci (najčešće bakreni). Ukoliko se koriste umetci, nužno je koristiti punilo kako bi se osiguralo dobro spajanje s metalnom pjenom. Punilo mora biti materijal koji se može pjeniti, a do povezivanja umetka i pjene dolazi zagrijavanjem cijelog sklopa kako bi se punilo upjenilo. [7] Slika 27 prikazuje proces povezivanja umetka i pjene, a slike 28 i 29 primjere rastavljivih spojeva.



Slika 27. Povezivanje umetka i pjene [7]



Slika 28. Metalne pjene spojene umetkom [7]



Slika 29. Spajanje metalnih pjena vijcima i kutnim profilom [7]

3.3. Zavarivanje

Kod zavarivanja aluminijskih pjena javlja se isti problem kao i kod zavarivanja aluminijskih ploča. Na površini aluminija stvara se zaštitni sloj aluminijeva oksida (Al_2O_3) koji ima više talište od aluminija. Iz tog razloga bitno je koristiti zaštitnu atmosferu inertnog plina kako ne bi došlo do obnavljanja tog zaštitnog sloja tijekom zavarivanja.

Za zavarivanje aluminijskih pjena najčešće se koristi lasersko zavarivanje u atmosferi inertnog plina (npr. argon ili helij). Zona utjecaja topline je kod laserskog zavarivanja vrlo mala. Bitno je pri zavarivanju paziti da ne dođe do urušavanja ćelijaste strukture kao rezultat mekšanja čvrste upjenjene faze. To se može spriječiti uporabom dodatnog materijala u obliku šipke ili ploče na mjestu zavarivanja. Za postizanje ćelijaste strukture zavara koristi se dodatni materijal koji se pod utjecajem topline pjenu. [7] Slika 30 prikazuje postupak zavarivanja metalnih pjena.

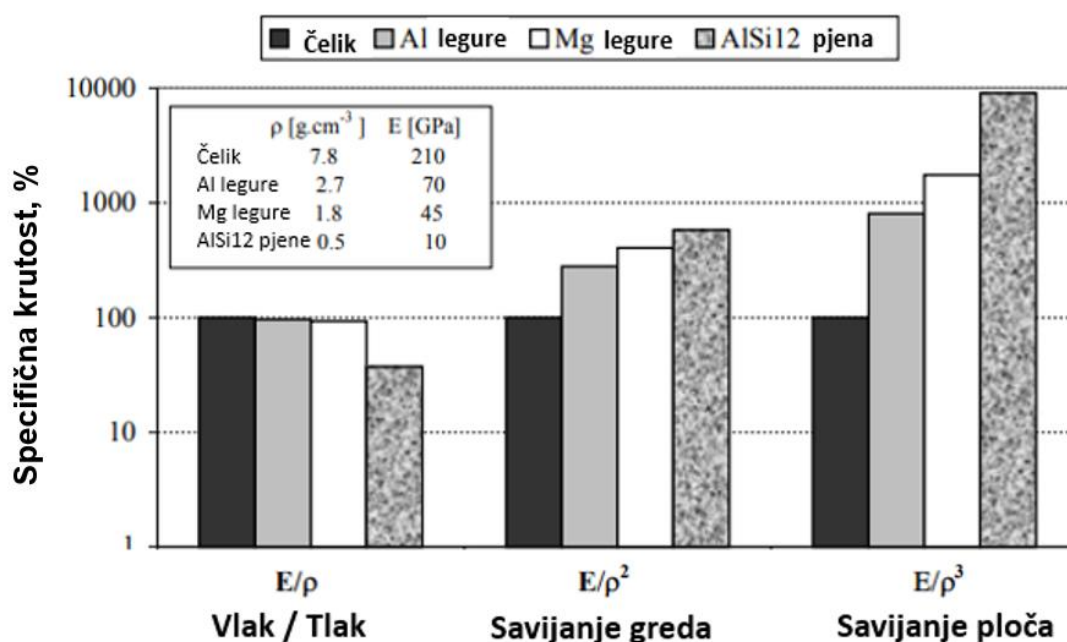


Slika 30. Proces zavarivanja metalnih pjena [7]

4. „ALULIGHT“ PJENE

„Alulight“ pjene su proizvedene Fraunhoferovim procesom opisanom u poglavlju 2.5.2.1, odnosno metalurgijom praha. Skoro pa ne postoje ograničenja u vanjskoj geometriji „Alulight“ pjena, a mogućnost korištenja ekstrudiranih šipki kao poluproizvoda za izradu samih pjena smanjuje troškove koji su često prisutni kod izrade proizvoda praškastom metalurgijom. [20]

„Alulight“ pjene su na svojoj površini prekrivene slojem velike gustoće koji se u literaturi još naziva „korom“ ili „kožom“ [20], a on poboljšava svojstva i izgled pjene. Nažalost, taj sloj je promjenjive debljine, te sadrži mikro-pukotine ili čak i rupice koje mogu uzrokovati lom pjene. Zbog toga se ne koriste često za izradu nosivih konstrukcija, iako im je specifična krutost (omjer modula elastičnosti i gustoće, E/ρ) vrlo visoka. Slika 31 prikazuje specifičnu krutost „Alulight“ pjena u odnosu na najčešće materijale za izradu nosivih konstrukcija. [20]



Slika 31. Specifična krutost „Alulight“ pjena u odnosu na druge materijale [20]

Mehanička otpornost „Alulight“ pjena može se povećati ojačanjem materijala mrežicama, isprepletanom žicom, metalnom tkaninom ili perforiranim limom te se takve ojačane „Alulight“ pjene mogu koristiti kao nosive konstrukcije. [20]

Glavna primjena neojačanih „Alulight“ pjena je na području apsorpcije energije udara. Kapacitet apsorpcije energije je definiran kao energija koja je potrebna za deformaciju materijala pri određenom naprezanju, te je ovo svojstvo bitno za automobilsku industriju jer omogućava povećanje sigurnosti putnika pri sudaru [21].

Način izračuna apsorbirane energije proizlazi iz dijagrama naprezanje-deformacija (slika 32), a definiran je kao površina ispod krivulje naprezanje-deformacija [21]:

$$W_v = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad \text{J/mm}^3 \quad (4)$$

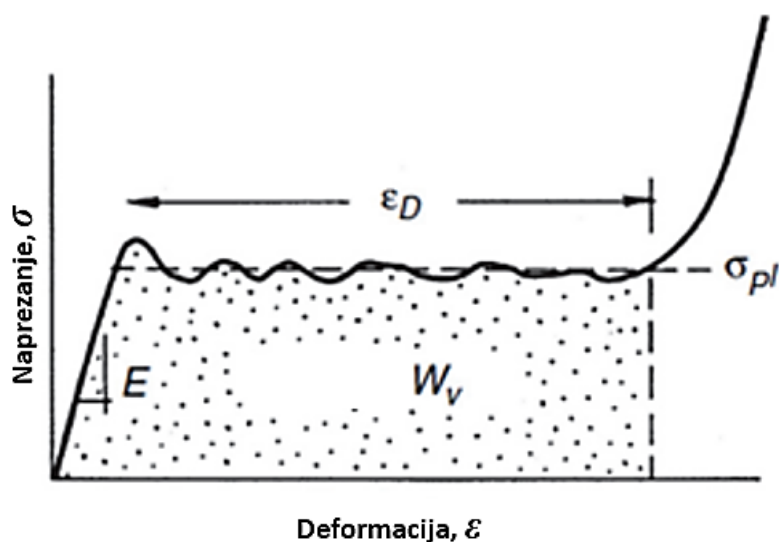
gdje je:

W_v – apsorbirana energija po jedinici volumena, J/mm^3 ,

σ – naprezanje, N/mm^2 ,

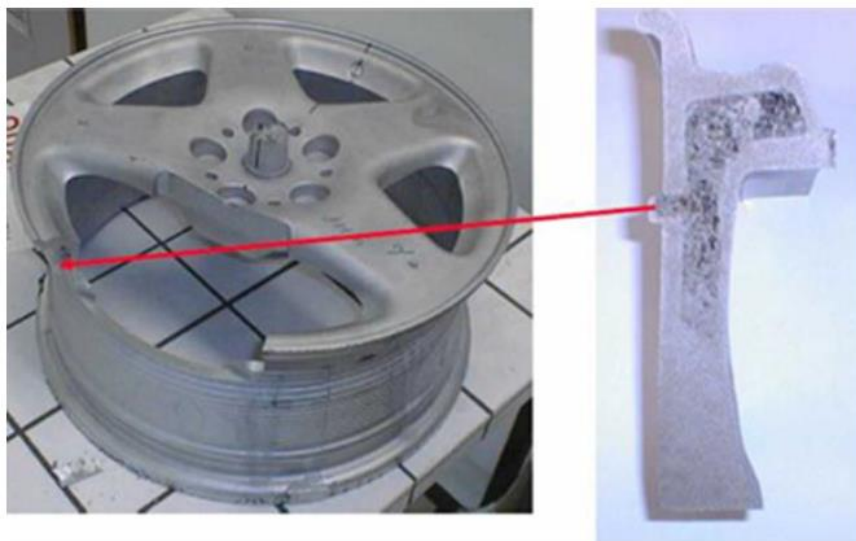
ε – deformacija, %.

Poželjno je za ove materijale koji apsorbiraju energiju da imaju dugačku i ravnu krivulju naprezanje-deformacija, kao na slici 32.



Slika 32. Dijagram naprezanje-deformacija za materijale s dobrom apsorpcijom energije [21]

Slike 33 i 34 prikazuju neke od trenutnih primjena „Alulight“ pjena.



Slika 33. Naplatak s jezgrom od „Alulight“ pjene [7]



Slika 34. Apsorberi energije kod: (a) Combino tramvaja; (b) Audiya Q7 [13]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog rada analizirana je ovisnost savojne čvrstoće metalnih pjena s obzirom na njihovu gustoću.

5.1. Priprema uzoraka

Za ispitivanje je pripremljeno 10 uzoraka „Alulight“ pjene s različitim relativnim gustoćama. Gotov prekursor (AlSi10 + 0,8 % TiH₂ – aluminijska legura u koju je dodano 0,8 % TiH₂ agensa za upjenjivanje) u obliku ekstrudiranih traka (slika 35) narezan je na manje komade (slika 36) radi lakšeg punjenja kalupa i kvalitetnijeg upjenjivanja. Dimenzije cilindričnog kalupa bile su sljedeće: $\Phi 25$ mm x 212 mm. Volumen kalupa (V_{kalupa}) je iznosio 0,000104065 m³ (slika 37) Svi uzorci su napravljeni od prekursora polazne mase 85 g.



Slika 35. Gotovi prekursor u obliku traka



Slika 36. Narezani prekursor u kalupu



Slika 37. Zatvoreni kalup

Nakon popunjavanja kalupa, isti je stavljen u elektrootpornu zvonastu peć (slika 38) koja se nalazi u Laboratoriju za polimere i kompozite na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Peć je prethodno zagrijana na temperaturu 750 °C, i na toj temperaturi kalup s prekursorom je držan 15 minuta kako bi se agens za upjenjivanje aktivirao. Kalup se zatim oprezno vadi iz peći i hladi komprimiranim zrakom.



Slika 38. Elektrootporna zvonasta peć

Tijekom upjenjivanja dolazi do istjecanja dijela aluminija iz kalupa, pa je stoga potrebno izvagati gotove uzorke (slika 39) Sva vaganja su provedena na preciznoj digitalnoj vagi RADWAG WLC 1/A2/C/2 (slika 40) u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 39. Gotovi uzorci



Slika 40. Digitalna vaga RADWAG WLC 1/A2/C/2

5.2. Gustoća upjenjenih uzoraka

Gustoća pjene može se izračunati na osnovi mase upjenjenog uzoraka i volumena kalupa korištenjem sljedećeg izraza:

$$\rho_{pjene} = \frac{m_{pjene}}{V_{kalupa}}, \quad \text{kg/m}^3 \quad (4)$$

gdje je:

m_{pjene} – masa pjene, kg

V_{kalupa} – volumen kalupa, ($V_{kalupa}=0,000104065 \text{ m}^3$).

