

Iskoristivost apsorpcije energije aluminijskih pjena

Mišur, Ivo

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

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:235:033891>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Ivo Mišur

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc.dr.sc. Krešimir Grilec

Ivo Mišur

Zagreb, 2011.

SAŽETAK

Metalne pjene su relativno nova vrsta i oblik materijala koji se razvijaju na osnovi oponašanja strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala. Prednosti su im niska gustoća, relativno visoka krutost, dobra toplinsko-izolacijska svojstva, a nedostaci nedovoljno poznavanje strukture i visoka cijena. Osobito je zanimljivo ponašanje metalnih pjena pri tlačnom opterećenju pri čemu pokazuju odličnu apsorpciju energije.

U ovom radu opisati će se svojstva metalnih pjena sa posebnom pažnjom usmjerenom na mehanička svojstva te na sposobnost apsorpcije energije. Obraditi će se eksperimentalni podaci uzeti iz diplomskih i završnih radova studenata koji su ispitivali metalne pjene te izračunati iskoristivost apsorpcije energije pri raznim parametrima ispitivanja.

Sadržaj

Popis slika.....	I
Popis tablica.....	V
Popis oznaka.....	VI
Grčke oznake.....	VII
Izjava.....	VIII
1.Uvod	1
2.Svojstva metalnih pjena	2
2.1.Mehanička svojstva metalnih pjena	2
2.1.1. Krutost	4
2.1.2.Tlačna čvrstoća	5
2.1.3. Vlačna čvrstoća.....	7
2.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju- umor.....	9
2.1.5. Osjetljivost na ureze.....	11
2.1.6 Ponašanje pri puzanju	12
2.2 Ostala svojstva	15
2.2.1Toplinska svojstva metalnih pjena	15
2.2.2 Zvučna svojstva metalnih pjena	16
2.2.3.Prigušenje vibracija metalnih pjena.....	17
2.2.4.Električna svojstva metalnih pjena.	19
3. Spajanje metalnih pjena	20
4.Primjena etalnih pjena	22
5.Apsorpcija energije udara	29
5.1 Općenito o apsorpciji energije udara	29
5.2 Propagacija udarnog vala	35
5.3 Teoretski model određivanja apsorbirane energije i iskoristivosti	37
5.4. Iskoristivost apsorpcije energije udara.....	40
6 .Eksperimentalni dio.....	42
6.1.Uvod.....	42
6.2.Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena proizvedenih u jamskoj peći prema [9]	43

6.3. Apsorpcije energije aluminijskih pjena proizvedenih u jamskoj peći prema [1].....	46
6.4 Apsorpcije energije aluminijskih pjena proizvedenih u zvonastoj peći prema [3]	48
6.5Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena proizvedenih u komornoj peći prema [4]....	50
6.6 Apsorpcija energije udara ojačanih aluminijskih pjena	54
6.7 Analiza dobivenih rezultata	58
6.7.1. Utjecaj oblika poprečnog presjeka	58
6.7.2. Utjecaj kemijskog sastava	62
6.7.3. Utjecaj gustoće	65
6.7.4 Utjecaj vrste peći	66
6.7.5. Utjecaj brzine tlačenja	69
6.7.6 Utjecaj ojačala	70
7. Zaključak	71

Popis slika:

Slika 2.1. a) zatvorena ćelija	4
b) otvorena ćelija metalne pjene.....	4
Slika 2.2.Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena.....	5
Slika 2.3. Dijagram naprezanje-deformacija metalnih pjena pri tlačnom opterećenju	5
Slika 2.4.Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći	6
Slika 2.5. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja materijala ćelija (R_e) o relativnoj gustoći.....	7
Slika 2.6 Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti.....	8
Slika 2.7. Dijagram naprezanja –istezanja Al pjena.....	8
Slika 2.8. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće napravljeni od CYMAT metalne pjene.....	9
Slika 2.10Prikaz ovisnosti umora pri maksimalnom broju ciklusa o relativnoj gustoći nekih Al-pjena.....	10
Slika 2.11. Način 1. Skraćenje Al pjene u uvjetima umora izazvano tlačnim opterećenjima	10
Slika 2.12. Način 2. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja	11
Slika 2.13. Način 3. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja.	11
Slika 2.14.Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja	12
Slika 2.15. Urezna čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ($R = 0,1$) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom	12
Slika 2.16 Prikaz dužinske deformacija pri puzanju u ovisnosti o vremenu za Al-pjene otvorenih ćelija kod (a) vlačnog i (b) tlačnog opterećenja.....	14
Slika.2.17. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al	17
Slika.1.18. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode.....	18
b) funkcija prigušenja	18
Slika.2.19. Mjerenje električnih svojstava metalnih pjena kontaktom u četiri točke..	20
Slika 3.1. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena.....	22
Slika 4.2. Primjer sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene	24
Slika 4.3. Primjena metalnih pjena u autoindustriji	24
Slika 4.4. Branik automobila napravljen od aluminijske pjene	25

Slika 4.5. Udarni test nosača motora BMW-a	25
Slika 4.6. Izmjenjivač topline	26
Slika 4.6. Grijaća ploča napravljena od Alporas ojačane pjene	26
Slika 4.7. Raspored topline u običnoj grijaćoj ploči (lijevo) i Alporas grijaćoj ploči (desno)	26
Slika 4.8. Vijadukt čija je donja površina izvedena od metalne pjene	27
Slika 4.9. Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena	28
Slika 4.10. Filter od metalne pjene na bazi bronce	28
Slika 4.11. Lijevani proizvod od aluminijske pjene	29
Slika 4.12. Predmeti od metalnih pjena za estetske svrhe	29
Slika 4.13. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklene pjene	29
Slika 5.12-D prikaz deformacije i efekta apsorpcije energije kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama	29
Slika 5.2 Shematski dijagram naprezanje-deformacija idealnih metalnih pjena.....	31
Slika 5.3. Krivulje koje pokazuju apsorpciju energije pri a) savijanju b) tlaku	31
Slika 5.4 Dijagram naprezanje-deformacija otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) metalnih pjena.....	32
Slika 5.5. Apsorpcija energije po jedinici volumena pri 25% deformaciji za dostupne komercijalne metalne pjene	33
Slika 5.6 Prikaz vrijednosti tlačne čvrstoće u ovisnosti o gustoći za komercijalne metalne pjene.....	33
Slika 5.7. Prikaz specifične krutosti u ovisnosti o specifičnoj čvrstoći za komercijalno dostupne metalne pjene.....	34
Slika 5.8. Krivulja naprezanje-deformacija	36
Slika 5.9. Pojednostavljeni model dijagrama tlačnog naprezanja - relativnog skraćanja za ćelijaste materijale	40
Slika 5.10. Dijagram tlačnog naprezanja i apsorpcijske iskoristivosti po relativnom skraćanju AlSi pjene ($\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$)	41
Slika 5.11. Apsorbirana deformacijska energija (lijevo, crvena) i energija idealnog apsorpcijskog materijala (desno, zeleno).....	41
Slika 6.1. Kidalica WPM EU 40 mod.....	41
Slika 6.2 Jamska peć.....	43

Slika 6.3. Kalup u peći na 850 Celzijusa.....	46
Slika 6.4 Zvonasta peć.....	48
6.5. tehničke karakteristike zvonaste peći.....	48
Slika 6.6 Komorna peć.....	50
Slika 6.7 Zvonasta peć	54
Slika 6.8. Kalupi unutar peći prilikom izrade aluminijskih pjena.....	54
Slika 6.9 Usporedba 470 MAT cilindar i 470 MAT kvadrat iz [9].....	58
Slika 6.10 Usporedba 600 SJAJ cilindar i 600 SJAJ kvadrat iz [9].....	58
Slika 6.11 Usporedba 470 MAT okrugla i 470 MAT kvadrat prema [1].....	59
Slika 6.12 Usporedba 450 SJAJ cilindar i 450 SJAJ prema [4].....	59
Slika 6.13 Usporedba 600 SJAJ cilindar i 600 SJAJ prema [4].....	59
Slika 6.14 Usporedba 900 SJAJ cilindar i 900 SJAJ prema [4].....	60
Slika 6.15 Usporedba 450 MAT cilindar i 450 MAT prema [4].....	60
Slika 6.16 Usporedba 600 MAT cilindar i 600 MAT prema [4].....	60
Slika 6.17 Usporedba 900 MAT cilindar i 900 MAT prema [4].....	61
Slika 6.18 Usporedba 470 MAT kvadrat i 470 SJAJ kvadrat prema [9].....	62
Slika 6.19 Usporedba 470 MAT okrugla i 470 SJAJ okrugla prema [1].....	62
Slika 6.20 Usporedba 450 MAT cilindar i 450 SJAJ cilindar prema [4].....	62
Slika 6.21 Usporedba 450 MAT i 450 SJAJ prema [4].....	63
Slika 6.22 Usporedba 600 MAT cilindar i 600 SJAJ cilindar prema [4].....	63
Slika 6.23 Usporedba 600 MAT i 600 SJAJ prema [4].....	63
Slika 6.24 Usporedba 900 MAT cilindar i 900 SJAJ cilindar prema [4].....	64
Slika 6.25 Usporedba 900 MAT i 900 SJAJ prema [4].....	64
Slika6.26 Usporedba 450 SJAJ cilindar, 600 SJAJ cilindar i 900 SJAJ cilindar prema [4].....	65
Slika6.27 Usporedba 450 MAT cilindar, 600 MAT cilindar i 900 MAT cilindar prema [4].....	65

Slika6.28 Usporedba 450 MAT, 600 MAT i 900 MAT prema [4].....	65
Slika6.29 Usporedba 450 SJAJ, 600 SJAJ i 900 SJAJ prema [4].....	66
Slika6.30 Usporedba 470 MAT kvadrat, 470 MAT kvadrat i 450 MAT prema [9] ,[1]i [4].....	67
Slika6.31 Usporedba 470 MAT cilindar, 470 MAT okrugla i 450 MAT cilindar prema [9],[1] i [4].....	67
Slika 6.32 Usporedba 470 SJAJ okrugla i 450 SJAJ cilindar prema [1] i [4].....	67
Slika 6.33 Usporedba 600 SJAJ cilindar i 600 SJAJ cilindar prema [9] i [4].....	68
Slika 6.34 Usporedba 1200 MATm i 1200 MATv prema [3].....	69
Slika 6.35 Usporedba 1430 MATm i 1430 MATv prema [3].....	69
Slika 6.36 Usporedba ozoraka ojačanih oprugama, šipkama, limovima te neojačanih uzoraka prema [2].....	70

Popis tablica :

Tablica 2.1. Izrazi za računanje svojstava metalnih pjena	3
Tablica 2.2 Mehanička svojstva metalnih pjena	3
Tablica 2.3. Električna otpornost metalnih pjena.....	19
Tablica 4.1. Moguća primjena metalnih pjena	22
Tablica 6.1 Testirani uzorci cilindričnog presjeka aluminijskih pjena diplomskog rada Petra Bobeka pod nazivom Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena	44
Tablica 6.2. Testirani uzorci kvadratnog presjeka aluminijskih pjena diplomskog rada Petra Bobeka pod nazivom Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena.	45
Tablica 6.3. Iskoristivost apsorpcije energije uzoraka iz [9].....	45
Tablica 6.4. Testirani uzorci aluminijskih pjena prema [1].....	46
Tablica 6.5 Iskoristivost apsorpcije energije aluminijskih pjena prema [1].....	47
Tablica 6.6. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti svih uzoraka u [3].....	49
Tablica 6.7. Iskoristivost apsorpcije energije udara prema [3].....	49
Tablica 6.8. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti svih uzoraka u [4].....	51
Tablica 6.9. Iskoristivost apsorpcije energije prema [4].....	52
Tablica 6.10. Iskoristivost apsorpcije energije prema [4].....	53
Tablica 6.11. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti uzoraka ojačanih oprugom [2].....	55
Tablica 6.12. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti uzoraka ojačanih šipkama [2].....	55
Tablica 6.13. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti uzoraka ojačanih limom [2].....	56
Tablica 6.14. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije materijala ojačanih oprugom pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN.....	56
Tablica 6.15. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije materijala ojačanih šipkom pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN.....	57
Tablica 6.16. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije materijala ojačanih limom pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN.....	57
Tablica 6.17. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije neojačanih materijala pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN.....	57

Popis oznaka

A ,	površina, mm ²
a^* ,	negativno ubrzanje, m/s ²
C ,	konstanta
C_p ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, J/kgK
C_v ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom volumenu, J/kgK
E ,	modul elastičnosti, GPa
E_f ,	modul savitljivosti, GPa
E_i ,	iskoristivost apsorpcijske energije
F ,	sila, N
F_{max} ,	maksimalna sila elastične deformacije, N
G ,	modul smičnosti, GPa
h ,	debljina stjenke paketa od metalne pjene, mm
H ,	tvrdoća
k ,	nagib krivulje
K_{IC} ,	lomna žilavost, MPa · m ^{1/2}
L ,	latentna toplina taljenja, kJ/kg
L_0 ,	početna mjerna duljina, mm
m ,	masa, kg
R_d ,	dinamička izdržljivost, MPa
R_e ,	granica tečenja materijala pjene, MPa
R_{et} ,	granica stlačivanja, MPa
R_m ,	vlačna čvrstoća, MPa
R_{mt} ,	tlačna čvrstoća, MPa
s ,	skraćenje, mm
S_0 ,	ploština poprečnog presjeka, mm
T_m ,	talište, K
T_{max} ,	maksimalna radna temperatura, K
T_{min} ,	minimalna radna temperatura, K

v ,	brzina, m/s
W ,	apsorpcija energije po jedinici volumena, MJ/m ³
x ,	veličina relativnog skraćenja u točki D, mm/mm
y ,	veličina tlačnog naprezanja u točki D, N/mm ²

Grčke oznake

α ,	koeficijent toplinske rastezljivosti, 1/K
γ ,	električna vodljivost, $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
ε ,	deformacija, sabijanje, relativno skraćenje, mm/mm ili %
ε_0 ,	relativno skraćenje, mm/mm
ε_D ,	deformacija pri zgušnjavanju, mm/mm ili %
ε_t ,	vlačna duktilnost
ε_s ,	sabijanje, mm/mm
η ,	iskoristivost apsorbirane energije
η^c ,	faktor gubitka, %
λ ,	koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
ν ,	Poissonov faktor
ρ ,	gustoća metalne pjene, kg/m ³
ρ_s ,	gustoća neporoznog metala, kg/m ³
ρ/ρ_s ,	relativna gustoća
σ ,	naprezanje, MPa
σ_c ,	tlačno naprezanje, N/mm ²
σ_t ,	tlačno naprezanje, N/mm ²

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Koristim ovu priliku da se zahvalim na stručnoj pomoći doc.dr.sc. Krešimiru Grilecu i kolegama na Katedri za materijale i tribologiju.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama koje sam upoznao tijekom studiranja na stručnoj pomoći, te svojoj obitelji na potpori i razumijevanju.