Relativna gustoća je omjer gustoće pjene (ρ_{pjene}) i gustoće aluminijevog prekursora (ρ_{Al}):

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{pjene}}{\rho_{Al}} \cdot 100, \quad \% \quad (5)$$

Gustoća korištenog prekursora iznosi 2700 kg/m^3 .

Proznost pjene dobiva se iz izraza:

$$Por. = 100 - \rho_{rel}, \quad \% \quad (6)$$

U tablici 3 prikazani su podaci o masi, gustoći, relativnoj gustoći i poroznosti svakog uzorka.

Tablica 3. Masa, relativna gustoća i poroznost uzoraka

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa, (m), g	81,32	80,61	79,35	78,73	73,87	73,23	72,46	70,30	69,41	67,45
Gustoća (ρ), kg/m^3	781,44	774,61	762,50	756,55	709,84	703,98	696,30	675,54	666,99	648,15
Relativna gustoća, (ρ_{rel}), %	28,94	28,69	28,24	28,02	26,29	26,06	25,79	25,02	24,70	24,01
Poroznost, %	71,06	71,31	71,76	71,98	73,71	73,94	74,21	74,98	75,30	75,99

Iz podataka je vidljivo da je priprema uzoraka bila uspješna, jer svaki uzorak ima drugačiju relativnu gustoću. Idući korak je određivanje savojne čvrstoće svakog uzorka.

5.3. Ispitivanje savijanjem u tri točke

Na uzorcima je zatim provedeno ispitivanje savijanjem u tri točke, koje je objašnjeno u poglavlju 2.3.5.1 teoretskog dijela ovog rada. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici WPM EU40mod (slika 41), uz pomoć naprave koja je postavljena na donju tlačnu ploču kidalice, a sastoji se od dva oslonca koji su međusobno razmaknuti 120 mm, te trna promjera 20 mm koji je čeljustima pričvršćen na traverzi (slika 42) Brzina opterećivanja kod ispitivanja je bila $v_{op} = 2$ mm/min. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

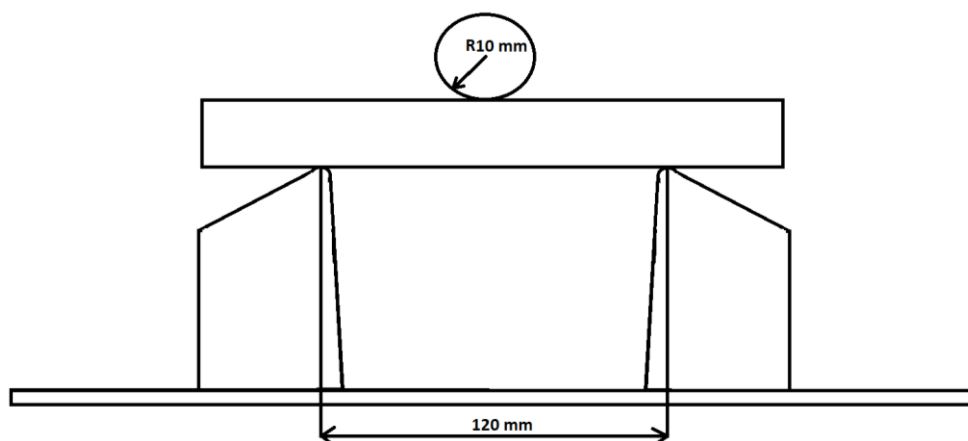


Slika 41. Kidalica WPM EU40mod



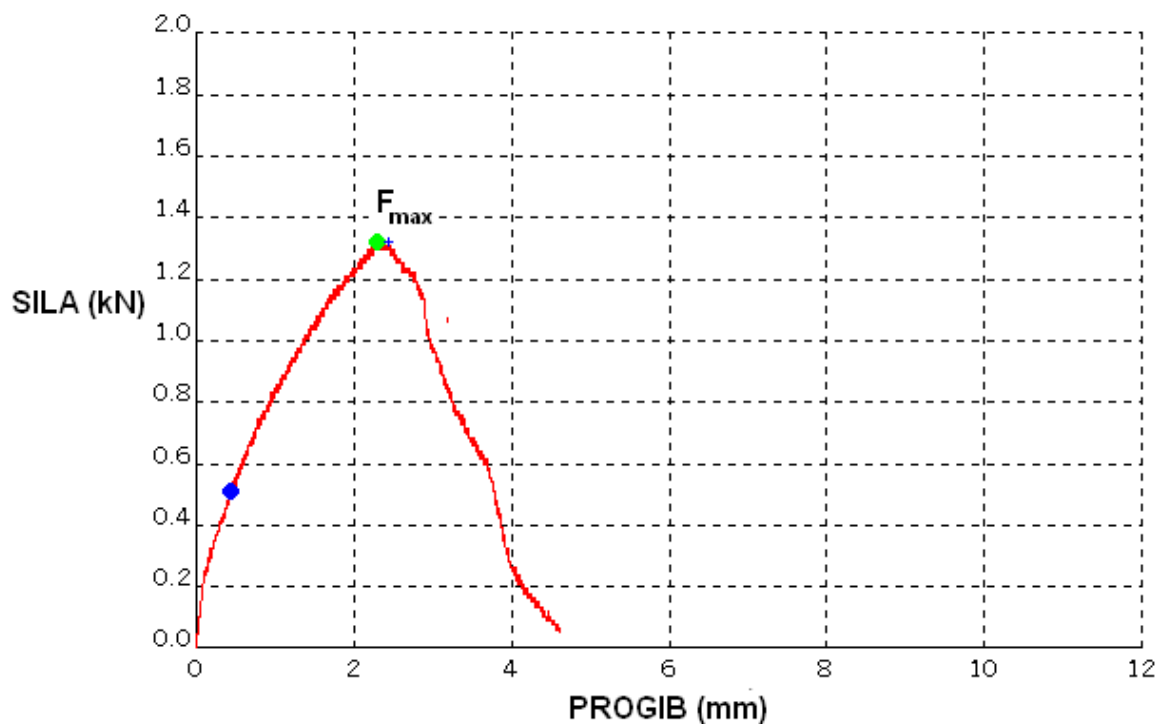
Slika 42. Naprava za ispitivanje savijanjem u tri točke

Slika 43 prikazuje shemu ispitivanja savijanjem u tri točke sa zahtijevanim dimenzijama.



Slika 43. Shema savijanja u tri točke s dimenzijama

Ispitivanje je provedeno za svaki od 10 uzoraka, a rezultati su dobiveni u obliku dijagrama sila - progib. Slika 44 prikazuje dijagram za uzorak 1, a svi ostali dijagrami navedeni su u prilogu ovog rada.



Slika 44. Krivulja sila – progib, uzorak 1

Slika 45 prikazuje neke uzorke nakon ispitivanja savijanjem u tri točke. Lom se desio na središnjem dijelu, neposredno ispod trna, na mjestu najvećeg progiba.



Slika 45. Uzorci nakon ispitivanja savijanjem u tri točke

Analizom dijagrama svih 10 uzoraka dobiveni su podaci o maksimalnoj sili i progibu, koji su sažeto prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Vrijednosti maksimalne sile i progiba

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Maksimalna sila (F_{\max}), kN	1,32	1,32	1,22	1,24	1,10	1,13	1,08	1,02	1,05	0,98
Progib (w), mm	2,3	2,8	3,1	2,9	2,7	3,4	2,8	3,8	4,6	5,0

Na temelju podataka iz tablice 4 moguće je izračunati savojnu čvrstoću svakog uzorka prema sljedećem izrazu:

$$R_{ms} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4 \cdot W}, \quad \text{N/mm}^2 \quad (7)$$

gdje je:

F_{\max} – maksimalna sila, N

l – udaljenost između oslonaca, mm

W – moment otpora, mm³.

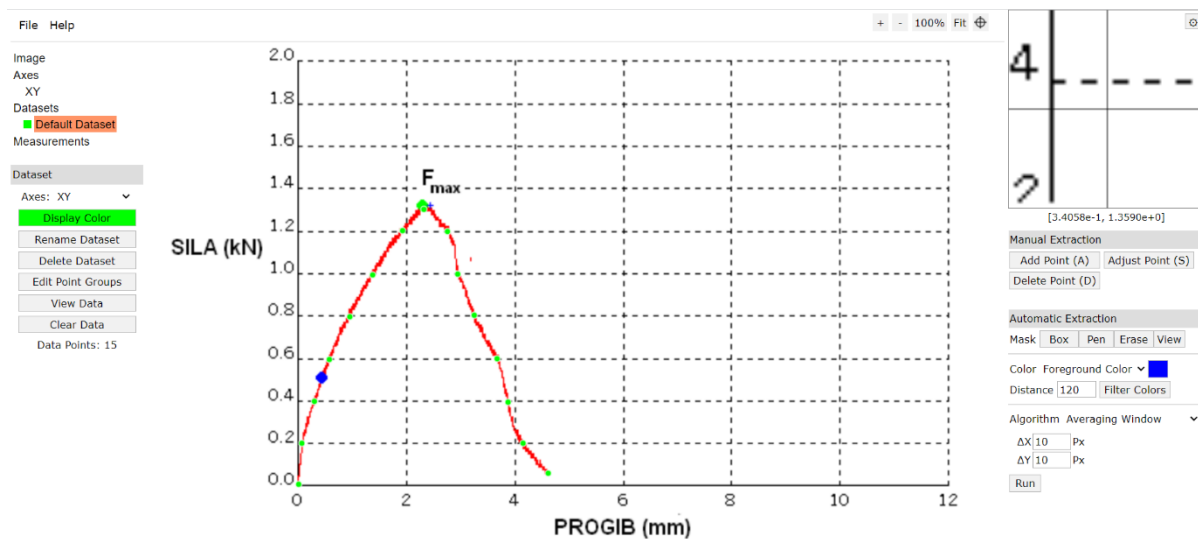
Moment otpora za uzorke s kružnim poprečnim presjekom računa se prema sljedećem izrazu:

$$W = \frac{r^3 \pi}{4}, \quad \text{mm}^3 \quad (8)$$

gdje je:

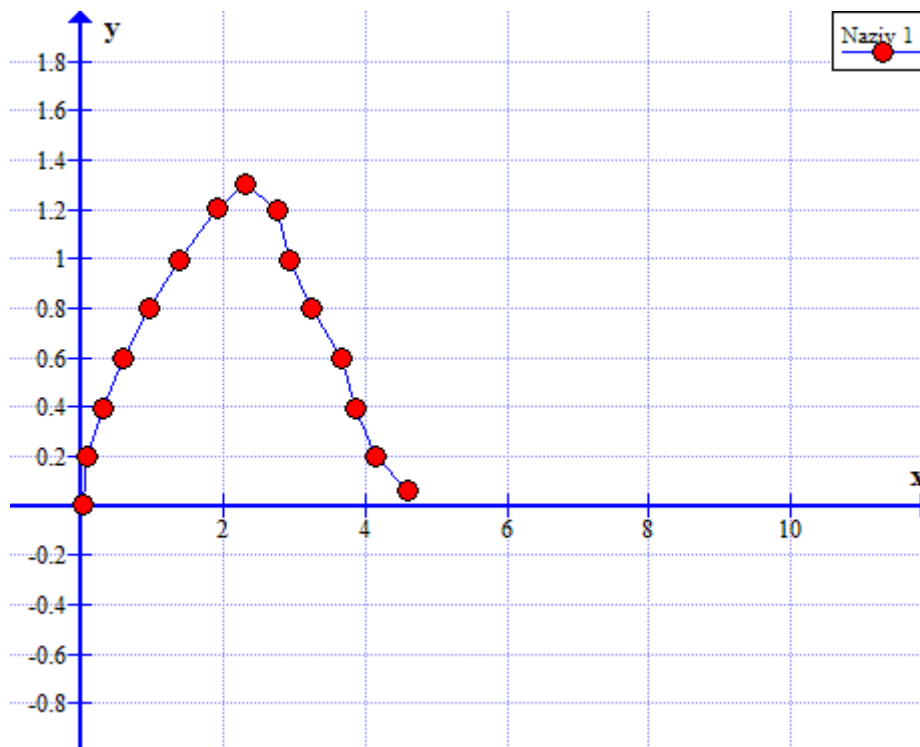
r – polumjer uzorka, mm.

Potrebno je također i izračunati rad utrošen na kidanje uzoraka W_k . Rad je definiran kao površina ispod krivulje sila – progib. S obzirom na činjenicu da kidalica na kojoj je provedeno ispitivanje rezultate iskazuje u obliku već gotove krivulje, bez akvizicijskih vrijednosti sile i progiba za pojedine točke, potrebno je svaku krivulju obraditi u softveru „*Graph 4.4.2*“, što se postiže određivanjem 15 karakterističnih točaka na svakom dijagramskom prikazu. Nakon toga se istim softverom može odrediti površina ispod krivulje. Određivanje karakterističnih točaka svakog dijagrama napravljeno je web alatom „*WebPlotDigitizer*“, koji omogućava učitavanje dijagrama u obliku slike i zatim očitavanje točaka. Slika 46 pokazuje određivanje točaka uz pomoć „*WebPlotDigitizer*“ alata.

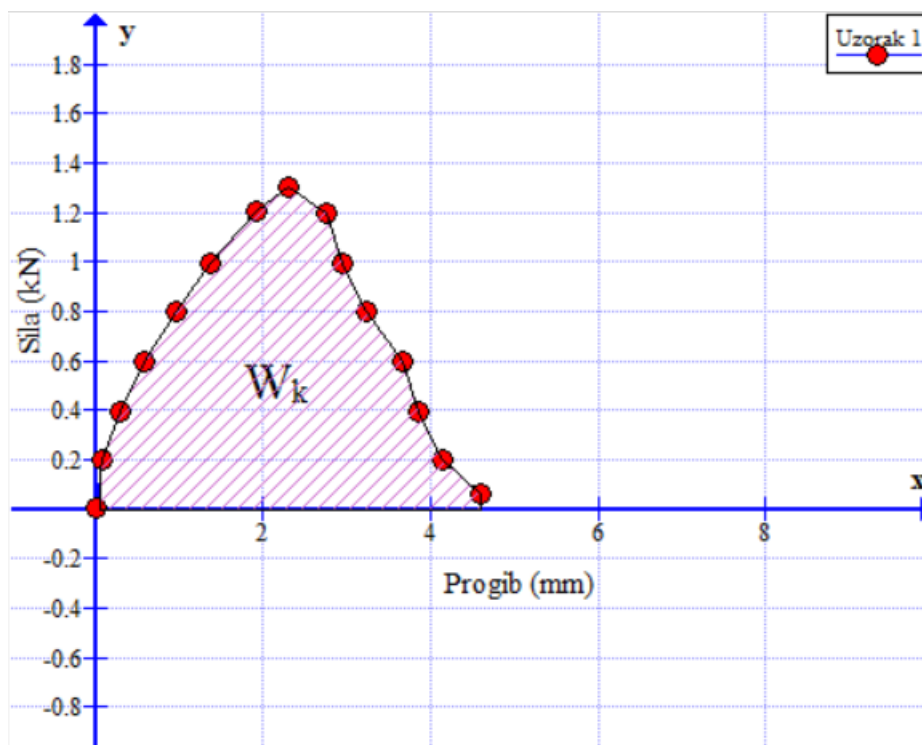


Slika 46. Određivanje točaka uz pomoć „WebPlotDigitizer“ alata

Nakon određivanja karakterističnih točaka, one se ubacuju u programski paket „Graph 4.4.2“, koji automatski crta dijagram, kao na slici 47, te se zatim određuje površina ispod krivulje, odnosno rad, što je vidljivo iz slike 48.



Slika 47. Dijagram s ucrtanim karakterističnim točkama



Slika 48. Konvertirani dijagram sila – progib s površinom ispod krivulje, uzorak 1

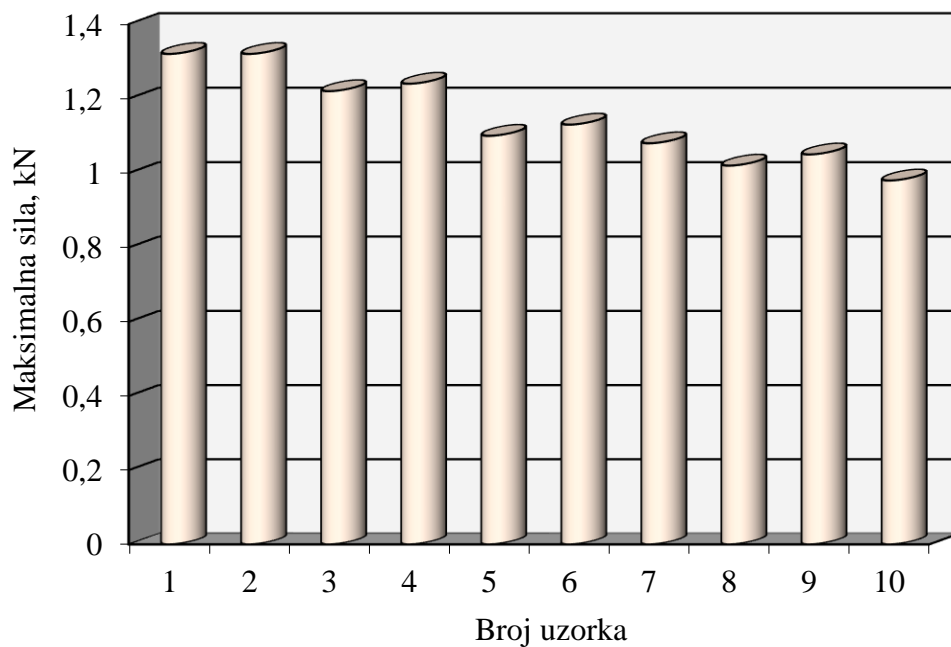
Konvertirani dijagrami sila – progib s površinom ispod krivulje za ostale uzorke nalaze se u prilogu ovog rada. Tablica 5 prikazuje savojnu čvrstoću i rad utrošen za kidanje svakog uzorka.

Tablica 5. Savojna čvrstoća i rad utrošen za kidanje uzorka

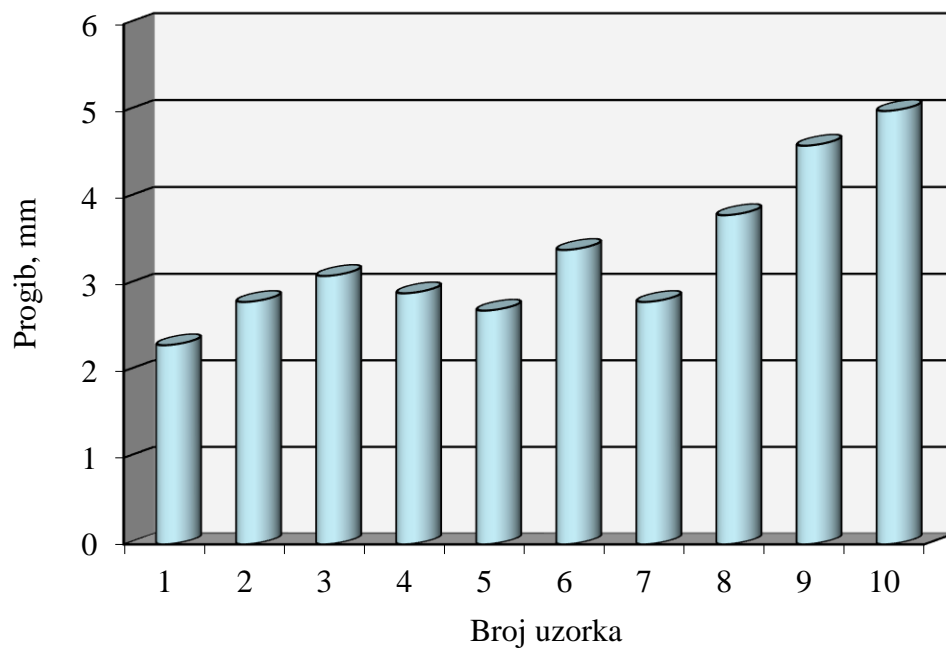
Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Savojna čvrstoća (R_{ms}), N/mm ²	50,45	50,45	46,62	47,39	42,04	43,18	41,27	38,98	40,13	37,45
Rad (W_k), J	3,51	3,42	4,15	3,62	2,97	3,39	4,15	3,75	4,47	4,94

6. ANALIZA REZULTATA

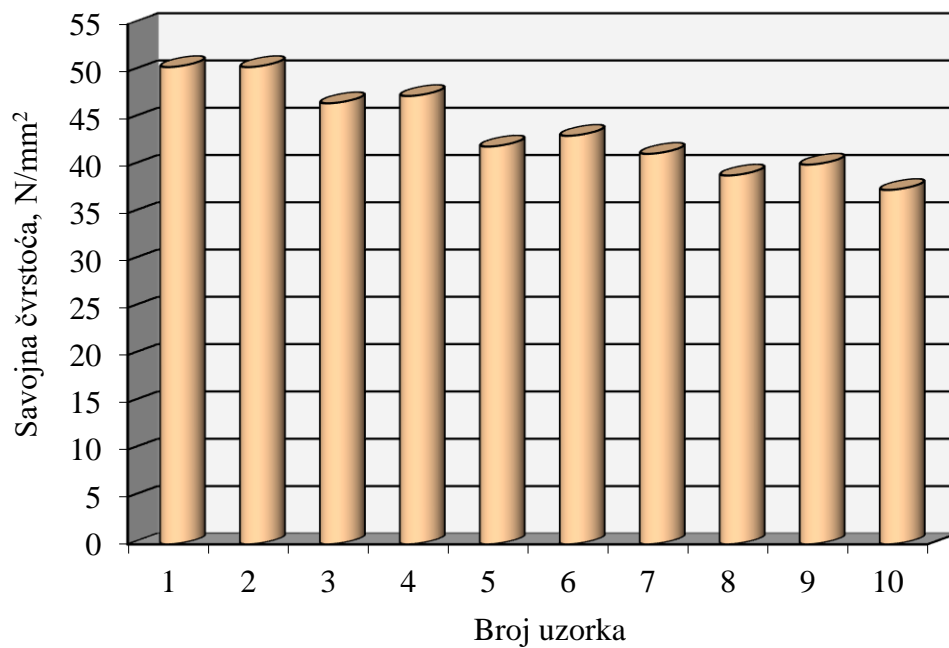
Na slikama 49 – 52 prikazane su izmjerene vrijednosti svih deset uzorka.