Ivo Mišur

U Zagrebu 20. siječnja 2011.

1.Uvod

Metalne pjene su relativno nova skupina materijala sa nedovoljno ispitanim mehaničkim, toplinskim, električnim i akustičnim svojstvima. Osim djelomično neistraženih svojstava ono što ih čini zanimljivim je njihova struktura koja je proizašla iz pokušaja oponašanja prirodnih ćelijstih građa i struktura te njihovog prilagođavanja za tehničku primjenu. U prirodi slične strukture možemo vidjeti kod drva, koralja, kosti, kamena...

Metalne pjene objedinjuju laganu strukturu sa mogućnošću dobre apsorpcije energije. Lagana struktura prizlazi iz visoke poroznosti koja iznosi od 40 do 90 % koja uz oblik i veličinu ćelije te vrstu osnovnog materijala određuje svojstva.

Svojstva pjena se reguliraju promjenom parametara procesa proizvodnje čime se primarno utječe na građu pjena. Lagane su i imaju veliku specifičnu krutost. Neotrovne su i moguće ih je reciklirati. Metalne pjene se smatraju isplativima za primjenu ako posjeduju dobra toplinsko-izolacijska svojstva, otpornost na koroziju, mogućnost apsorpcije energije udara i elektromagnetskih valova.

Glavni nedostaci očituju se u nepoznavanju fizikalnih svojstava i premalom znanju o njihovim strukturnim karakteristikama kao i ostalim svojstvima što je i razlog njihove male primjene u inženjerskoj praksi. Glavni problem šire komercijalne uporabe je njihova visoka cijena.

Daljnjim istraživanjima i snižavanjem cijena u budućnosti metalne pjene će naći široku primjenu u svim granama industrije.

1.Svojstva metalnih pjena

Svojstva materijala određena su kemijskim sastavom, struktura, te načinom izrade i obrade, a značajan utjecaj imaju dimenzije te način pripreme uzorka za ispitivanje. Metalne pjene posjeduju vrlo nepravilnu tj. kaotičnu građu i zbog toga, prilikom istog načina ispitivanja, rezultati često variraju i za nekoliko desetaka postotnih iznosa što smanjuje kredibilitet metalne pjene u direktnoj primjeni. Zbog toga se ispitivanja metalnih pjena provode po mnogo strožim kriterijima nego kod materijala pune gustoće.

2.1 Mehanička svojstva metalnih pjena

Najveća prednost metalnih pjena u odnosu na metale od kojih su dobivene je njihova vrlo mala masa što rezultira izradom izrazito lakih konstrukcija kojima se danas teži zato što se njima ostvaruju uštede u masi i druge prednosti. Svaka konstrukcija za vrijeme svog radnog vijeka je pod utjecajem statičkih i dinamičkih mehaničkih opterećenja, toplinskih opterećenja te ostalih naprezanja koja u krajnjem slučaju mogu dovesti do zatajenja konstrukcije ili čak i loma. Da bi se mogao odrediti podoban materijal za neku konstrukciju, potrebno je što točnije odrediti mehanička svojstva metalnih pjena, kao što su:

- tlačna čvrstoća
- vlačna čvrstoća
- modul elastičnosti
- modul smičnosti
- dinamička izdržljivost
- tvrdoća
- otpornost na umor
- otpornost na puzanje

Tablica 2.1. Izrazi za računanje svojstava metalnih pjena [1]

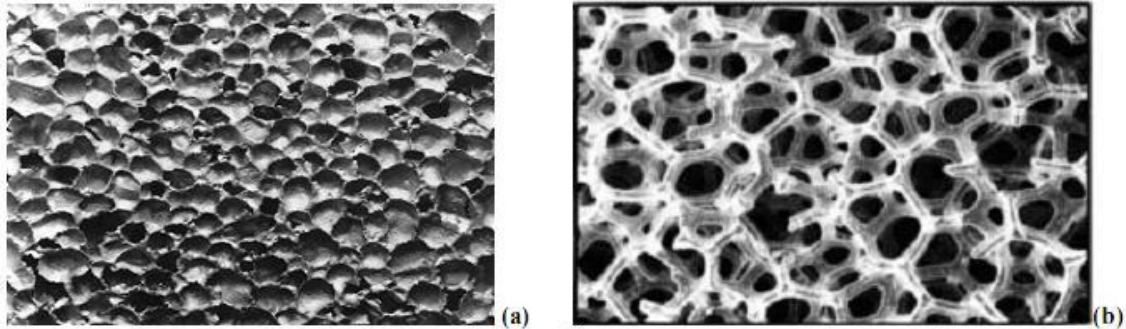
Mehaničko svojstvo	Otvorene ćelije	Zatvorene ćelije
Modul elastičnosti, (GPa), E	$E = (0,1-4) \cdot E_s \cdot (\rho/\rho_s)^2$	$E = (0,1-1) \cdot E_s \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^2 + 0,3(\rho/\rho_s))$
Modul smičnosti, (GPa), G	$G \approx (3/8) \cdot E$	
Modul savitljivosti, (GPa), E_f	$E_f \approx E$	
Tlačna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

Napomena: Indeks "s" u oznaci odnosi se na svojstva osnovnog materijala

Tablica 2.2. Mehanička svojstva metalnih pjena [1]

Svojstvo, (jedinica), simbol	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	INCO
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
Struktura, (tip ćelije)	Zatvorene			Otvorene	
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	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 zguščivanju, ϵ_D	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost, (-), 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 temperatura, (K), T_{max}	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Min. radna temperatura, (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, ($10^{-8} \Omega m$), R	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500

Metalne pjene imaju širok raspon svojstava tako da im je i veliko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja. Kada se usporede pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama, vidljivo je da su im mehanička svojstva uglavnom na jednakoj razini, no otvorene ćelije imaju ipak nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće.



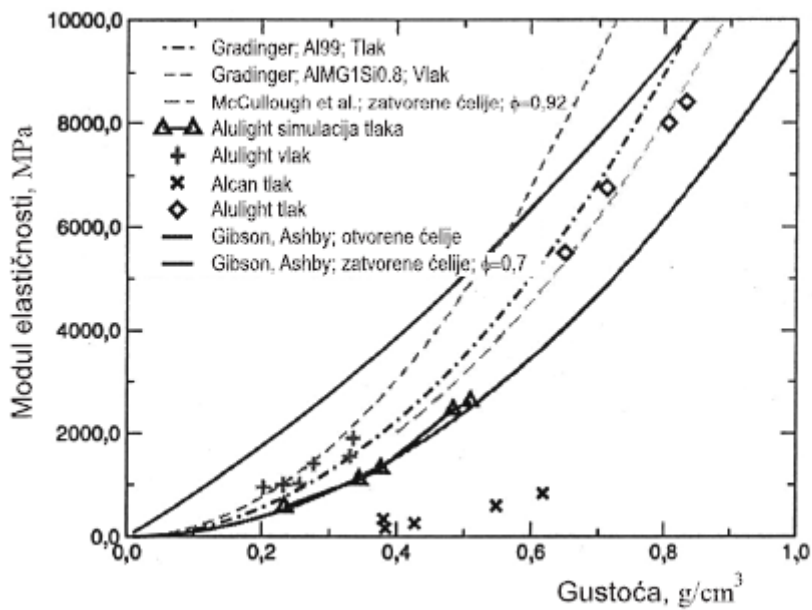
Slika 2.1. a) zatvorena ćelija [1]

b) otvorena ćelija metalne pjene [1]

2.1.1. Krutost

Vrsta i krutost ćelijastih materijala ovise o njihovoj gustoći. Povećanje pravilnosti strukture uzrokuje porast krutosti Al pjena. Krutost snizuju i nepravilnosti poput zavojitih stijenki ćelija, nehomogenosti kao što su nejednolika veličina čvorova i velike napukline.

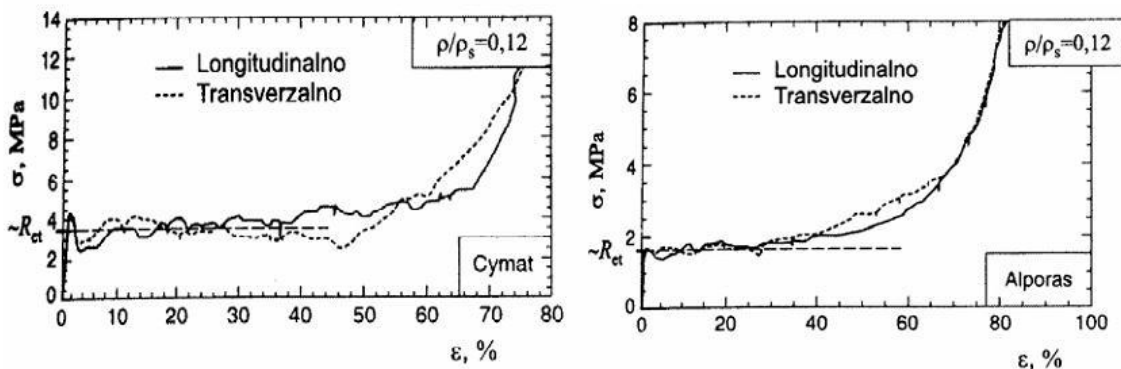
Teorijske pretpostavke, koje su postavili Gibson i Ashby, zasnivaju se na pretpostavci pravilne građe metalnih pjena, kod koje nisu uzeti u obzir lokalne pojave nestabilnosti (lokalno izvijanje). Kod pjena sa zatvorenim ćelijama ispitni podaci su manji od očekivanih teorijskih dok kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama Gibsonove i Ashbyeve pretpostavke odgovaraju podacima utvrđenim ispitivanjem. Pjene sa zatvorenim ćelijama niske gustoće pokazuju vrijednosti krutosti koje su približno jednake vrijednostima predviđenim za pjene s otvorenim ćelijama. Objašnjenje za niže vrijednosti krutosti u odnosu na predviđene nalazi se u mikrostrukturi materijala.



Slika 2.2. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena, [3]

2.1.2. Tlačna čvrstoća

Slika 3.2. prikazuje dijagram “naprezanje-skraćenje” pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje realnih Al pjena (s otvorenim ćelijama).



Slika 2.3. Dijagram naprezanje-deformacija metalnih pjena pri tlačnom opterećenju [3]

Početno opterećenje izaziva elastičnu deformaciju. Neke ćelije počinju teći već pri vrlo malim opterećenjima pa početna linija nije pravac i manjeg je nagiba od nagiba koji odgovara stvarnom modulu elastičnosti. Modul elastičnosti pri tlačnom opterećenju je za 10% niži od modula elastičnosti pri vlačnom opterećenju. Anizotropija oblika ćelija dovodi do bitnih razlika (30%) između modula elastičnosti u različitim smjerovima.