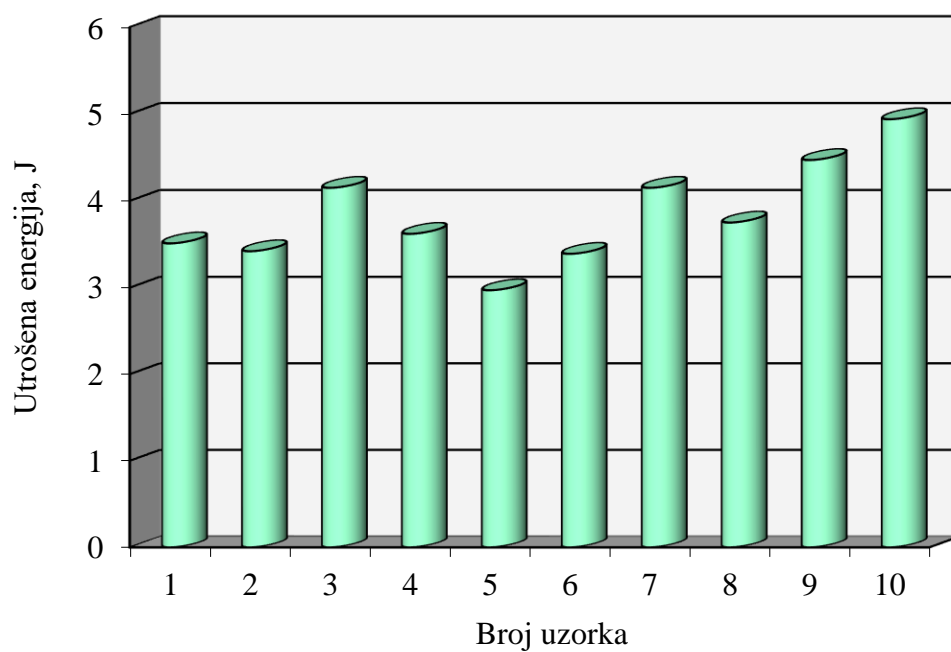
Slika 49. Izmjerene vrijednosti maksimalne sile



Slika 50. Izmjerene vrijednosti progiba

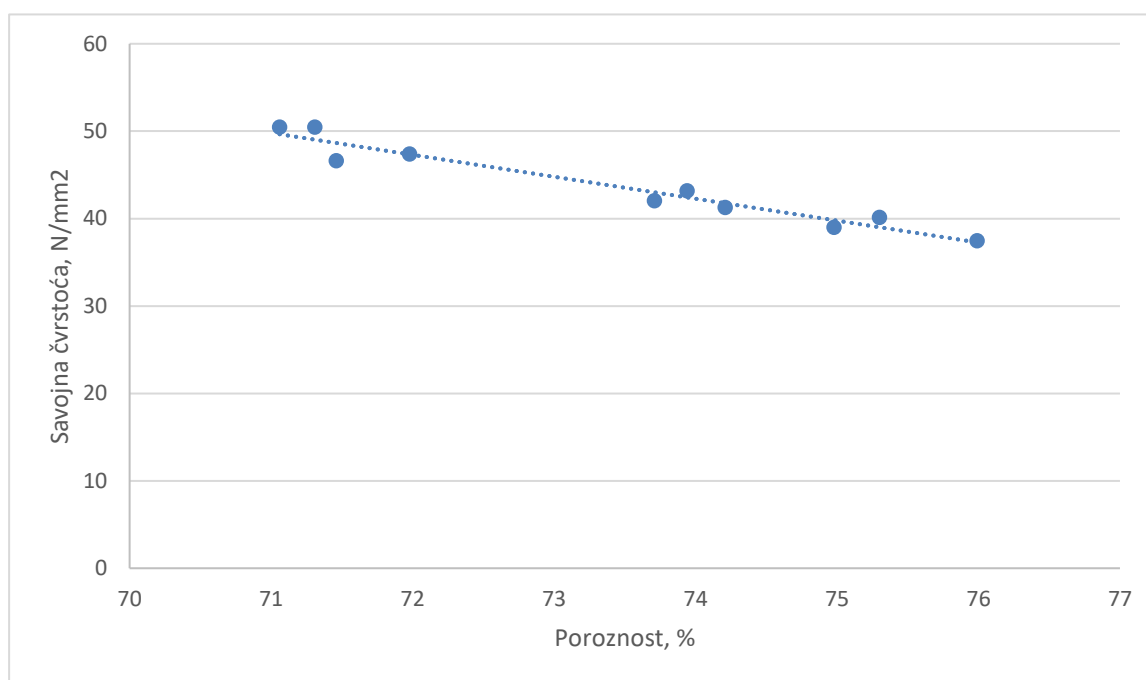


Slika 51. Izmjerene vrijednosti savojne čvrstoće



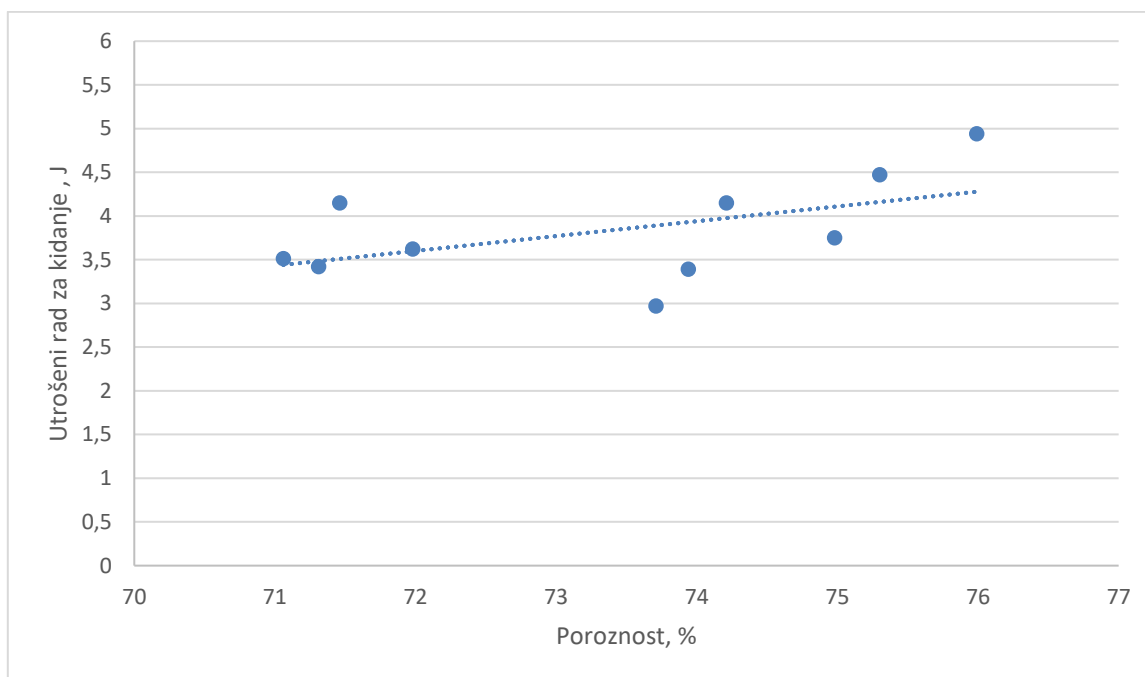
Slika 52. Izmjerene vrijednosti utrošene energije

Iako postoje stanovita odstupanja jasno je vidljivo kako se savojna čvrstoća smanjuje od uzorka 1 prema uzorku 10, odnosno pada s povećanjem poroznosti pjene, što je bila i jedna od hipoteza ovog diplomskog rada. Odstupanja se mogu pripisati nehomogenosti u strukturi metalnih pjena, odnosno neravnomjernom rasporedu ćelija, njihovoj veličini i obliku kao posljedici još uvijek potpuno neupravljivog procesa upjenjivanja. Ovaj fenomen pokazuje da je relativno teško s velikom pouzdanošću predvidjeti točno ponašanje metalnih pjena u određenim eksploatacijskim uvjetima, te je stoga potrebno posebno obratiti pažnju na proizvodni proces, ali i proračun konstrukcije koja sadrži metalne pjene kao nosivi element, uz uvažavanje većih faktora sigurnosti. Također, razlike u gustoći su relativno male, te bi uz veći raspon gustoća trend promjene bio daleko izraženiji. Ovisnost savojne čvrstoće o relativnoj gustoći metalne pjene odnosno njenoj poroznosti prikazana je na slici 53.



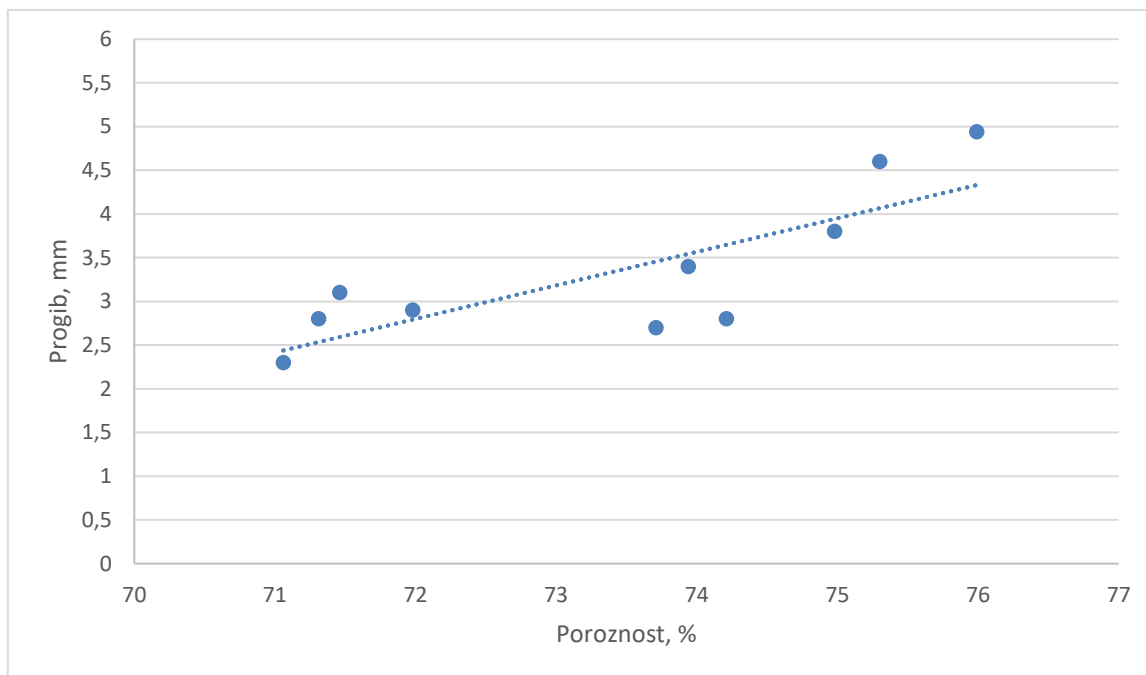
Slika 53. Ovisnost savojne čvrstoće o poroznosti aluminijske pjene

Također je zanimljivo analizirati ovisnost rada utrošenog na kidanje epruvete s obzirom na poroznost pjene. Iz slike 54 jasno je vidljivo da smanjenjem relativne gustoće raste energija koji se utroši na lom epruvete u uvjetima savojnog opterećenja.



Slika 54. Ovisnost utrošenog rada za kidanje o poroznosti aluminijske pjene

Nadalje, interesantno je razmotriti i varijacije progiba epruvete s obzirom na ostvareni stupanj poroznosti, slika 55. Ovdje postoji trend rasta progiba s povećanjem poroznosti, no zbog velikih odstupanja, ne može se sa sigurnošću utvrditi uzročno-posljedična veza. Razlog je isti kao i kod utrošenog rada, a to je činjenica da danas još uvijek nije u potpunosti ovladano tehnologijom upjenjivanja s ciljem postizanja tražene morfologije metalnih pjena, a time i željenih svojstava.



Slika 55. Ovisnost progiba o poroznosti aluminijske pjene

7. ZAKLJUČAK

Iz svega navedenog može se zaključiti sljedeće:

- Metalne pjene su vrlo zanimljivi materijali s ogromnim potencijalom, no relativno su problematične i skupe za izradu. U budućnosti, ukoliko se smanji cijena proizvodnje te uspiju eliminirati problemi s nehomogenosti ćelija, mogle bi u nekim slučajevima zamijeniti ostale porozne materijale kao što su polimerne pjene ili primjerice drvo.
- Povećanjem poroznosti metalne pjene dolazi do smanjenja savojne čvrstoće, ali i povećanja progiba na račun manje krutosti, te energije koja se utroši na lom epruvete u uvjetima savojnog opterećenja.
- Zbog nedovoljno kontroliranog postupka izrade uzoraka, u rezultatima su uočena stanovita odstupanja koja su osobito izražena kod progiba i rada loma.
- Idealno bi bilo za istu poroznost napraviti više uzoraka, što bi rezultiralo pouzdanijim rezultatima manje ovisnim o slučajnoj prirodi procesa upjenjivanja, a time i o rasporedu, obliku i veličini ćelija te različitim defektima koji su prisutni u unutrašnjosti ili na vanjskoj stjenki (kori) pjene.

LITERATURA

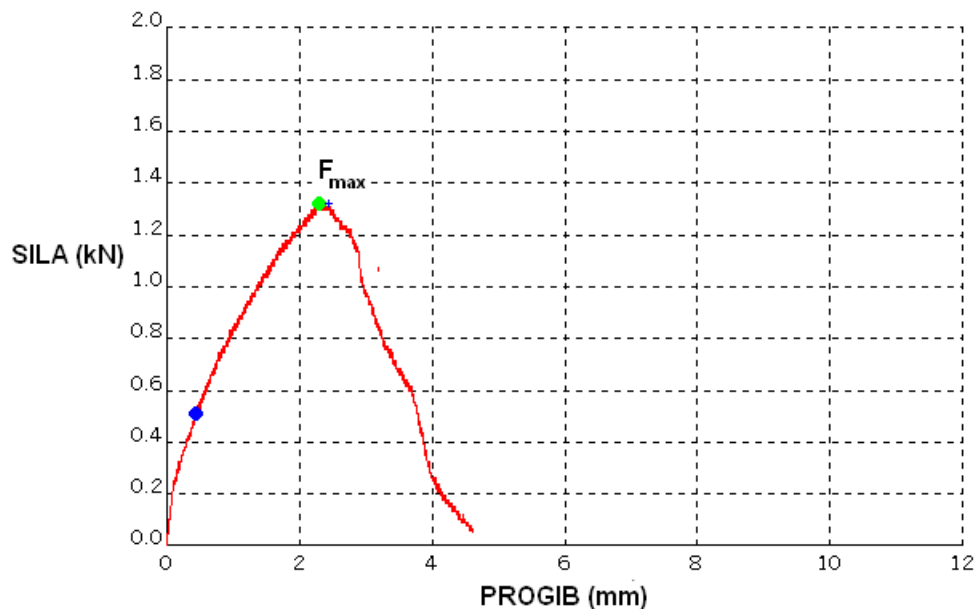
- [1] Filetin T., Kramer I. Marić G.: Metalne pjene: proizvodnja, svojstva i primjena, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [2] Banhart J.: Light-Metal Foams - History of Innovation and Technological Challenges, *Adv Eng Mater.*, 15 (3), 2013, 82-111, doi: 10.1002/adem.201200217.
- [3] Onck P.R., Merkerk R., Raaijmakers A., De Hosson J.Th.M.: Fracture of open- and closed-cell metal foams, *J. Mater Sci.*, 40 (22), 2005, 5821-5828, doi: 10.1007/s10853-005-4996-7.
- [4] Sathurusinghe P., Herath K.R.B., Herath S.: Elastic properties of open cell metallic foams using finite element analysis and homogenization technique, Conference Proceedings: 45th Institute of Engineers Pakistan Convention, Karachi, Pakistan, 2012, doi: 10.13140/RG.2.1.2325.3606.
- [5] Duarte I., Ferreira J.M.F.: Composite and Nanocomposite Metal Foams, *Materials*, 9 (2), 2016, 79, doi: 10.3390/ma9020079.
- [6] Banhart J., Baumeister J.: Production Methods for Metallic Foams, *Mat. Res. Soc. Symp.*, Conference Proceedings, 1998, doi: 10.1557/PROC-521-121.
- [7] Puškarić M.: Metalne pjene, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2020,
- [8] Hein P.R.G., Brancheriau L.: Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas. Ciencia y Tecnol.*, 20 (3), 2018, 333-342, doi: 10.4067/S0718-221X2018005003401.
- [9] Lončar A., Vojvodić D., Matejiček F., Jerolimov V.: Savojna čvrstoća materijala za izradbu proteznih baza, *Acta stomatologica Croatica: International journal of oral sciences and dental medicine*, 40 (2), 2006, 151-161,
- [10] Rivera N.M.T., Torres J.T., Valdés A.F.: A-242Aluminium Alloys Foams Manufacture from the Recycling Beverage Cans, *Metals*, 9, 2019, 92, doi: 10.3390/met9010092

- [11] Petel O.E., Ouellet S., Higgins A.J., Frost D.L.: The elastic–plastic behaviour of foam under shock loading, *Shock Waves*, 23 (1), 2013, 55–67, doi: 10.1007/s00193-012-0414-7.
- [12] Wimmers G.: Wood: a construction material for tall buildings, *Nature Reviews Materials*, 2 (12), 2017, 1-2, doi: 10.1038/natrevmats.2017.51
- [13] García-Moreno F.: Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials*, 9(2), 2016, 85, doi: 10.3390/ma9020085.
- [14] Banhart J.: Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Prog, Mater Sci.*, 46(6), 2001, 559–632, doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [15] Vakili S., Steinbach I., Varnik V.: Multi-phase-field simulation of microstructure evolution in metallic foams, *Scientific Reports*, 10:19987, 2020, 1-12, doi: 10.1038/s41598-021-95371-2.
- [16] Bauer B., Kralj S., Bušić M.: Production and application of metal foams in cating technology, *Tehnički vjesnik - Tech. Gaz.*, 20 (6), 2013, 1095-1102
- [17] Oveisi H, Geramipour T.: High mechanical performance alumina-reinforced aluminum nanocomposite metal foam produced by powder metallurgy: fabrication, microstructure characterization, and mechanical properties. *Mater Res Express*, 6 (12), 2020, 1250c2. doi: 10.1088/2053-1591/ab608b.
- [18] Tatt T.K.: Review on Manufacturing of Metal Foams, *Materials Science - ASM Sci J.* 16, 2021, 1–8, doi: 10.32802/asmscj.2021.794.
- [19] Partlow W.: Joining of metal foams - Metal Foams. Beyond Discovery. 2017. Dostupno na: <https://www.beyonddiscovery.org/metal-foams/153-joining-of-metal-foams.html>. Pristupljeno: 17. rujan 2021.
- [20] Simancik F, Rajner W, Laag R.: Reinforced Alulight for structural use, *Processing and properties of Lightweight Cellular Metals and Structures (TMS Annual Meeting)*, Seattle, 2002, p.25.

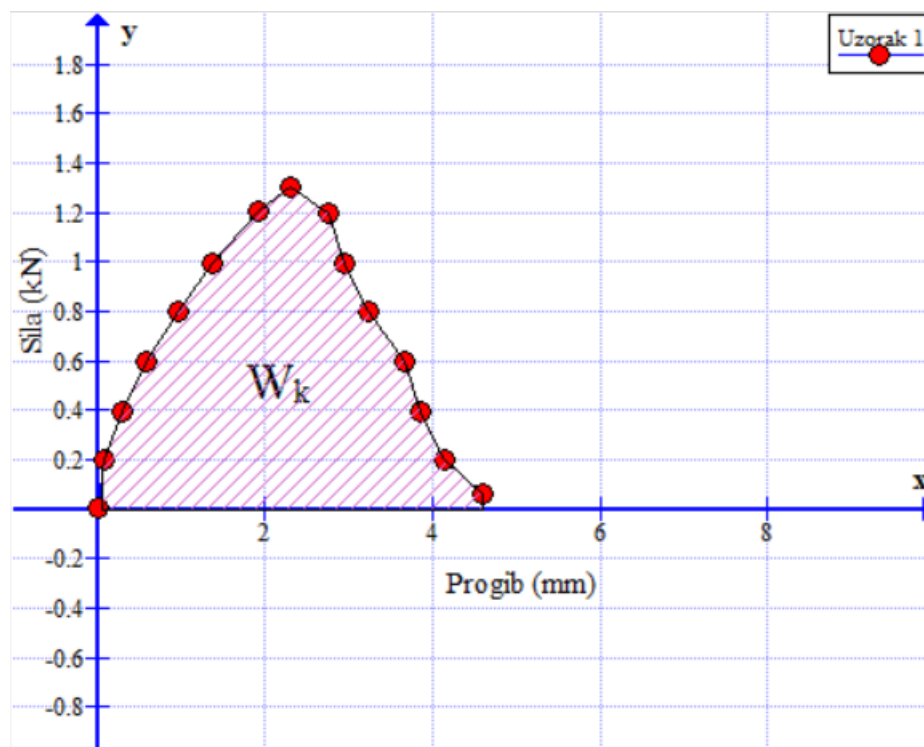
- [21] Grilec K, Bunjan I., Jakovljević S.: The Influence of Applied Force on Aluminium Foams Energy Absorption. Tehički vjesnik - Tech. Gaz., 28 (4), 2021, 1388-1394, doi: 10.17559/TV-20200109101038

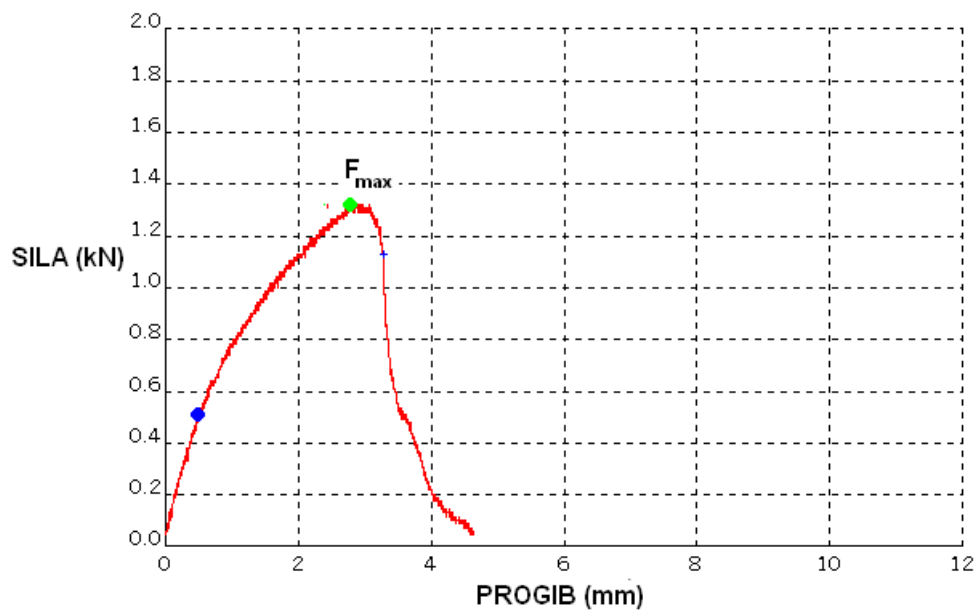
PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Dijagrami sila – progib za sve uzorke