Empirijske veze između granice stlačivanja, deformacije zgušnjavanja i relativne gustoće izražene su u obliku:

$$R_{et} = (0,25 - 0,35) \cdot R_e \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m$$

$$\varepsilon_D \approx \left(1 - \alpha_1 \cdot \frac{\rho}{\rho_s}\right)$$

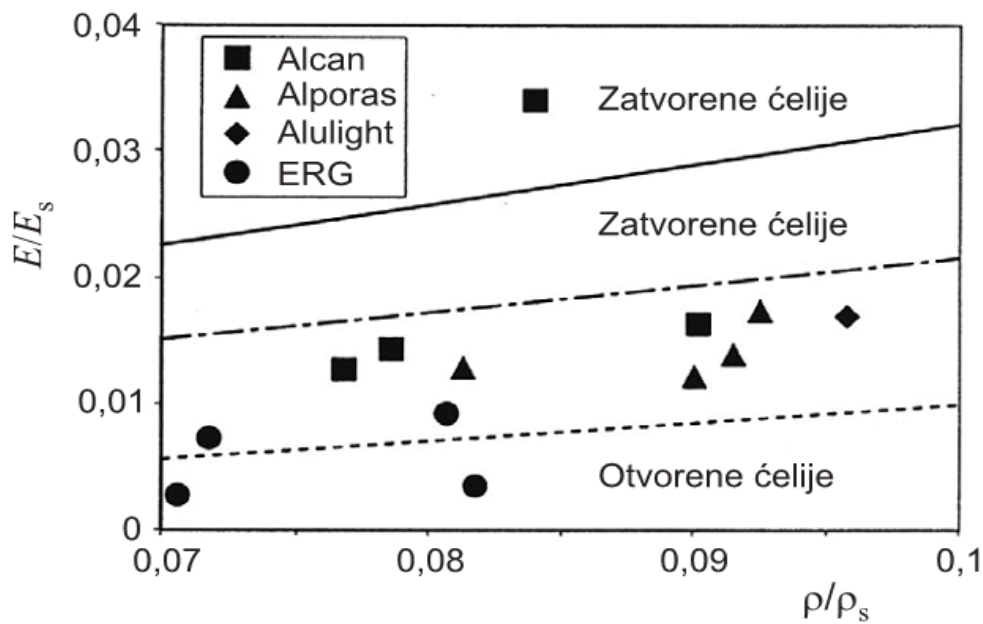
R_{et} - granica stlačivanja (engl.plateau stress)

ε_D - konačna deformacija zgušnjavanja

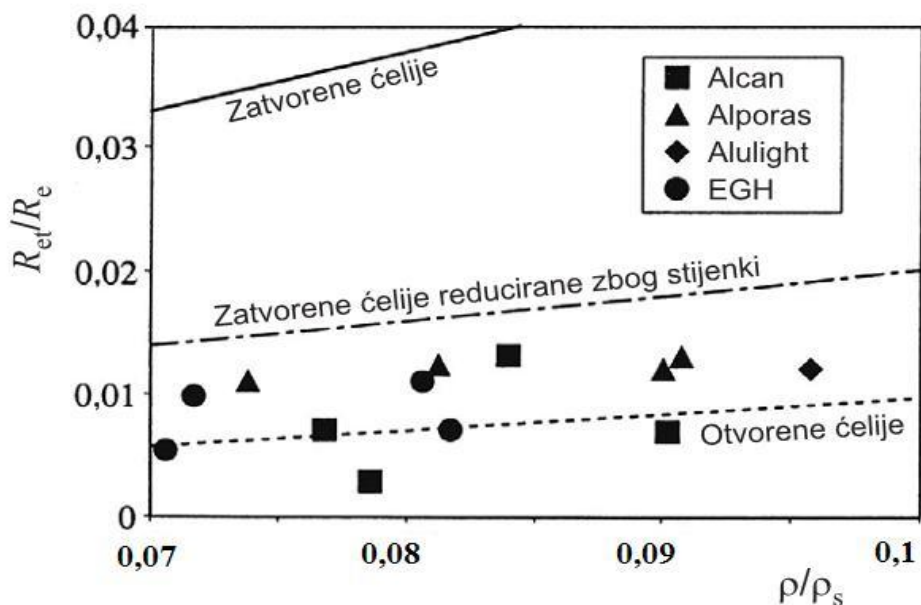
R_e - granica tečenja materijala pjene

m - eksponent koji iznosi 1,5-2

α_1 – koeficijent koji se kreće u rasponu 1,4-2,0



Slika 2.4. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći [1]



Slika 2.5. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja materijala ćelija (R_e) o relativnoj gustoći [1]

2.1.3. Vlačna čvrstoća

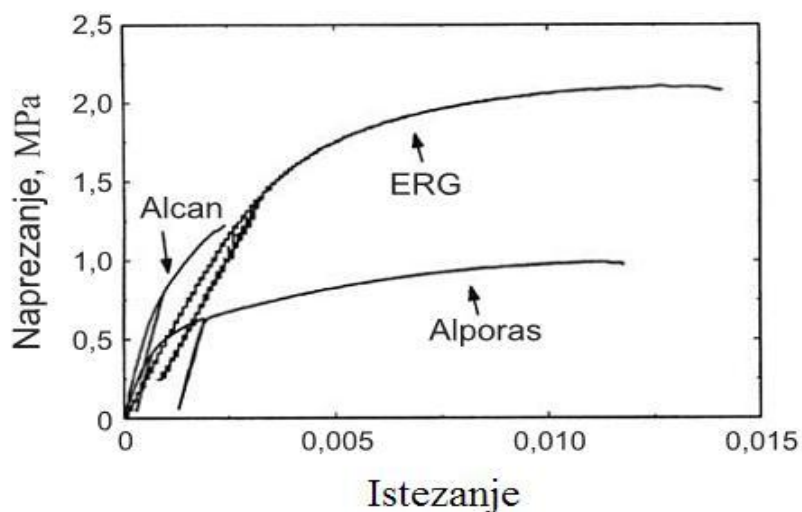
Vlačna čvrstoća ispituje se na epruvetama u obliku kosti ili u obliku cilindra.

ASTM E8 - 96a norma propisuje odvajanje i obradu uzoraka. Za glavne dimenzije uzoraka uzimaju se debljina kod uzorka u obliku pseće kosti i promjer kod cilindričnog .



Slika 2.6 Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti [5]

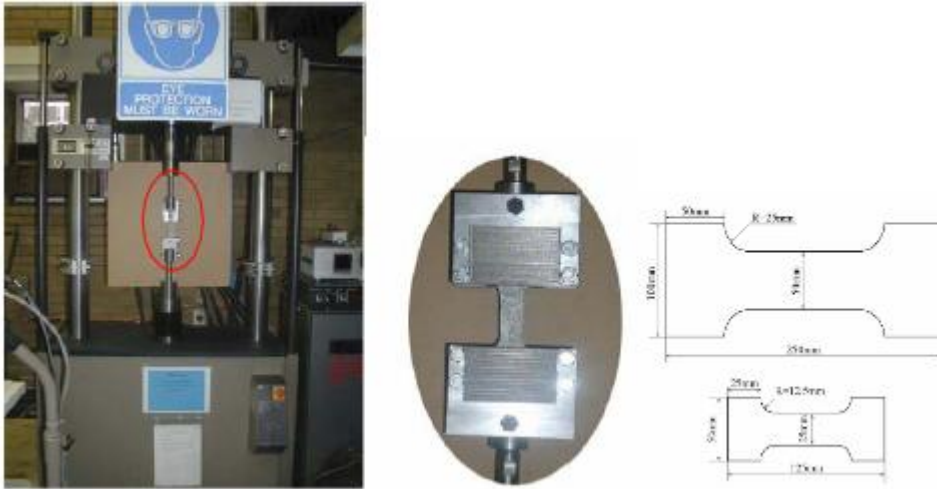
Omjer tih dimenzija i veličine ćelije mora biti veći od 7. Ekstenzimetrom se mjeri istezanje tako da se ekstenzimetar pričvrsti na dio uzorka gdje dolazi do lomova. Videoekstenzimetra ili laserskim ekstenzimetrom vrše se varijacije ispitivanja. Pomoću videoekstenzimetra, koji sadrži digitalnu kameru bilježe se deformacije uzorka s urezom i poprečno istezanje uzorka bez ureza, te se uočavaju inicijalne napukline u materijalu i njeno širenje. Laserski ekstenzimetar, upotrebom laserske zrake koja prelazi po uzorku duž glavne osi, mjeri deformacije iz kojih se računa istezanje.



Slika 2.7. Dijagram naprezanje-istezanje Al pjena [1]

Navedena ispitivanja pokazuju da je ponašanje metalnih pjena i žilavih metala vrlo slično. Linearno područje dosta je malo te se i prijelaz u plastično područje

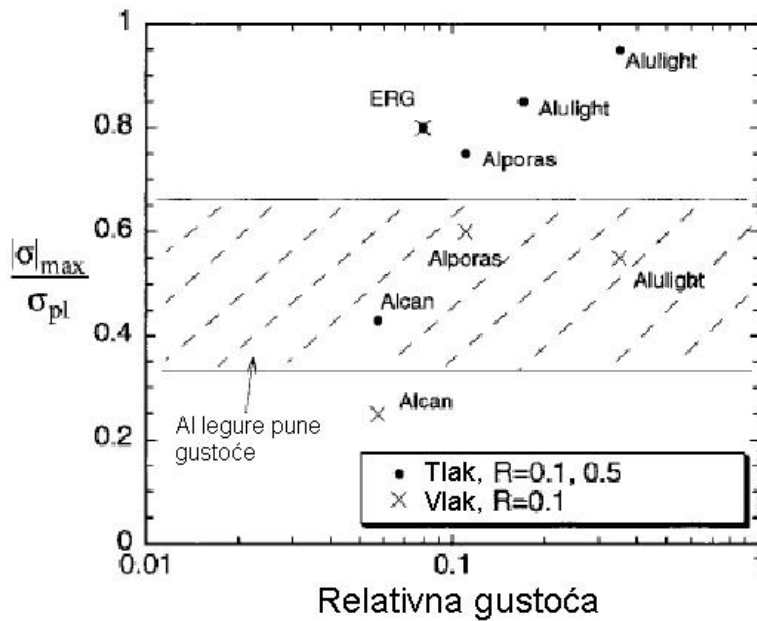
dogaća pri nižim naprezanjima. Objašnjenje za to pronalazimo u nehomogenosti građe na koju utječu pogreške u stijenkama ćelija.



Slika 2.8. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće napravljene od CYMAT metalne pjene, [5]

2.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju- umor

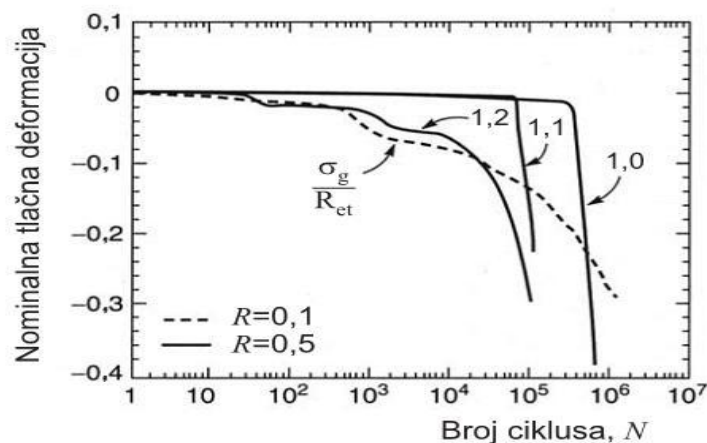
Umor materijala je dugotrajno djelovanje promjenjivog (dinamičkog) naprezanja zbog kojeg dolazi do postupnog razaranja materijala te na kraju prijeloma. Dinamička izdržljivost je mehaničko svojstvo koje karakterizira otpornost materijala na umor materijala. Promjenjiva ciklička opterećenja mogu biti tlačnog i vlačnog karaktera.



Slika 2.10. Prikaz ovisnosti umora pri maksimalnom broju ciklusa o relativnoj gustoći nekih Al-pjena. [3]

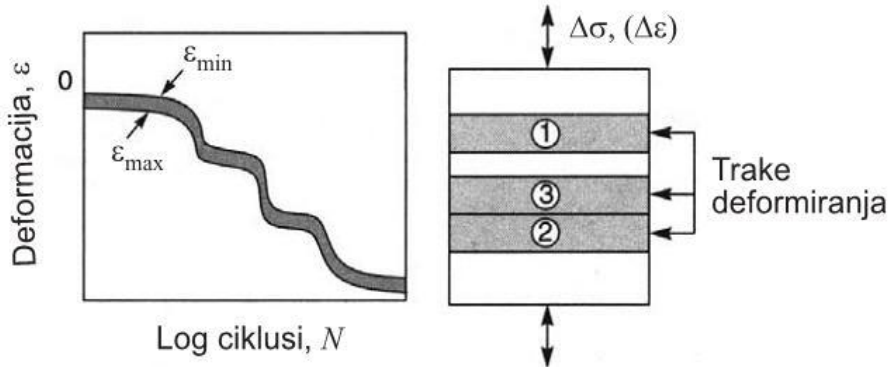
Pri djelovanju promjenjivog naprezanja metalne pjene se mogu ponašati na tri različita načina.

Prvi način: U materijalu se akumuliraju deformacije, ipak nisu vidljivi znaci širenja lomnog područja.



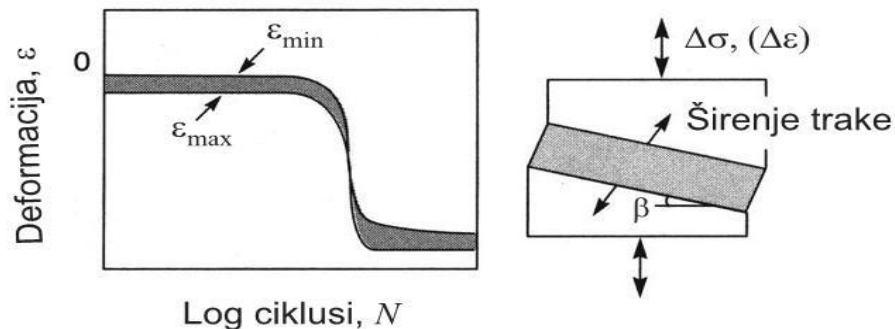
Slika 2.11. Način 1. Skraćenje Al pjene u uvjetima umora izazvano tlačnim opterećenjima [3]

Drugi način: Lomna područja stvaraju se na nepredvidivim unutarnjim stranama materijala. Napukline prvo nastaju na najslabijem dijelu, a trajanjem opterećenja lomna područja se razvijaju po cijelom materijalu.