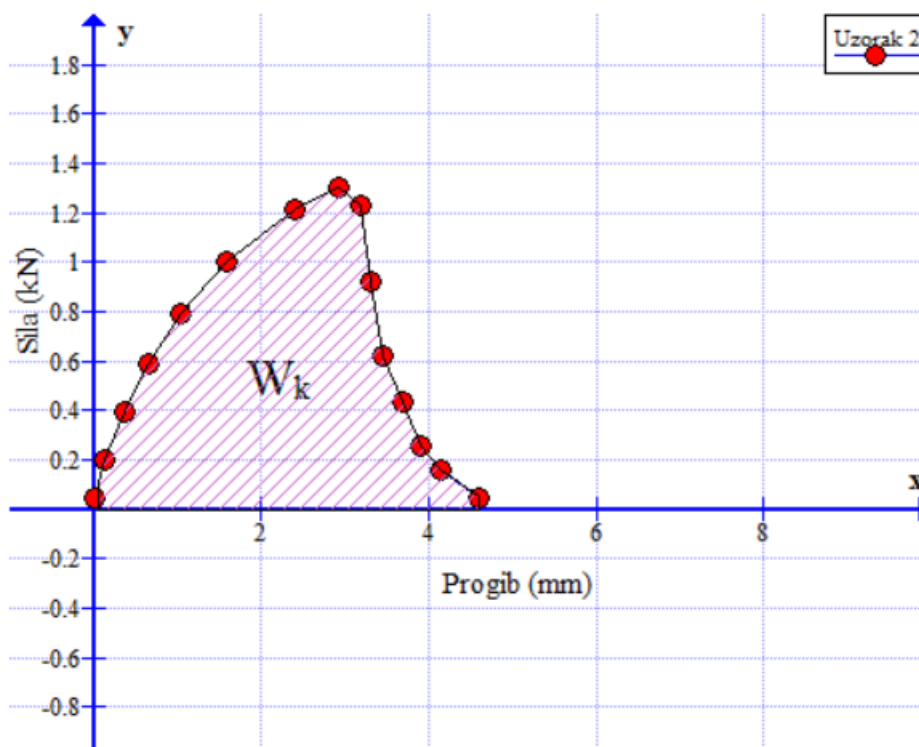


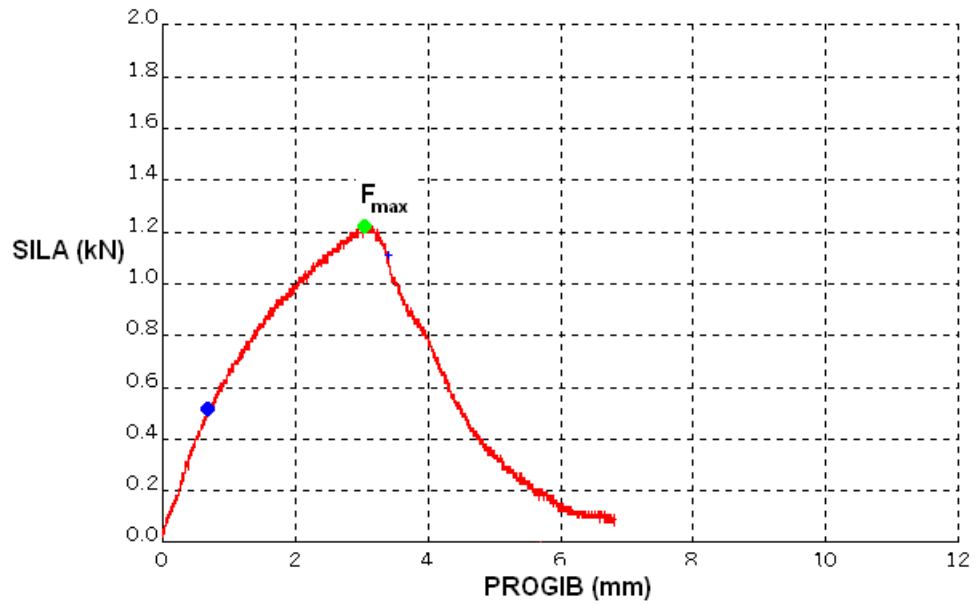
Slika 56. Krivulja sila – progib, uzorak 1

Slika 57. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 1

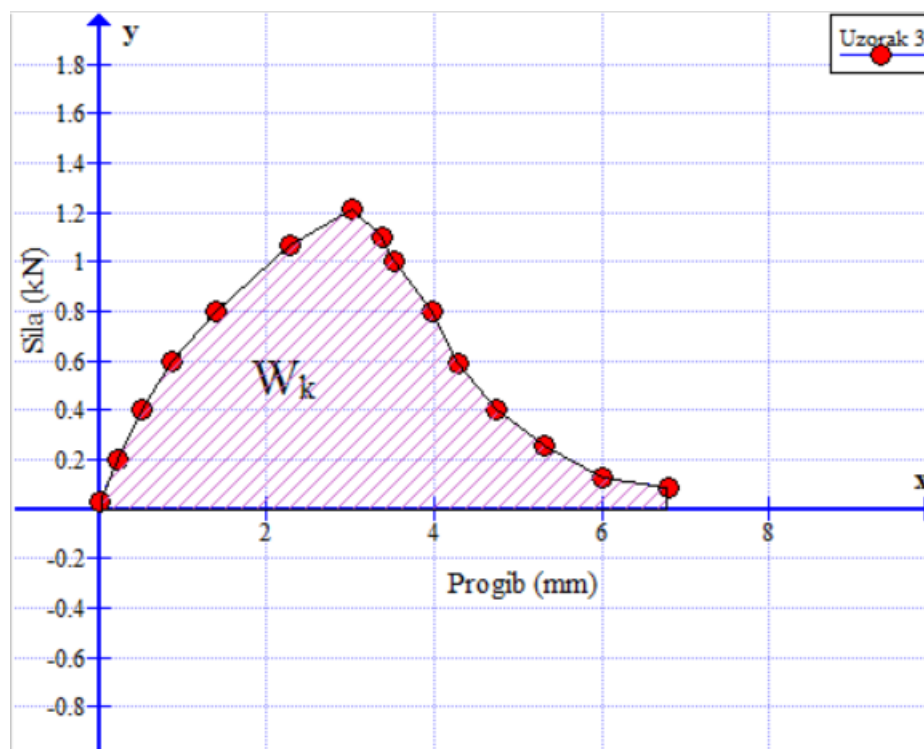


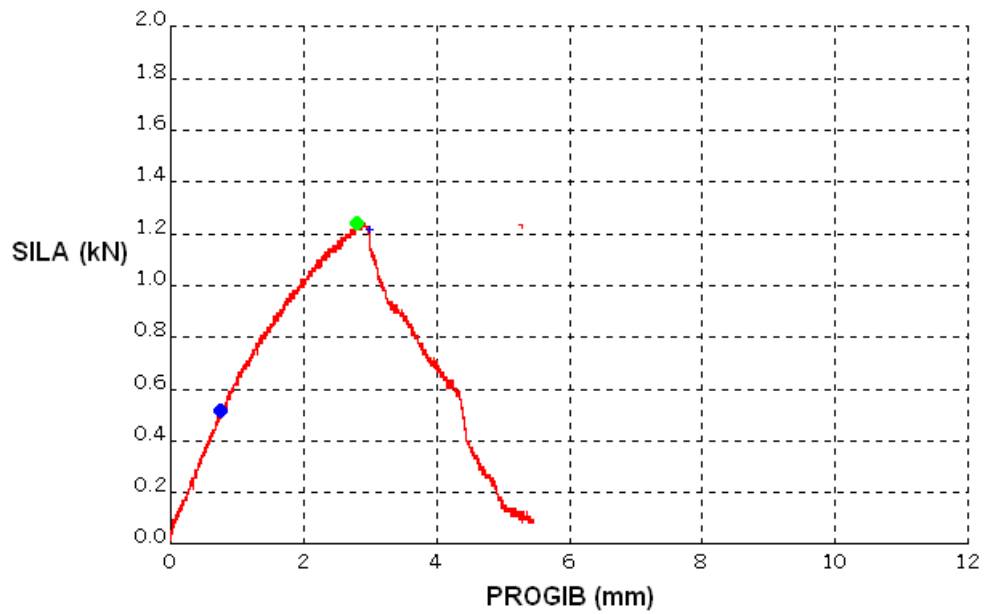
Slika 58. Krivulja sila – progib, uzorak 2

Slika 59. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 2

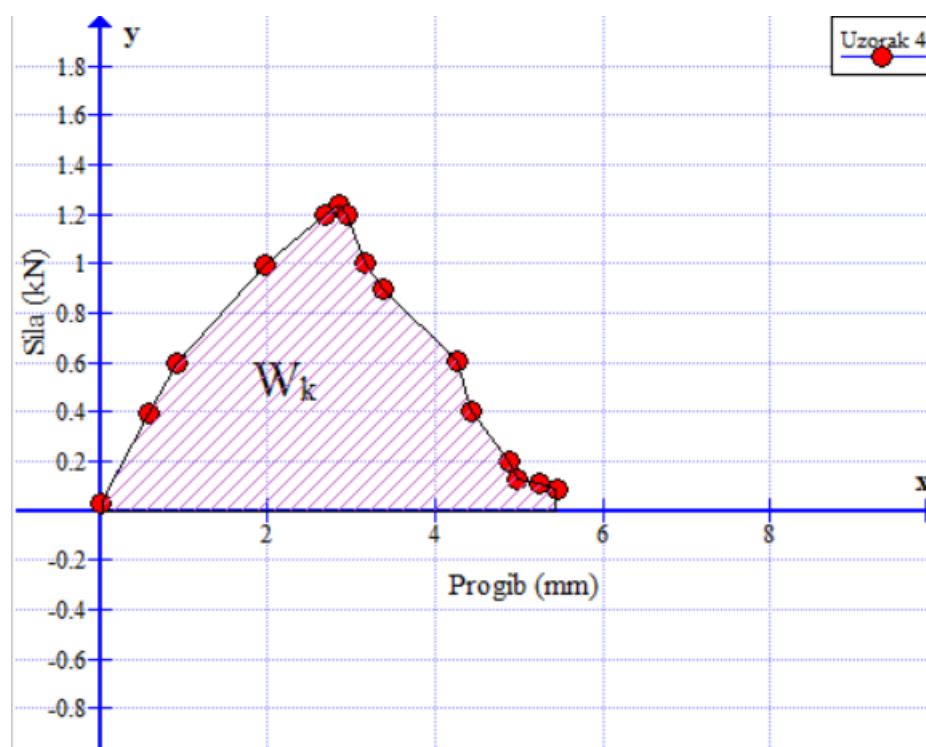


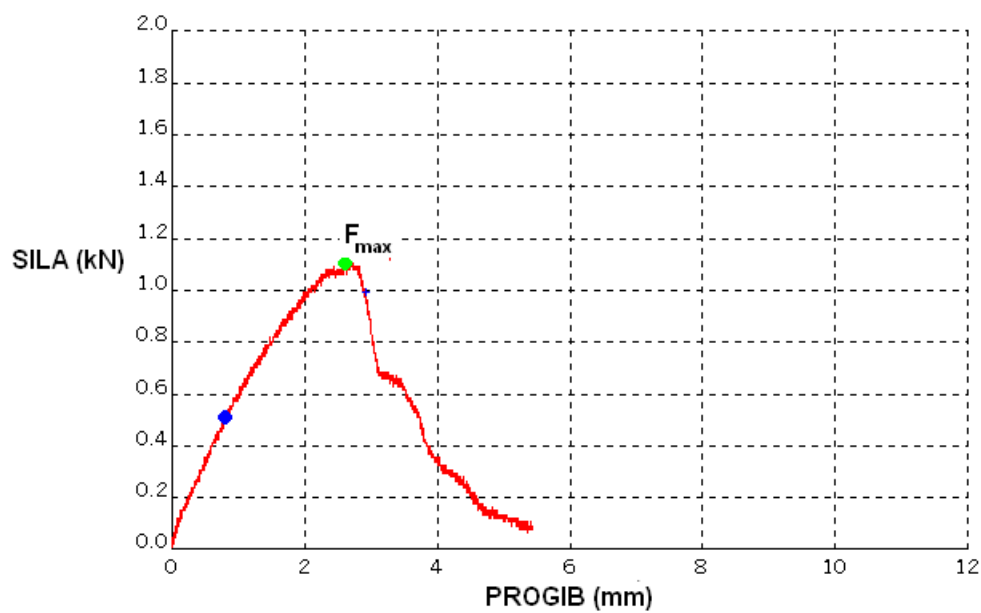
Slika 60. Krivulja sila – progib, uzorak 3

Slika 61. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 3

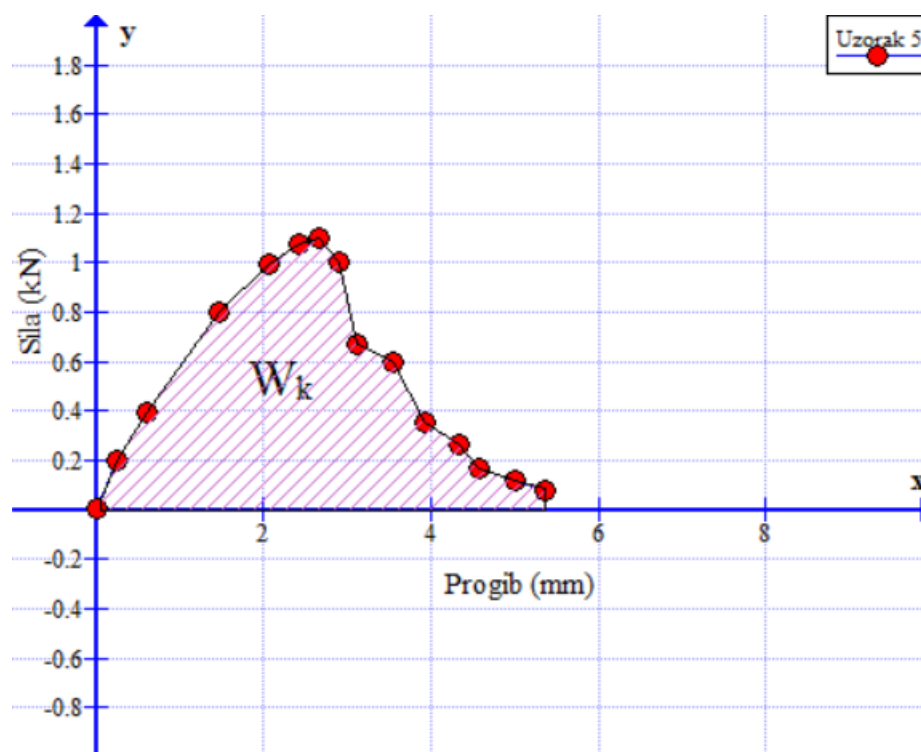


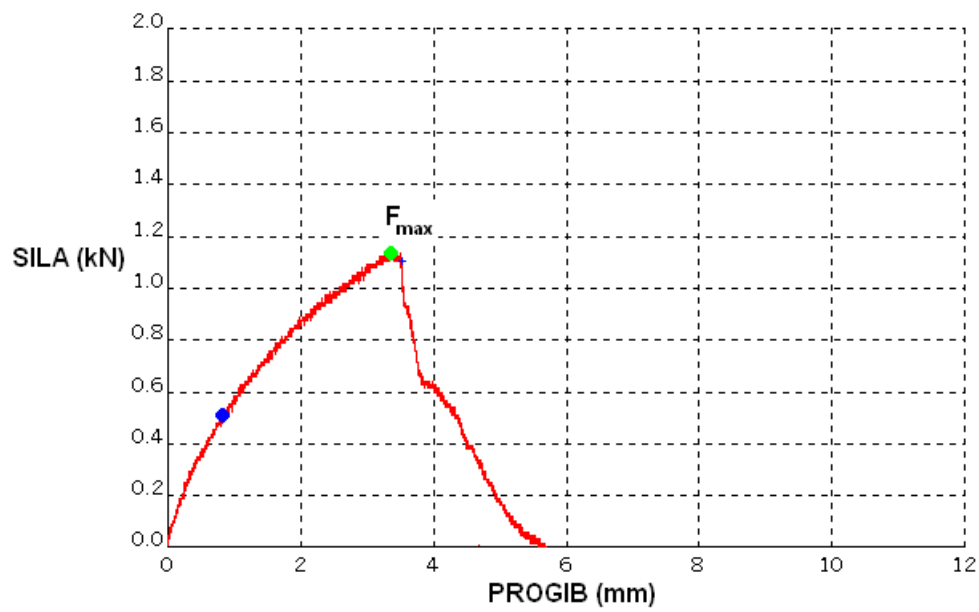
Slika 62. Krivulja sila – progib, uzorak 4

Slika 63. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 4

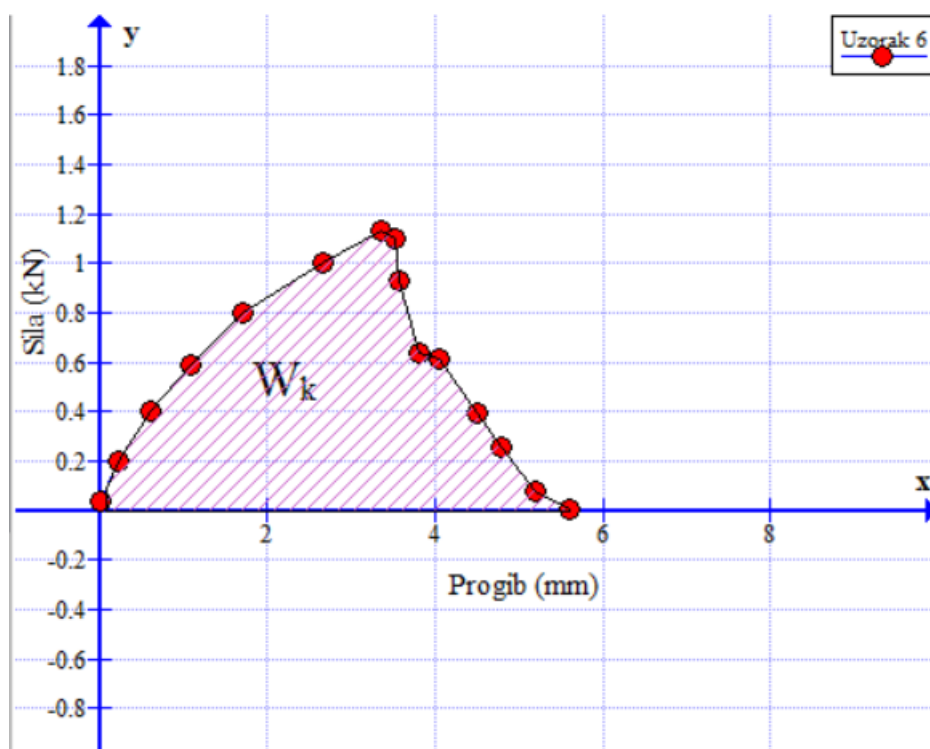


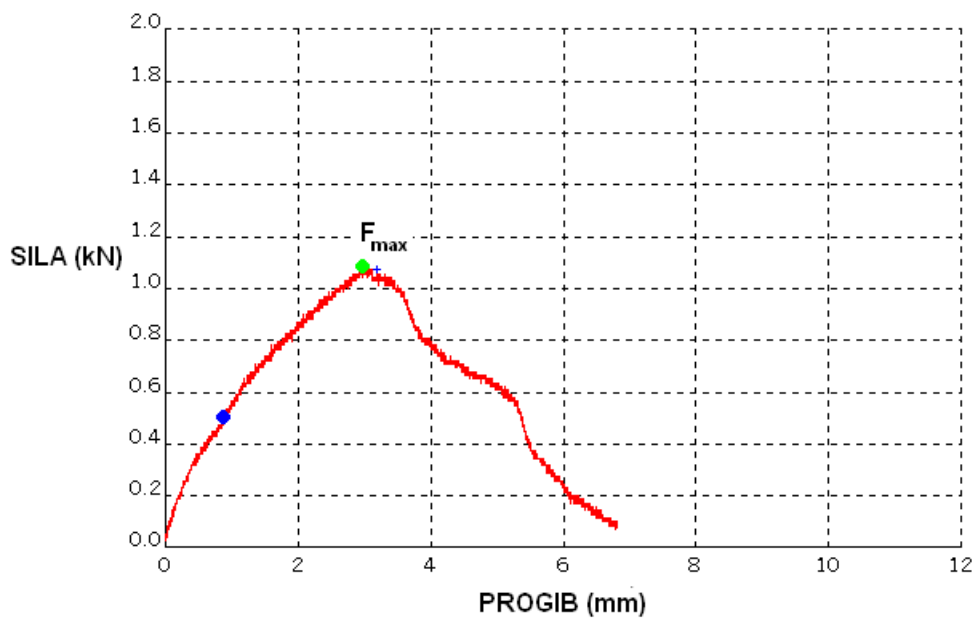
Slika 64. Krivulja sila – progib, uzorak 5

Slika 65. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 5

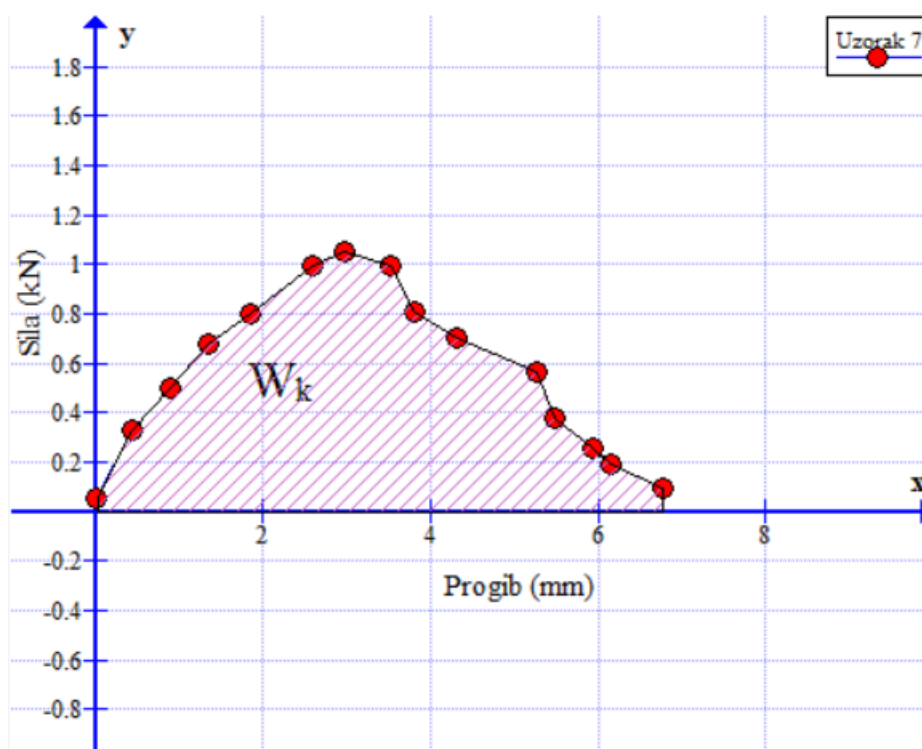


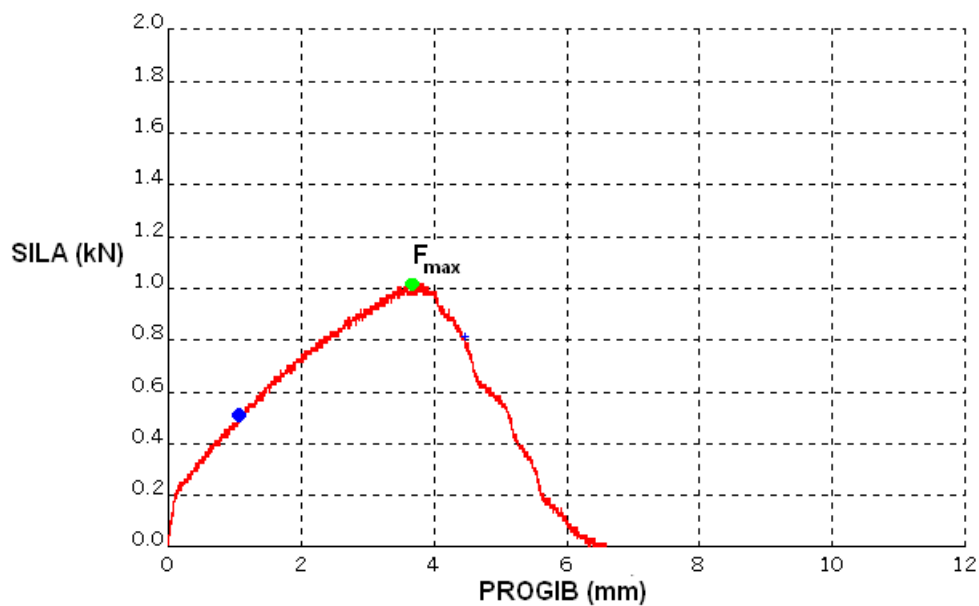
Slika 66. Krivulja sila – progib, uzorak 6