Slika 2.12. Način 2. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [4]

Treći način: Zbog djelovanja opterećenja stvara se jedna napuklina u obliku trake i širi se preko cijelog materijala.



Slika 2.13. Način 3. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [4]

2.1.5. Osjetljivost na ureze

Djelovi se izrađuju s provrtima ili urezima zbog funkcionalnosti. Eksperimentalno je potvrđeno da pjene nisu osjetljive na ureze ili provrte ako je opterećenje statički tlačno, (slika16.), a može se izraziti formulom:

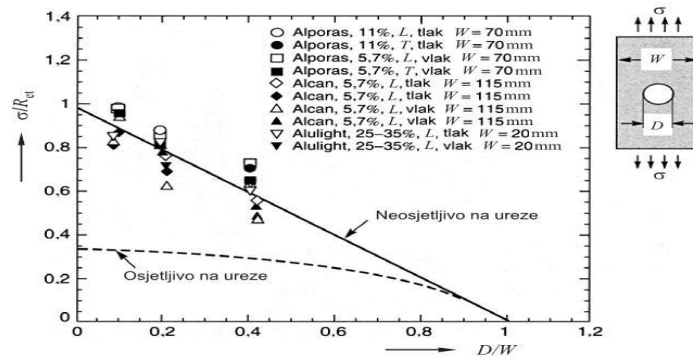
$$\sigma = R_{mt} (1 - (D/W))$$

gdje je: σ – nominalno naprezanje,

R_{mt} – tlačna čvrstoća,

W – širina ispitivane ploče

D – promjer provrta.



Slika 2.14. Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja [3]

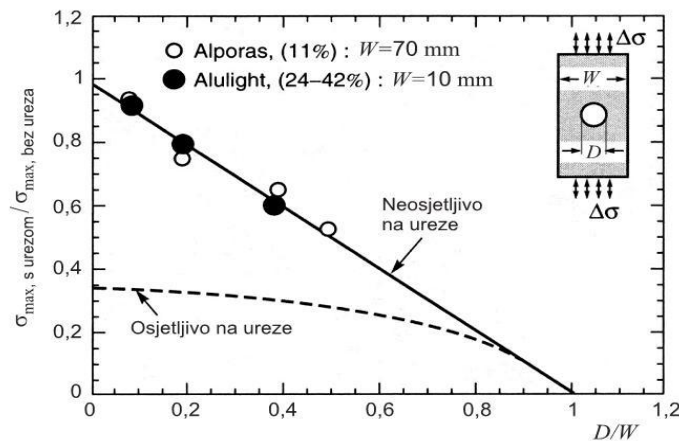
Pri određivanju osjetljivosti na ureze u uvjetima tlak-tlak promjenjivog opterećenja potrebno je odrediti maksimalno naprezanje na uzorku s urezom ili provrtom, a na osnovi geometrije uzorka i maksimalnog naprezanja na uzorku bez ureza:

$$\sigma_{max, p} = (1 - (D/W)) \sigma_{max, bp}$$

gdje je: $\sigma_{max, p}$ – maksimalno naprezanje uzorka s provrtom

$\sigma_{max, bp}$ – maksimalno naprezanje uzorka bez provrta.

Moguća su dva mehanizma loma: krhko ponašanje kada zbog izjednačenja lokalnih naprezanja s vlačnom čvrstoćom dolazi do loma na rubu provrta, ili žilavo ponašanje; plastičnost u blizini provrta dovoljna je da razgradi koncentraciju elastičnih naprezanja koja može dovesti do loma



Slika 2.15. Urezna čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ($R = 0,1$) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom [3]

2.1.6 Ponašanje pri puzanju

Puzanje je toplinski aktivirani ireverzibilni proces pri kojem dolazi do deformacije materijala dugotrajnim utjecajem konstantnog opterećenja pri nekoj konstantnoj povišenoj temperaturi. Puzanje metalnih pjena ovisi direktno o temperaturi tališta, mikrostrukturi, vrsti atomske veze i kristalne rešetke. Glavni mehanizam puzanja je kombinacija naprezanja i temperature, kod malih naprezanja i visokih temperatura ($T/T_m > 0.8$) tijekom difuzije atoma duž granica zrna ili unutar zrna može postati dominantni mehanizam, dok pri višim naprezanjima i nižim temperaturama ($0.3 < T/T_m < 0.8$) dominantni mehanizam je gibanje dislokacija. Brzina puzanja u drugom stadiju je dana jednadžbom:

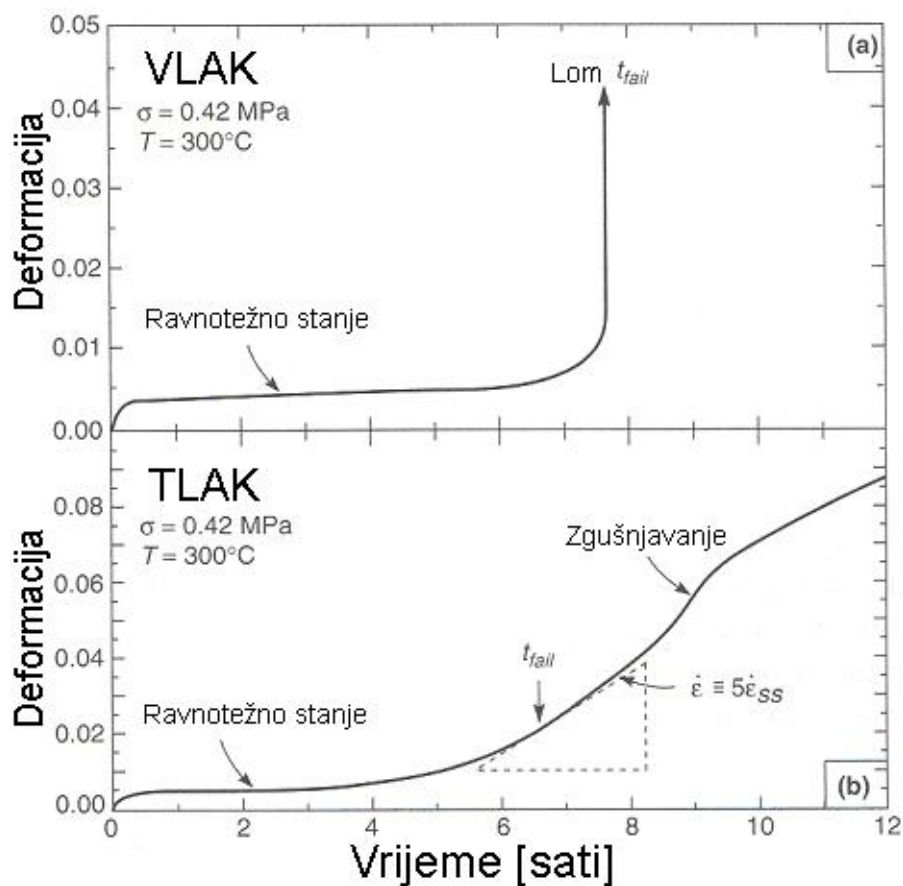
$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

Gdje je:

$$\dot{\epsilon}_0 = A \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right)$$

Q je energija aktivacije za kinetičke procese koji kontroliraju brzinu puzanja, σ_0 je referentno naprezanje, R je konstanta idealnog plina. [7]

Na sljedećim slikama prikazan je način testiranja, pojava pukotine kod Al-pjene pri vlačnom opterećenju te pojava pukotine kod tlačnog naprezanja pri temperaturi od 275°C i 0.88 MPa.



Slika 2.16. Prikaz dužinske deformacija pri puzanju u ovisnosti o vremenu za Al-pjene otvorenih ćelija kod (a) vlačnog i (b) tlačnog opterećenja. [5]

2.2.Ostala svojstva

2.2.1Toplinska svojstva metalnih pjena

Radi primjenjivosti metalnih pjena za rad pri povišenim ili sniženim temperaturama potrebno je uz malu masu postići određena toplinska svojstva. Građa pjena najviše utječe na ova svojstva, pogotovo relativna gustoća. Pjene sa otvorenim i zatvorenim ćelijama se uvelike razlikuju po svojim toplinskim svojstvima. Najvažnija toplinska svojstva metalnih pjena su [3]:

- koeficijent toplinske vodljivosti
- prijenos topline
- vatrootpornost
- otpornost na eksploziju

Talište - T_m ćelijastih materijala praktički je jednako talištu materijala ćelija. Kod Al pjena talište je više od tališta aluminijske pjene jer su ćelije često prevučene kontinuiranim oksidnim slojem. Što je veća poroznost i manja veličina ćelija, to je veća površina prevučena oksidom, pa je i talište više.

Specifični toplinski kapacitet - C_v po jedinici obujma za ćelijaste je materijale značajno niži nego kod neporoznih. To ih čini prikladnima za primjenu kada se traži mali toplinski kapacitet, na primjer za dijelove sustava za brza zagrijavanja i hlađenja.

Koeficijent toplinske rastezljivosti - α ćelijastih materijala gotovo je jednak koeficijentu materijala stijenki ćelija. Kako je koeficijent toplinske vodljivosti za pjene (λ) znatno niži, omjer koeficijenta toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti (α/λ) je visok. Budući da je taj omjer mjerilo za veličinu toplinskih deformacija, kod konstrukcija s ugrađenim pjenama treba svesti na minimum pojavu temperaturnih razlika.

Otpornost na toplinske šokove - $R_m/(E\alpha)$

Kod pojave iznenadnih temperaturnih razlika dolazi do toplinskih deformacija čija veličina ovisi o modulu elastičnosti. Ako se uzme da je koeficijent toplinske rastezljivosti konstantan, a budući da modul elastičnosti ćelijastih materijala opada s opadanjem relativne gustoće, to će toplinske deformacije ćelijaste strukture biti u načelu manje nego kod neporoznih materijala. Dakako, s padom relativne gustoće pada i naprezanje urušavanja i lomno naprezanje pjena. Ako ta naprezanja u odnosu na relativnu gustoću padaju blaže od pada modula elastičnosti u odnosu na relativnu gustoću, onda će otpornost na toplinske šokove takvih pjena biti veća.

Iznimnu vatrootpornost su pokazale aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama zahvaljujući Al_2O_3 . Do stradavanja može doći iz više razloga tako da se u obzir uzima i toplinska i strukturna vatrootpornost. Do toplinskog stradavanja dolazi kada pjena gubi izolacijski kapacitet, a do strukturnog kada gubi nosivost.

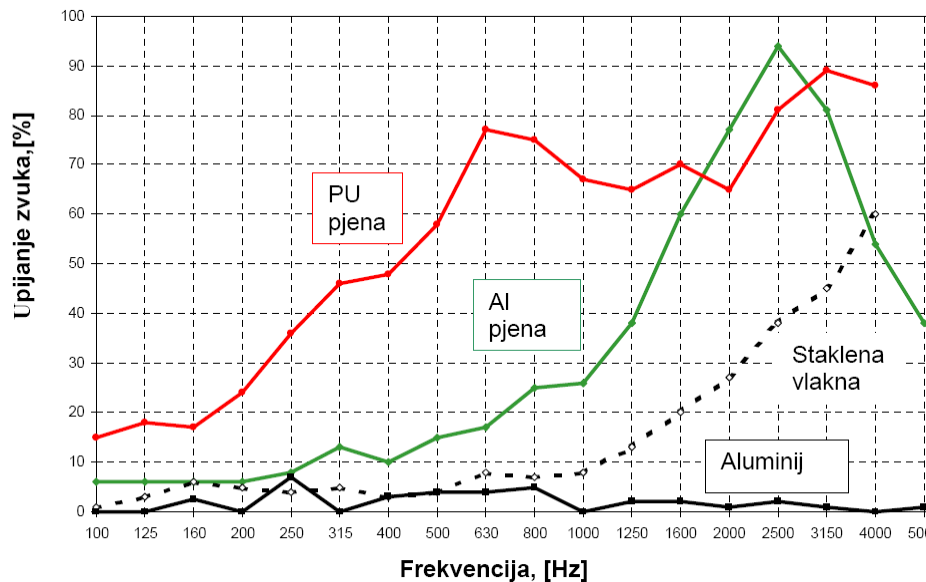
2.2.2 Zvučna svojstva metalnih pjena

Odlična zvučna svojstva metalnih pjena očituju se u činjenici da metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije. Da bi metalna pjena dobro apsorbirala zvuk mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije.

Apsorpcija zvuka može se poboljšati bušenjem rupa promjera 1 - 2 mm u metalnoj pjenu. Prema podacima proizvođača, prednosti Alporas pjena u odnosu prema konkurentnoj staklenoj vuni kada se radi o apsorpciji buke jesu, :

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora ustabiliti 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 2.1 pokazuje postotak upijanja zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i aluminijske pjene.



Slika.2.17. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al [5]

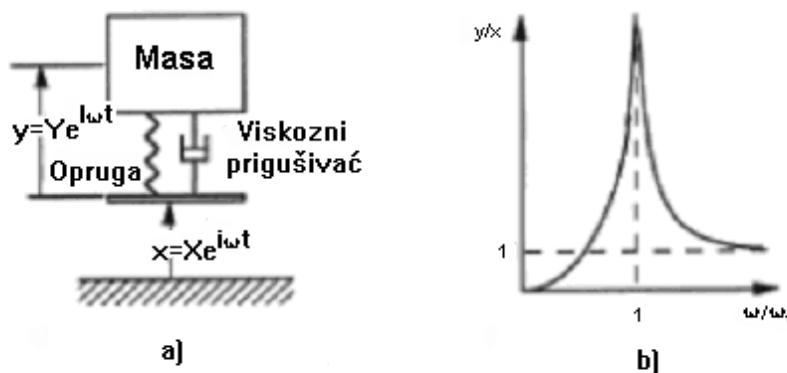
Dijagram pokazuje da Al pjena na frekvenciji od oko 2500 Hz ima postotak upijanja zvuka 95%, što je čak desetak posto više od već odavno poznate PU pjene, a puno više od staklene vune koja se često koristi u građevinarstvu.

2.2.3. Prigušenje vibracija metalnih pjena

Prigušenje je vrlo važno svojstvo materijala kada se on koristi za izradu dijelova neke konstrukcije koja je tijekom uporabe izložena mehaničkim vibracijama (npr. dijelovi stroja za preciznu obradu itd.). Ponašanje konstrukcije posebno je kritično u području rezonantnih ili vlastitih frekvencija. Konstrukcijsko prigušenje temelji se na pretvorbi vibracijske energije u toplinu unutrašnjim trenjem.

Princip ispitivanja je takav da se materijal izloži vibracijama te se proučava ponašanje u rezonanciji nakon prestanka rada izvora vibracije. Kao i kod drugih ispitivanja, i ovdje je problem nehomogena struktura uzoraka. Na rezultate utječe stupanj poroznosti, veličina i oblik ćelija, način obrade uzorka itd. Ispitivanja se najčešće obavljaju na oscilatoru s jednim stupnjem slobode na kojem se vibracije različite frekvencije prenose na uzorak putem opruge (slika 2.2).

Prigušenje se iskazuje bezdimenzijskim faktorom gubitka η . Čelijasti metali pokazuju za jedan red veličine više vrijednosti faktora gubitka od faktora gubitka materijala pune gustoće od kojih su napravljeni.



Slika.7.18. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode; b) funkcija prigušenja [3]

2.2.4. Električna svojstva metalnih pjena

Metali sa ćelijastom strukturom su odlični električni vodiči. Dva glavna električna svojstva su :

- električni otpor
- električna vodljivost

Električni otpor (znak: R) – je fizikalna veličina kojom se izražava omjer napona i jakosti električne struje, što je za mnoge materijale stalna vrijednost (Ohmov zakon).

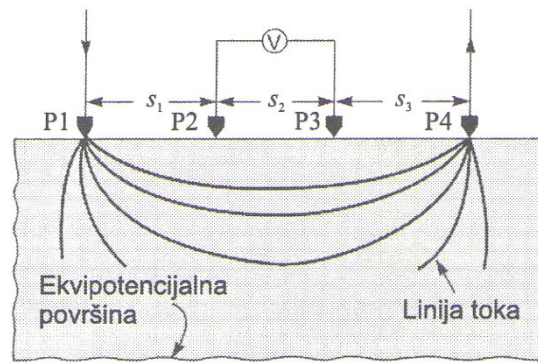
Električna vodljivost (znak: G) fizikalna je veličina definirana kao omjer jakosti električne struje i napona ukoliko su oni nepromjenljivi s vremenom (istosmjerna električna struja i napon), a obrnuto je proporcionalna električnom otporu. Kod metalnih pjena ovisna je i o relativnoj gustoći jer proizlazi iz električne otpornosti.

Tablica 2.3 pokazuje vrijednosti električne otpornosti metalnih pjena.

Tablica.2.3. Električna otpornost metalnih pjena [4]

SVOJSTVO	MATERIJAL				
	CYMAT	ALULIGHT	ALPORAS	ERG	INCO
	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Relativna gustoća	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-1,0	0,05-0,1	0,03-0,04
Građa	Zatvorene			Otvorene	
Električna otpornost, ($10^{-8} \Omega m$)	90-3000	20-2000	210-250	180-450	300-500

Način mjerenja električnog otpora prikazan je na slici 2.19.



Slika.2.19. Mjerenje električnih svojstava metalnih pjena kontaktom u četiri točke [4]

3. Spajanje metalnih pjena

Svojstva spoja moraju biti jednaka ili bolja od svojstava osnovnih materijala koji se spajaju. Porozna struktura znatno otežava spajanje metalnih pjena, pa se primjenjuju posebne

tehnike spajanja. Ovdje su opisana tri načina spajanja:

- spajanje ljepilima
- stvaranje rastavljivih spojeva
- spajanje zavarivanjem

Kao ljepila se najčešće rabe epoksidne smole. Najčešći problemi su: smanjenje toplinske stabilnosti i koeficijenta širenja topline i povećanje toplinske ili električne izolacije. Ova metoda spajanja se najčešće upotrebljava kod stvaranja sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene.

Rastavljivi spojevi metalnih pjena se ostvaruju drvenim vijcima ili metalnim umetcima s urezanim navojem. Dobro spajanje umetkom, postiže se korištenjem ljepila, umetanjem tijekom proizvodnog procesa ili korištenjem punila. Kao punilo se koristi materijal koji se može upjeniti i ima niže talište od metalne pjene u koju

stavljammo umetak. Kad uložimo umetak i punilo, cijeli sklop zagrijavamo. Prilikom zagrijavanja dolazi do upjenjavanja punila koje povezuje umetak i osnovnu metalnu pjenu.



Slika 3.1. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena, [5]

Zavarivanje neporoznog aluminija je otežano zbog tankog sloja oksida Al_2O_3 na površini koji ima više talište od aluminija. Zato se zavarivanje obavlja u atmosferi zaštitnog plina kako se sloj oksida ne bi obnovio. Samo zavarivanje se najčešće obavlja laserom. Laserska zraka je fokusirana zbog čega je zona utjecaja topline puno uža nego kod drugih postupaka. To je kod metalnih pjena vrlo bitno jer se smanjuje mogućnost kolapsa ćelijaste strukture. Do kolapsa dolazi zbog prelaska čvrste faze u tekuću, što se također može spriječiti uporabom dodatnog materijala koji se na mjesto zavarivanja dodaje u obliku šipke ili ploče. Budući da se želi postići ćelijasta struktura zavara, primjenjuje se takav dodatni materijal koji se pod utjecajem topline također pretvara u metalnu pjenu.

4.PRIMJENA METALNIH PJENA

Primjena metalnih pjena u inženjerskoj praksi je još uvijek na niskoj razini. Naime nedovoljno poznavanje fizikalnih svojstava pjena te premalo znanje o njihovim strukturnim karakteristikama kao i ostalim svojstvima razlog su njihove male primjene. Jedan od razloga je i njihova visoka cijena. Rješenje ovih problema traži se u novim načinima ispitivanja koja će omogućiti potpunu karakterizaciju pjena. Isto tako treba pronaći mogućnosti primjene metalnih pjena tamo gdje su njihova svojstva u potpunosti iskorištena, a cijena materijala nema prevelik udio u konačnoj cijeni proizvoda.

Tablica 4.1. Moguća primjena metalnih pjena [4]

PODRUČJE PRIMJENE	OBRAZLOŽENJE
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i težine pri savijanju
Jezgra sendvič konstrukcija	Niska gustoća i dobra smična i lomna čvrstoća
Prigušenje vibracija	Prigušenje vibracija je i do 10 puta bolje nego kod neporoznih metala
Apsorpcija zvuka	Metalne pjene s mrežastom strukturom
Apsorpcija energije	Vrlo dobra apsorpcija udarne energije pri sobnim i povišenim temperaturama
Zamjena za drvo	Lagane su, krute i mogu se spajati drvenim vijcima
Izmjenjivači topline, hladnjaci	Pjene s otvorenim ćelijama dobro provode toplinu zbog velike površine i vodljivosti stijenki
Vatrootpornost	Pjene sa zatvorenim ćelijama - stijenke prekrivene slojem oksida
Toplinska izolacija	Određene vrste pjena imaju niski koeficijent toplinske vodljivosti
Biokompatibilni umeci	Ćelijasta struktura biokompatibilnih titanovih pjena stimulira rast ćelije
Filteri	Mogućnost filtriranja plinova i tekućina
Elektromagnetska zaštita	Dobra električna vodljivost
Elektrode, držači katalizatora	Veliki omjer površine i volumena

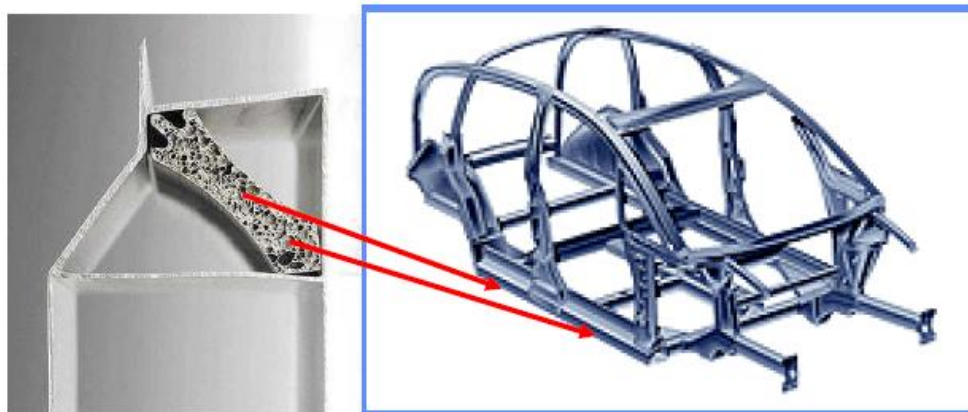
Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena

Najčešći oblik metalnih pjena su sendvič-konstrukcije (slika 4.1).



Slika 4.1. Primjer sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene [5]

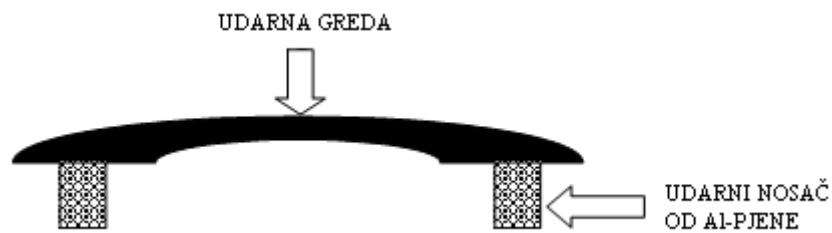
Najveće zanimanje za primjenu metalnih pjena pokazuje autoindustrija (slika 4.2).



Slika 4.2. Primjena metalnih pjena u autoindustriji [1]

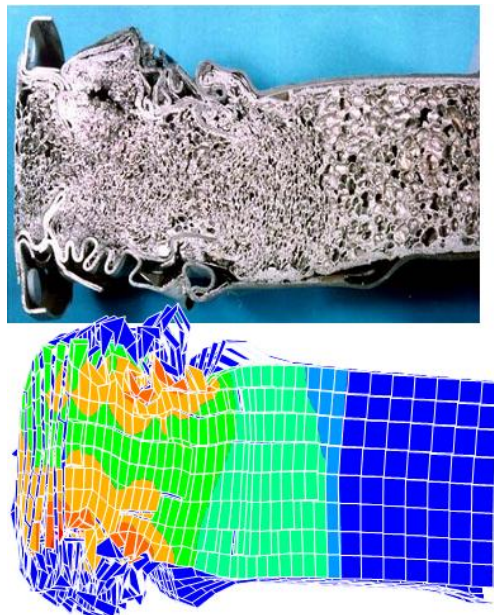
Metalne pjene se u autoindustriji uglavnom koriste kao jezgra sendvič-konstrukcija za izradu dijelova oplata i okvira. Njihovim korištenjem pri izradi masa automobila se

može smanjiti za 20 %. Metalne pjene se mogu primijeniti za razdvajanje kabine automobila od dijela gdje je motor zbog svojih toplinskih svojstava, mogućnosti upijanja zvuka te prigušenja vibracija.. Budući da aluminijske pjene imaju vrlo dobru sposobnost apsorpcije energije udara, od njih se izrađuju branici koji povećavaju sigurnost putnika pri udarcima.



Slika 4.3. Branik automobila napravljen od aluminijske pjene [2]

Na slici 4.4. prikazan je udarni test nosača motora koji je izrađen od sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene.



Slika 4.4. Udarni test nosača motora BMW-a [1]

Osim u autoindustriji ovi materijali koriste se i u industriji tračnih vozila, brodova, zrakoplova i svemirskih letjelica posebno titana u avioindustriji.

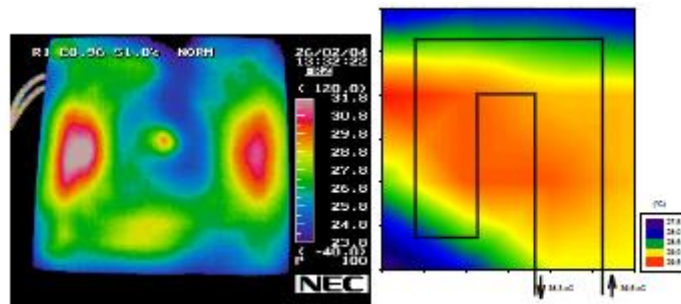
Ako pjena ima otvorene ćelije, ona će dobro provoditi toplinu, a ako su ćelije zatvorene, ona je toplinski izolator. Pjene s otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stijenki, dobro provode toplinu i mogu se primijeniti za izradu izmjenjivača topline, hladnjaka itd. (slika 4.5).



Slika 4.5. Izmjenjivač topline [5]



Slika 4.6. Grijaća ploča napravljena od Alporas ojačane pjene [5]



Slika 4.7. Raspored topline u običnoj grijaćoj ploči (lijevo) i Alporas grijaćoj ploči (desno) [5]

Velik omjer površina/volumen metalnih pjena također omogućuje izradu uređaja za kontrolu protoka fluida kao što su npr. difuzori plina.