Slika 67. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 6

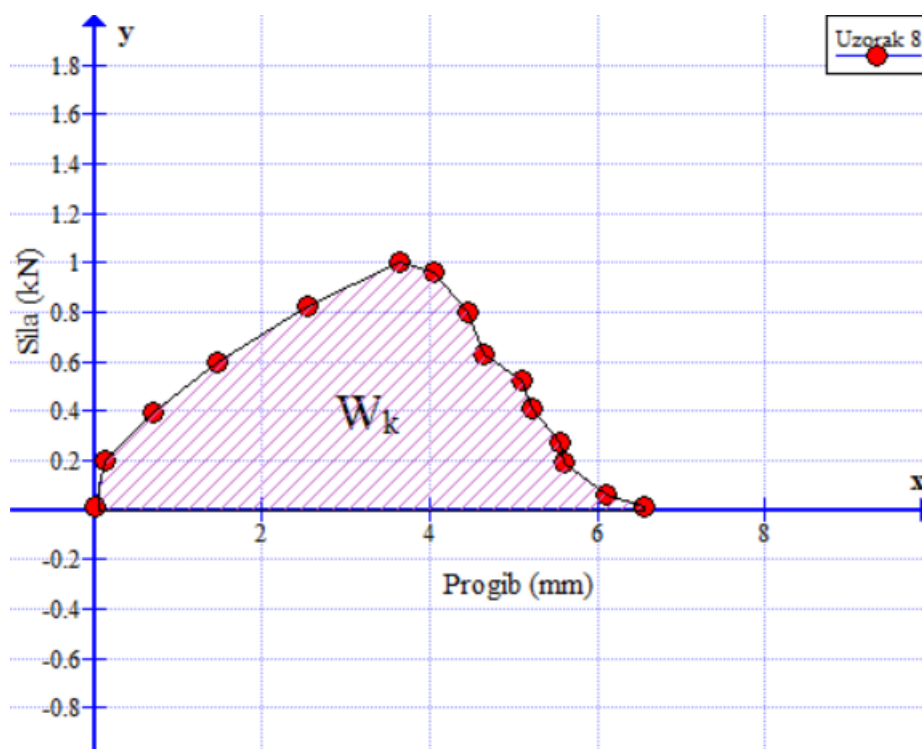


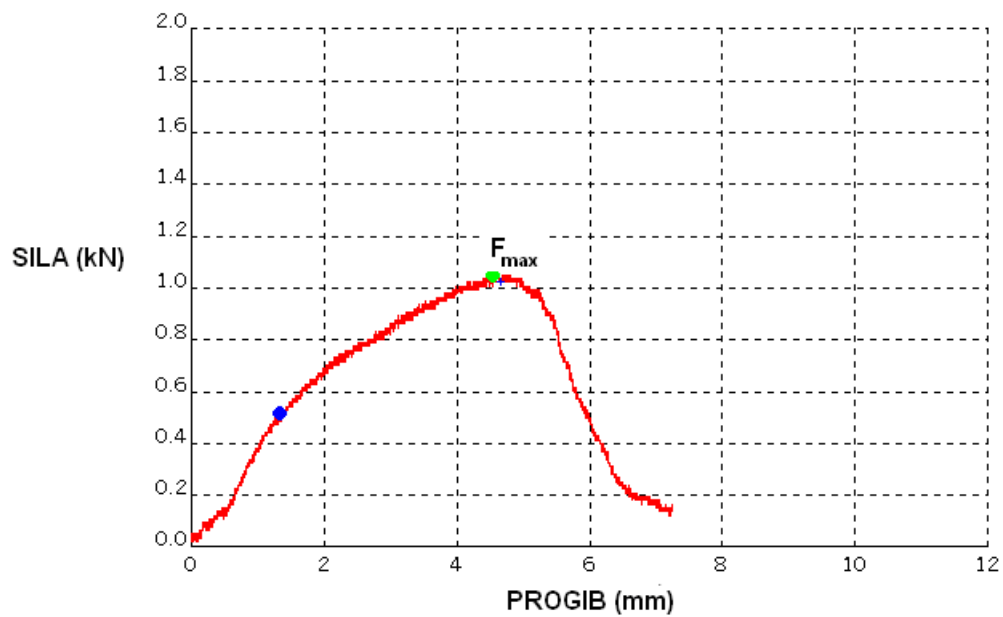
Slika 68. Krivulja sila – progib, uzorak 7

Slika 69. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 7

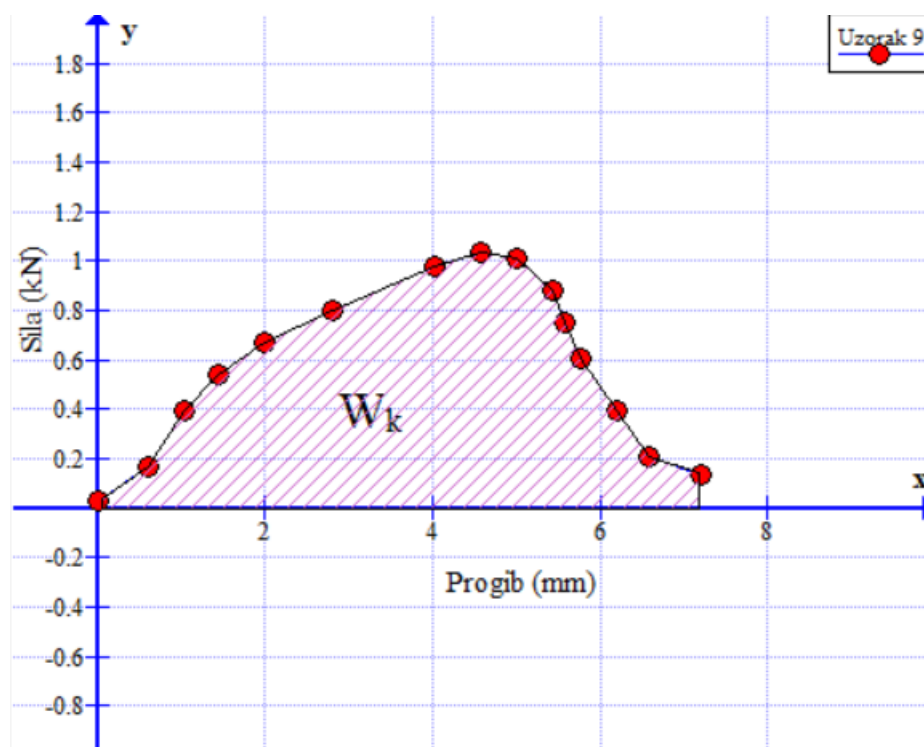


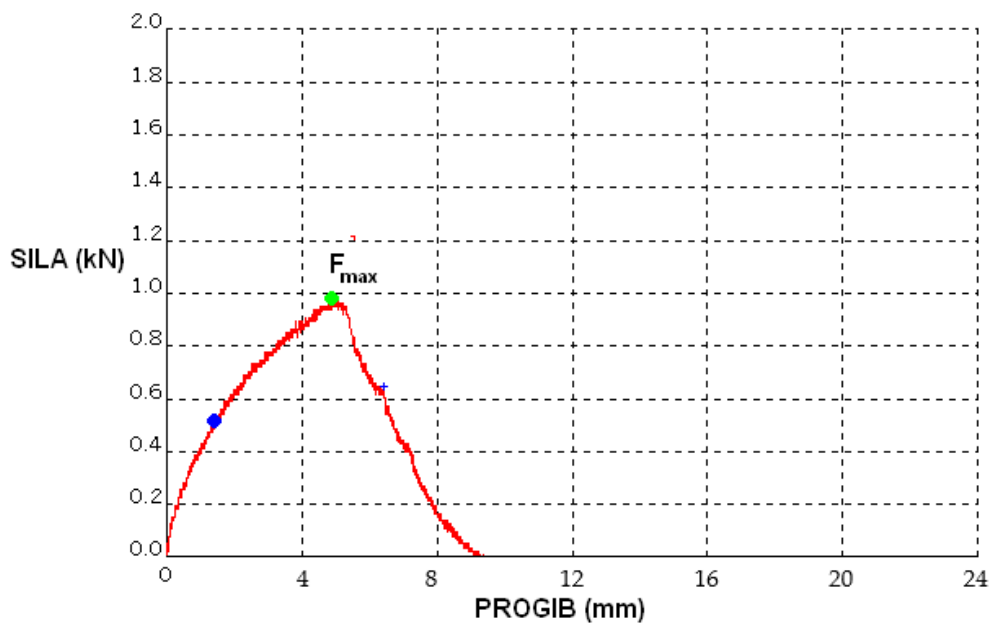
Slika 70. Krivulja sila – progib, uzorak 8

Slika 71. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 8

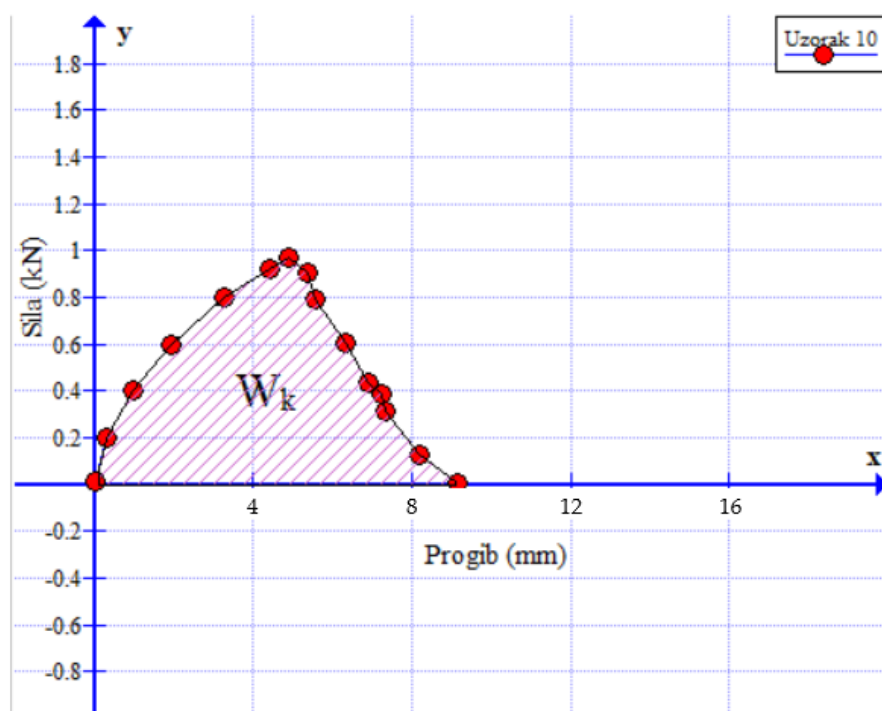


Slika 72. Krivulja sila – progib, uzorak 9

Slika 73. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 9



Slika 74. Krivulja sila – progib, uzorak 10

Slika 75. Konvertirani dijagram sila – progib u programskom paketu *Graph*, uzorak 10