Metalne pjene primjenjuju se i u graditeljstvu zbog njihove vrlo dobre mogućnosti upijanja zvuka. Istraživanja su pokazala kako se bušenjem provrta upijanje zvuka metalnih pjena dovodi na razinu staklene vune, materijala koji se uglavnom upotrebljava u te svrhe. One također imaju bolja mehanička i toplinska svojstva, a njihova krutost osigurava lakšu montažu. Pod utjecajem vatre staklena vuna oslobađa otrovne plinove, dok su metalne pjene vatrootporne. Slika 3.6 pokazuje vijadukt čija je donja površina napravljena od metalne pjene koja dobro upija buku. Time je razina buke koju proizvode vozila znatno smanjena.



Slika 4.8. Vijadukt čija je donja površina izvedena od metalne pjene [1]

Od aluminijskih pjena izrađuju se također razni oblici prigušivača i filteri za odvajanje dviju tekućina ili za odvajanje krutih čestica od plinova ili tekućina.

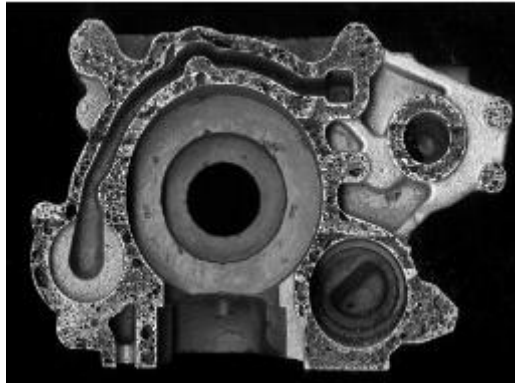


Slika 4.9. Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena [3]



Slika 4.10. Filter od metalne pjene na bazi bronce [5]

Danas razvijeni postupci lijevanja omogućuju izradu izrazito složenih oblika proizvoda od metalnih pjena (slika 4.11.). Mehanička svojstva mogu se optimizirati različitim postupcima toplinske obrade legure od koje nastaje pjena, a također su moguća i modificiranja površine.



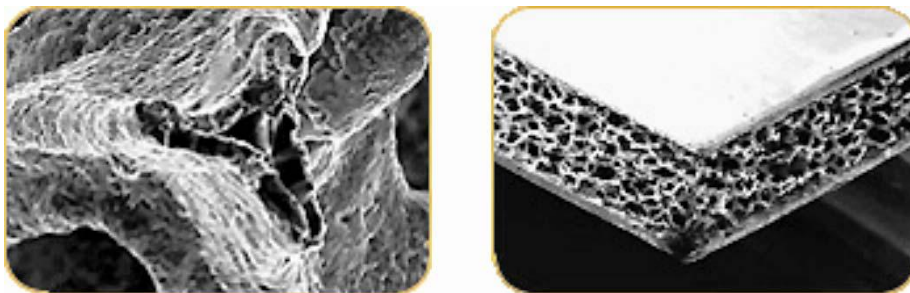
Slika 4.11. Lijevani proizvod od aluminijske pjene [5]

Zbog male mase i zanimljive teksture metalne pjene su pogodne za izradu predmeta za estetske svrhe.



Slika 4.12. Predmeti od metalnih pjena za estetske svrhe[5]

Sendvič-konstrukcije s jezgrom od niklene pjene se koriste za izradu izmjenjivača topline.

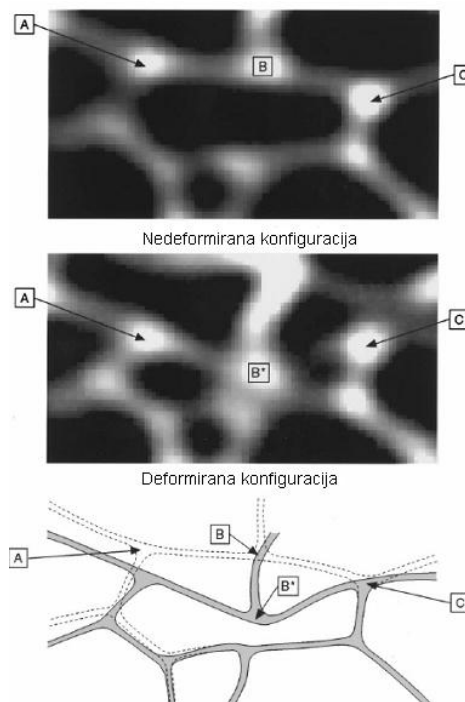


Slika 4.13. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklene pjene [1]

5. Apsorpcija energije udara

5.1 Općenito o apsorpciji energije udara

Apsorpciju energije udara u svim smjerovima omogućava način na koji su ćelije oblikovane u metalnim pjenama. Oblik ćelije približno je definiran matematičkim modelom poliedra tetrakaidekahedrona i to je čini neosjetljivom na smjer naprezanja, tj. izotropnom. Taj oblik ćelije omogućava metalnim pjenama da apsorbiraju udarnu energiju iz bilo kojeg smjera i omogućava protjecanje fluida, prijenos topline i toplinsku otpornost također u svim smjerovima. Treba istaknuti da se pjene s jednakom veličinom i periodičnom raspodjelom ćelija i porozitetom mogu smatrati izotropnim; doduše prilikom obrade i proizvodnje, nepravilnosti se uvijek jave kod raspodjele ćelija te se ćelije same orijentiraju u određenom smjeru (obično je to smjer agensa za pjenjenje), povećava im se volumen i to rezultira nejednakim veličinama ćelija.



Slika 5.1. 2-D prikaz deformacije i efekta apsorpcije energije kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama [2]

Slika 5.1. prikazuje kako pjene apsorbiraju energiju gdje je i prikazana 2-D ilustracija kako se ćelije deformiraju pod opterećenjem. Ponašanje stijenke ćelije je slično ponašanju lisnate opruge pod opterećenjem. Kada je točka B pod opterećenjem, i ako je pjena u elastičnom području, točka B će se vratiti u početni položaj nakon apsorpcije energije opterećenja. Ako pjena ode u plastično područje to je isto ponašanje efekta apsorpcije energije, no dok točka B dođe u položaj B*, ne samo da će se deformirati nego će i „upiti“ značajnu količinu energije. Treba imati na umu da prikaz na slici 7 je samo 2-D ilustracija, jer kako je prije spomenuto taj efekt apsorpcije se ostvaruje u svim smjerovima.

Prema [6] odnos između relativnog napreznja tečenja i relativne gustoće iznosi:

$$\frac{R_{et}}{R_e} = C \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2}$$

R_{et} – granica stlačivanja pjene

R_e – granica razvlačenja materijala ćelija

ρ – gustoća pjene

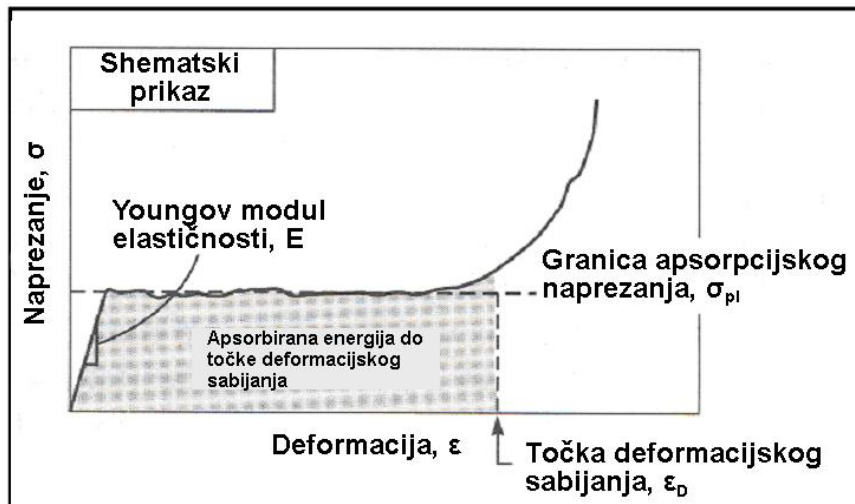
ρ_s – gustoća materijala stijenki ćelija

C – konstanta

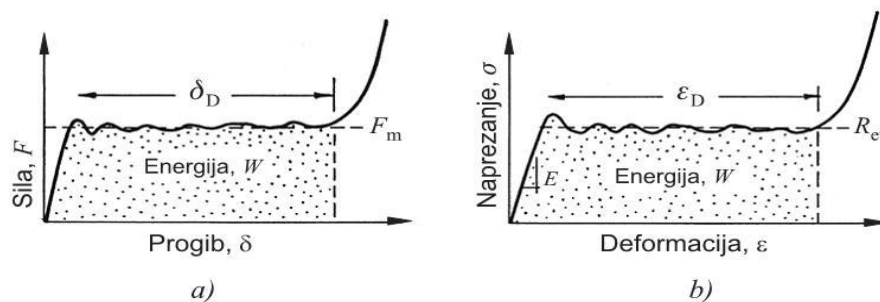
Dva najvažnije faktora za apsorpciju energije su relativna gustoća metalne pjene kao i njen porozitet. Pjene sa manjim veličinama pora sadrže više materijala i veću površinu zbog čega kad su izložene naprezanju ili sili apsorbiraju veće količine energije u usporedbi sa s pjenama koje imaju veće pore. Pjene koje imaju veću gustoću pora su otpornije na naprezanje. Relativna gustoća uvjetuje debljinu spojnice dvaju čvorova ćelije jer što je on deblji to ćelija može apsorbirati veće količine energije i metalna pjena je čvršća.

Slika 5.2. je shematski dijagram napreznje-deformacija idealnih metalnih pjena. Točka deformacijskog sabijanja je granica nakon koje pjena prestaje

apsorbirati energiju. Točka deformacijskog sabijanja je točka gdje naprezanje prelazi granicu apsorpcijskog naprezanja. Površina ispod krivulje do točke deformacijskog sabijanja je apsorbirana energija. [7]



Slika 5.2. Shematski dijagram naprezanje-deformacija idealnih metalnih pjena. [3]



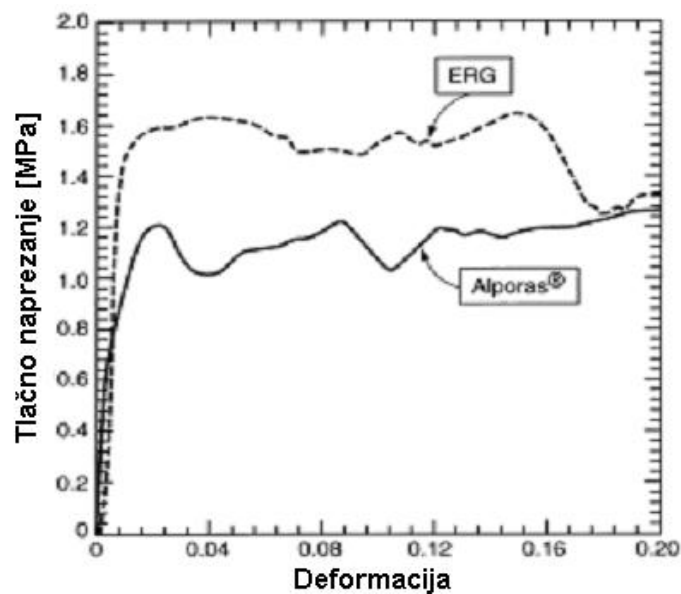
Slika 5.3. Krivulje koje pokazuju apsorpciju energije pri a) savijanju b) tlaku [5]

Apsorpcija energije udara po jedinici volumena (W) jednaka je:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

gdje je: σ – naprezanje
 ε – deformacija

Slika 5.4. prikazuje razliku aluminijskih pjena s zatvorenim ćelijama (ALPORAS pjena) i otvorenim ćelijama (ERG pjena). Količinu energije koju pjena apsorbira vidi se po površini ispod krivulje i stoga je jasno da je pjena sa otvorenim ćelijama sposobna apsorbirati veće količine energije, ovo je nepromjenjivo do 20%-tne deformacije.

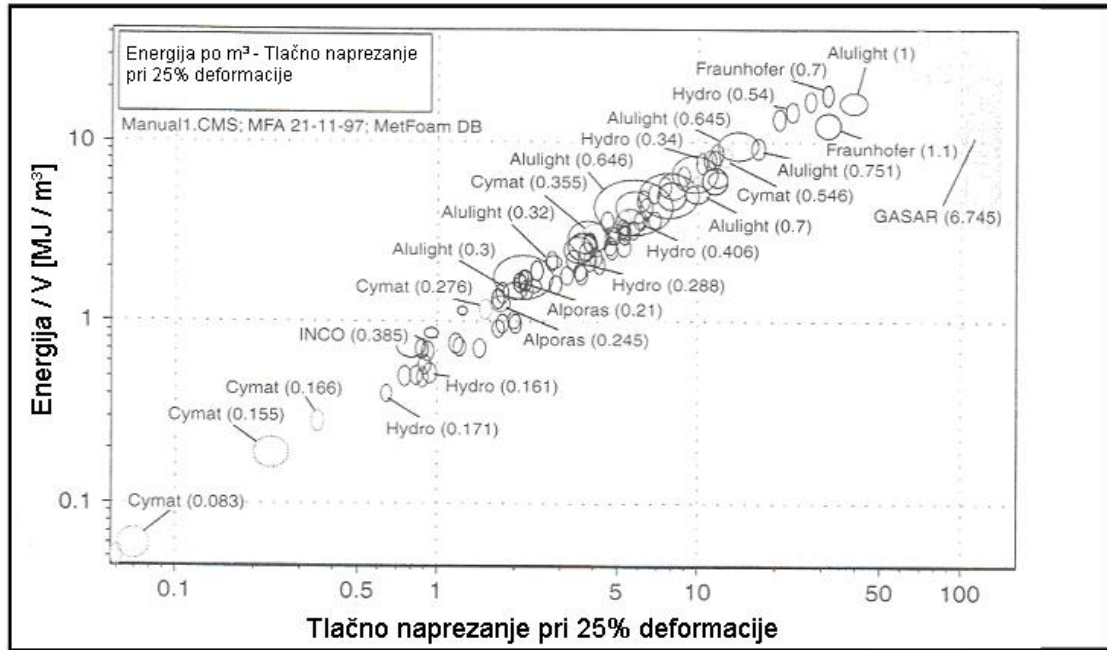


Slika 5.4. Dijagram naprezanje-deformacija otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) metalnih pjena. [3]

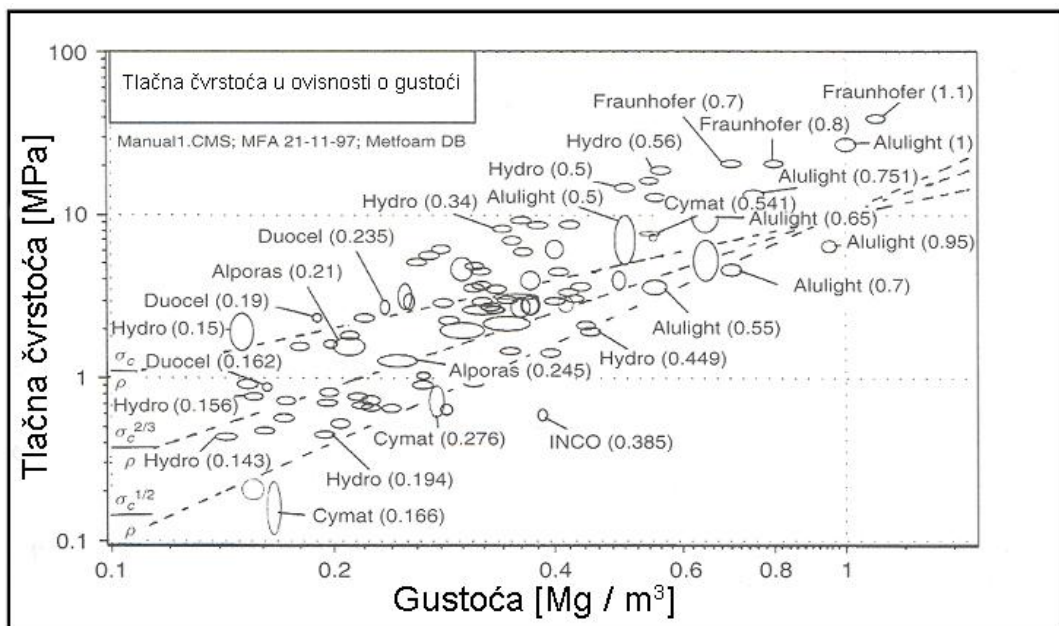
Oscilacije u obje krivulje predstavljaju lom stjenke ćelija, jer kako se one deformiraju i lome, tako apsorbiraju energiju što rezultira vertikalnim skokom krivulje. Razlog zbog kojeg nastupaju oscilacije je također povezano s pucanjem veza koje povezuju pjenu pod tlačnim opterećenjem, a koja tada puca po slojevima. Lom veza češći je kod pjena zatvorenih ćelija, zbog toga što ćelijske strukture pjena zatvorenih ćelija teže nepravilnom obliku i neuređenom rasporedu, dok su pjene otvorenih ćelija, osobito DUOCEL pjena, pravilnije i imaju uređen raspored ćelija.

To je velika prednost pjena otvorenih ćelija jer ih se može istovremeno koristiti i za nosive konstrukcije i za izmjenjivače topline. Obje vrste pjena obuhvaćaju široki spektar vrijednosti apsorpcije energije, krutosti i toplinske vodljivosti. Navedene vrijednosti značajno variraju koristi li se jedna ili druga vrsta materijala pjene, gustoće

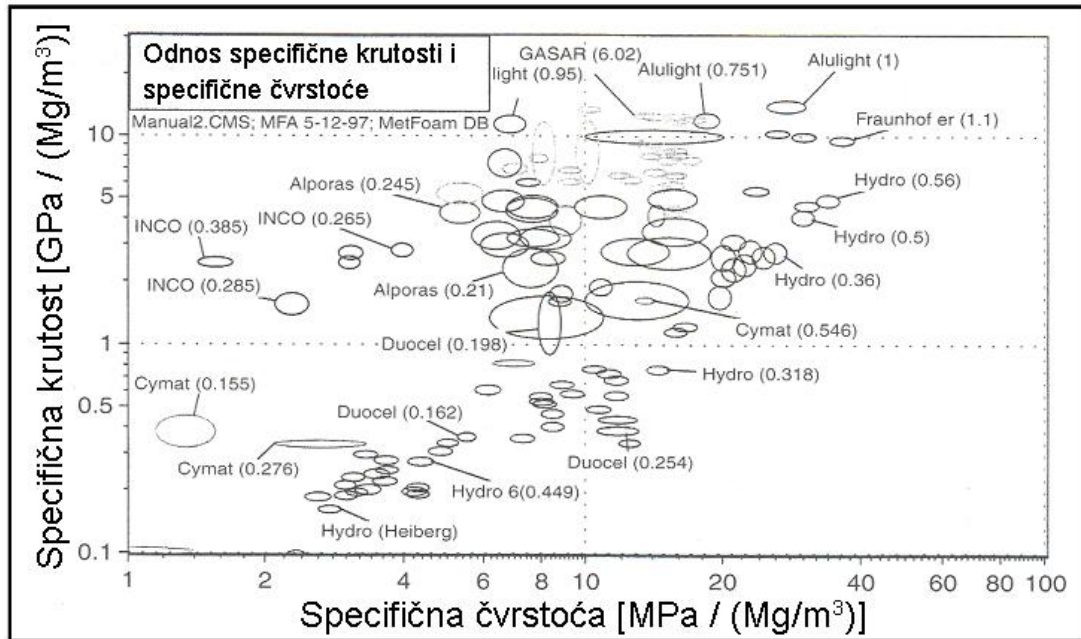
ili oblika ćelija, bilo zatvorenih ili otvorenih. Za trenutno raspoložive metalne pjene slika 5.5., slika 5.6. i slika 5.7. prikazuju vrijednosti apsorpcije energije udara, tlačne čvrstoće-gustoće, specifične krutosti-specifične čvrstoće.



Slika 5.5. Apsorpcija energije po jedinici volumena pri 25% deformaciji za dostupne komercijalne metalne pjene [4]



Slika 5.6. Prikaz vrijednosti tlačne čvrstoće u ovisnosti o gustoći za komercijalne metalne pjene. [4]

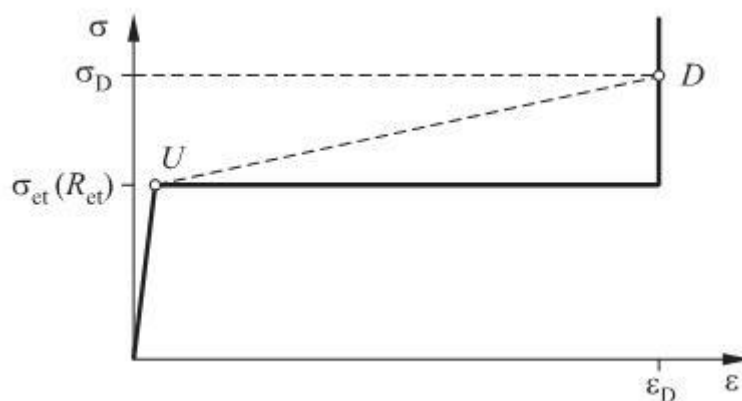


Slika 5.7. Prikaz specifične krutosti u ovisnosti o specifičnoj čvrstoći za komercijalno dostupne metalne pjene. [4]

Iz gornjih slika se jasno vidi usporedba pjena s otvorenim i zatvorenim ćelijama kao i njihov kapacitet apsorpcije energije, te njihova čvrstoća, što je vrlo korisno prilikom izbora adekvatne metalne pjene za određenu primjenu. Naravno, pri konstruiranju proizvoda, optimalna konstrukcija se postiže kada su poznati svi konstrukcijski parametri i konačna funkcija proizvoda te se na osnovu toga izabire najprikladniji materijal.

5.2 Propagacija udarnog vala

Udarni val širi se kroz metalnu pjenu nakon što je ona izložena udaru relativno velikim brzinama. Širenjem vala raste naprezanje do granice stlačivanja R_{et} pjene.



Slika 5.8. Krivulja naprezanje-deformacija [2]

Krivulja na slici 5.8. prikazuje kako metalna pjena prije udara ima granicu stlačivanja pri deformaciji zgušnjavanja ϵ_d . Nakon udara naprezanje raste iznad granice stlačivanja i pjenom se širi plastični udarni val. Elastični val širi se brzinom v_{el} , a naprezanje raste do σ_{et} :

$$v_{el} = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}}$$

Plastični val širi se brzinom v_{pl} pri čemu naprezanje raste od σ_{et} do σ_D vrijednosti u točki D.

Skok naprezanja sa σ_{et} na σ_D iznosi:

Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena

$$(\sigma_D - \sigma_{st}) = \rho v_{pl} v_D$$

$$v_{pl} = \sqrt{\frac{(\sigma_D - \sigma_{st})}{\rho \cdot \epsilon_D}} = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}}$$

$$E_t = \frac{(\sigma_D - \sigma_{st})}{\epsilon_D}$$

gdje je: v_D – brzina u točki D

E_t – tangencijalni modul (vidi spojnicu U-D na slici 5.8.)

Brzina prijelaza (v_t), kod koje može doći do udara, ponajprije ovisi o relativnoj gustoći :

$$v_t = \left(0,1 \cdot C_1 \cdot \frac{R_e}{\rho_s} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/4} \cdot \left(\alpha - \beta \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/2}$$

gdje je: α i β - koeficijenti koji iznose 0,8 i 1,75

C_1 – koeficijent koji se bira proizvoljno (npr. 0,3)

R_e - granica razvlačenja materijala ćelija

ρ/ρ_s – relativna gustoća

5.3 Teoretski model određivanja apsorbirane energije

Ovim ispitivanjem može se odrediti tlačno naprezanje prema izrazu:

$$\sigma_t = \frac{F}{S_0}$$

Gdje je:

σ_t – tlačno naprezanje (N/mm²)

F – tlačna sila (N)

S_0 – ploština početnog presjeka epruvete (mm²)

i relativno skraćenje (sabijanje) koje se utvrđuje izrazom:

$$\varepsilon_t = \frac{L_0 - \Delta L}{L_0} \times 100$$

Gdje je:

ε_t – relativno skraćenje (%)

L_0 – početna mjerna duljina (visina) (mm)

ΔL – skraćenje (mm)

Apsorbirana energija po jedinici volumena računa se izrazom:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

Gdje je:

W – apsorbirana energija po jedinici volumena (MJ/m³)

σ – tlačno naprezanje (N/mm²)

ε – relativno skraćenje (%)

Budući da ovaj integral nije elementarno rješiv, potrebno je površinu izračunati

numeričkim integriranjem. Numeričko integriranje je inženjerska numerička metoda koja se primjenjuje za izračunavanje integrala koji nije elementarno rješiv. Postoji više metoda numeričkog integriranja :

- Pravokutna
- Trapezna
- Simpsonova
- Gaussove integracijske formule
- Čebiševljeva

U ovom radu primijenjena je pravokutna metoda.

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{i+1} + \sigma_i) \times (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)}{2}$$

Gdje je:

W – apsorbirana energija po jedinici volumena (MJ/m^3)

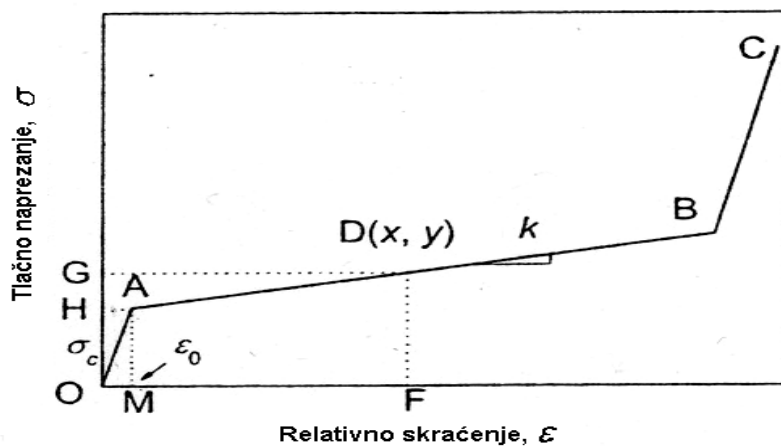
σ – tlačno naprezanje (N/mm^2)

ε – relativno skraćenje (%)

Iskoristivost apsorbirane energije ćelijastih materijala sabijenih do točke D može se izraziti:

$$E_f = \frac{S_{OADF}}{S_{OGDF}}$$

Gdje je $S_{OADF} = S_{OHDF} - S_{OHA}$ površina ispod $\sigma - \varepsilon$ krivulje, to jest apsorbirana energija po jedinici volumena. Površina S_{OGDF} predstavlja apsorpciju energije po jedinici volumena idealnog apsorpcijskog materijala.



Slika 5.9. Pojednostavljeni model dijagrama tlačnog naprezanja - relativnog skraćanja za ćelijaste materijale [3]

5.4. Iskoristivost apsorpcije energije udara

Iskoristivost apsorpcije energije udara uspoređuje apsorbiranu deformacijsku energiju materijala koji se ispituje s idealnim apsorpcijskim materijalom. Smatra se da je idealni apsorpcijski materijal onaj koji se opterećen tlačnom silom tijekom cijelog procesa deformira uz konstantno naprezanje.

Iskoristivost η definira se kao omjer apsorbirane energije ispitnog uzorka i apsorbirane energije idealnog apsorpcijskog materijala:

$$\eta = \frac{\int_0^s F(s') ds'}{F_{\max}(s)s} \quad (0.1)$$

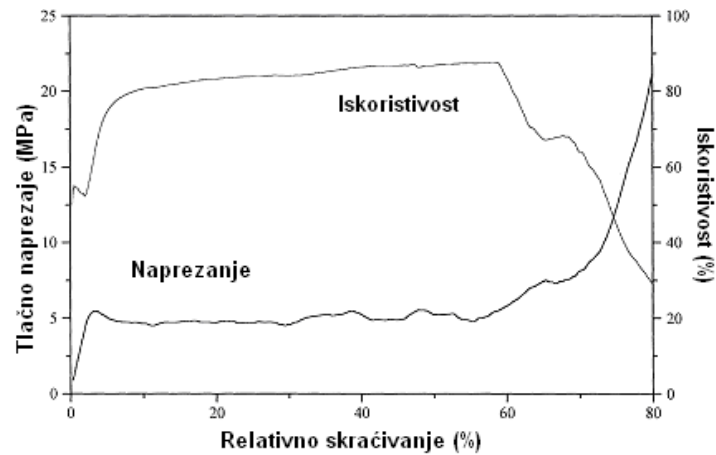
gdje je:

$F_{\max}(s)$ – maksimalna sila elastične deformacije (N)

s – skraćenje (mm)

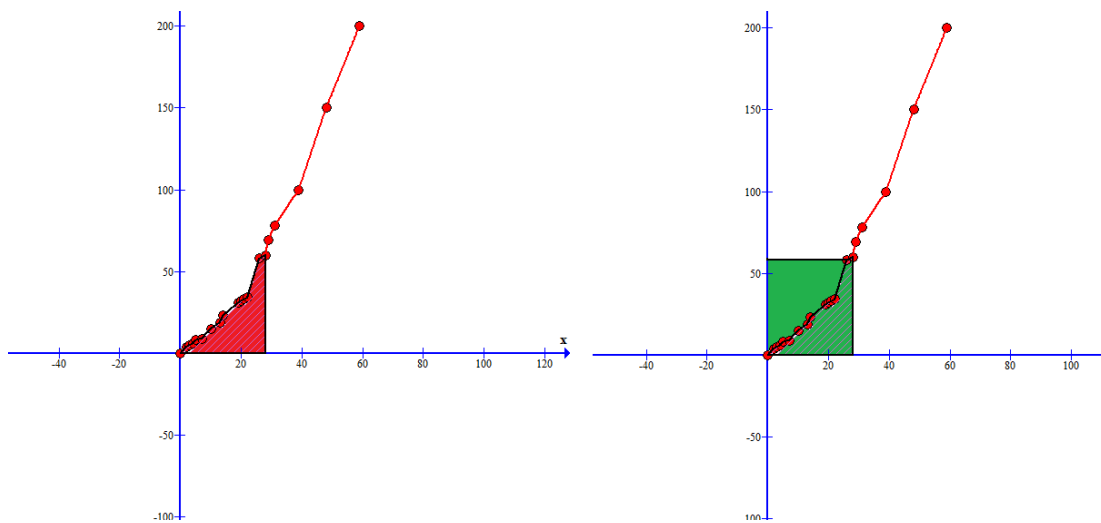
Metalne pjene se mogu optimalno opterećivati sve dok iskoristivost drži neku konstantnu vrijednost. Kad se ćelije sabiju dolazi do naglog pada iskoristivosti uz povećanje naprezanja. Slika 4.4 prikazuje dijagram tlačnog naprezanja i apsorpcijsku iskoristivost AISi pjene.

Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena



Slika 5.10. Dijagram tlačnog naprezanja i apsorpcijske iskoristivosti po relativnom skraćenju AISi pjene ($\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$) [4]

Iskoristivost apsorpcije energije pojedinog materijala nije jedini, niti dovoljan uvjet pri izboru materijala koji se primjenjuju u uvjetima udarnog opterećenja.



Slika 5.11. Apsorbirana deformacijska energija (lijevo, crvena) i energija idealnog apsorpcijskog materijala (desno, zeleno)

6. Eksperimentalni dio

6.1. Uvod

Za potrebe ovoga rada obrađeni su podaci dobiveni statičkim tlačnim ispitivanjem ispitivanjem iz četiri diplomski i jednog završnog rada studenata Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prilikom svih ispitivanja korištena je kraljica marke WPM, model EU 40 mod., maksimalne tlačne sile od 400 kN.



Slika 6.1. Kraljica WPM EU 40 mod. [2]

Iz tih pet radova analizirani su dijagrami koji prikazuju odnos tlačna sila – produljenje. Krivulje iz tih dijagrama unesene su u program Graph. Krivulje su unesene tako da se točka po točka krivulje unosila u novu krivulju u programu. Za svaku krivulju je trebalo odrediti vrijednosti pojedine točke na apscisi i ordinati i potom ih utipkati u Graph. U svakoj krivulji je trebalo odrediti između 30 do 40 točaka. Kad se u Graphu napravila krivulja tada se preko jedne opcije Površine računala površina ispod krivulje pri

silama od 50, 100, 150, 200 kN. Ta površina ispod krivulje je jednaka iznosu apsorbirane energije za određeni iznos sile. Iznos površine ispod krivulje se dijelila sa površinom pravokutnika u krivulji koji je omeđen sa apscisom, ordinatom, te s gornje strane pravcem koji prolazi kroz točku na ordinati određenu silom od 50, 100, 150, 200 kN i paralelan je sa apscisom, a s desne strane je ograničen pravcem koji je paralelan sa ordinatom i koji prolazi kroz točku na krivulji u kojoj se nalazi iznos sile od 50, 100, 150, 200 kN. Izračunate vrijednosti upisivale su se u tablice.

6.2. Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena proizvedenih u jamskoj peći prema [9]

Za izradu uzoraka korištena je tehnologija plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi. Uzorci su izrađeni u Laboratoriju za toplinsku obradu (FSB Zagreb), a korištena je elektrootporna peć snage 10 kW (slika 7.5.).



Slika 6.2 Jamska peć

U praktičnom dijelu ovog diplomskog rada izrađeni su uzorci od aluminijskih pjena, te je na njima ispitana apsorpcija energije udara. Devet uzoraka cilindričnog poprečnog presjeka i šest uzoraka kvadratnog presjeka je izrađeno od različitih aluminijskih pjena, različitih su dimenzija i gustoće.

Tablica 6.1 Testirani uzorci cilindričnog presjeka aluminijskih pjena [9]

NAZIV UZORAKA	<u>470 MAT1</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10 TiH₂-</u> <u>0.8</u>	<u>470 MAT2</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10 TiH₂-</u> <u>0.8</u>	<u>470 MAT3</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10 TiH₂-</u> <u>0.8</u>	<u>470 SJAJ1</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6 TiH₂-</u> <u>0.4</u>	<u>470 SJAJ2</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6 TiH₂-</u> <u>0.4</u>
MASA, m [g]	$m = 0,47\text{kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$
NAZIV UZORAKA	<u>470 SJAJ 3</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6 TiH₂-</u> <u>-0.4</u>	<u>600 SJAJ 1</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10 TiH₂-</u> <u>0.4</u>	<u>600 SJAJ2</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6 TiH₂-</u> <u>0.4</u>	<u>600 SJAJ3</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6 TiH₂-</u> <u>0.4</u>	
MASA, m [g]	$m = 0,47\text{kg}$	$m = 0,60\text{ kg}$	$m = 0,60\text{ kg}$	$m = 0,60\text{ kg}$	
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,3	0,385	0,385	0,385	
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	

Tablica 6.2. Testirani uzorci kvadratnog presjeka aluminijskih pjena [9]

NAZIV UZORAKA	<u>470 MAT1</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10 TiH₂-</u> <u>0.8</u>	<u>470 MAT2</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10</u> <u>TiH₂-0.8</u>	<u>470 MAT3</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 10</u> <u>TiH₂-0.8</u>	<u>600SJAJ1</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6</u> <u>TiH₂-0.4</u>	<u>600 SJAJ2</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6</u> <u>TiH₂-0.4</u>	<u>600 SJAJ3</u> <u>ALULIGHT</u> <u>AISI 0.6</u> <u>TiH₂-0.4</u>
MASA, <i>m</i> [g]	m = 0,47kg	m = 0,47 kg	m = 0,47 kg	m = 0,6 kg	m = 0,6 kg	m = 0,6 kg
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,307	0,307	0,307	0,396	0,396	0,396
BRZINA ISPITIVANA <i>v</i> [mm/min]	<i>v</i> = 6mm/min	<i>v</i> =6mm/min	<i>v</i> =6mm/min	<i>v</i> =6mm/min	<i>v</i> =6mm/min	<i>v</i> =6mm/min

Tablica 6.3 Iskoristivost apsorpcije energije uzoraka iz [9]

Uzorak	Sila kN	Iskoristivost apsorpcije energije %
cilindar 470 mat	50	53,52
	100	47,91
	150	43,73
	200	45,73
cilindar 600 sjaj	50	60,52
	100	47,42
	150	60,58
	100	61,68
kvadrat 470 mat	50	59,37
	100	50,2
	150	49,01
	200	49
kvadrat 470 sjaj	50	29
	100	63,46
	150	65,44
	200	59,01
kvadrat 600 sjaj	50	43
	100	54,04
	150	56,73
	200	54,77

6.3 Apsorpcija energije aluminijskih pjena proizvedenih u jamskoj peći prema [1]

Uzorci su ispitivani u jamskoj peći snage 10 kW



Slika 6.3. Kalup u peći na 850 Celzijusa

U ovom završnom radu ispitane su dvije vrste aluminijskih pjena: ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 0,8 i ALULIGHT AISi 10 TiH2 0,8.

Tablica 6.4. Testirani uzorci aluminijskih pjena prema [1]

NAZIV UZORAKA	470 MAT KVADRAT ALULIGHT AISi 10 TiH2 - 0,8	470 MAT OKRUGLA ALULIGHT AISi 10 TiH2 - 0,8	470 SJAJ OKRUGLA 1 ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	470 SJAJ OKRUGLA 3 ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	470 SJAJ OKRUGLA 2 ZAJEDNO ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 - 0,4
MASA, m [g]	$m = 0,47\text{kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$	$m = 0,47\text{ kg}$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 6\text{mm/min}$	$v=6\text{mm/min}$	$v=6\text{mm/min}$	$v=6\text{mm/min}$	$v=6\text{mm/min}$

Tablica 6.5 Iskoristivost apsorpcije energije aluminijskih pjena prema [1]

Uzorak	Sila kN	Iskoristivost apsorpcije energije %
470 mat kvadrat (ALULIGHT AISi 10 TiH2 - 0,8)	50	95,4
	100	81,3
	150	75,3
	200	58,9
470 mat okrugla 1 (ALULIGHT AISi 10 TiH2 - 0,8)	50	75,5
	100	58,8
	150	52,1
	200	49,9
470 sjaj okrugla 1 (ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 - 0,4)	50	80
	100	78,4
	150	75,8
	200	70,6
470 sjaj okrugla 3 (ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 - 0,4)	50	91
	100	86,3
	150	73,0
	200	62,3
470 sjaj okrugla dvije zajedno (ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH2 - 0,4)	50	73
	100	69,4
	150	62,2
	200	

6.4. ApSORPCIJE energije aluminijskih pjena proizvedenih u zvonastoj peći prema [3]

Za izradu uzoraka korištena je tehnologija plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi. Uzorci su izrađeni u Laboratoriju za nemetale (FSB Zagreb) pomoću elektrootporne zvonaste peći tvrtke Feliks metal d.o.o., koja je prikazana na slici 6.1., a tehničke karakteristike prikazane su na slici 6.2.



Slika 6.4. Zvonasta peć

REKONSTRUIRANA LABORATORIJSKA PEĆ

Tip: Zvonasta peć sa zračnom atmosferom- ZPZ

TEHNIČKE KARAKTERISTIKE:

- Korisni prostor: 400 x 400 x 400 mm,
- Vanjske mjere: 1,2 x 1,2 x 2,7 m,
- Maksimalna temperatura: 1000 °C,
- Toplinska izolacija: Lake izolacijske ploče i keramička vlakna,
- Snaga: 7,5 kW,
- Napon: 3x380/220 V,
- Kontrola temperature: Mantel-termoelement tip Ni-NiCr preuzet zajedno s postojećim upravljačkim ormarom,
- Reguliranje temperature: Digitalni programator SHIMADEN, ugrađen u postojeći upravljački ormar,
- Zaštita grijača: Digitalni ON/OFF regulator SHIMADEN, ugrađen u postojeći upravljački ormar.

NAMJENA PEĆI:

Zagrijavanje metalnih kalupa za expandiranje metalnih pjena od lakih metala do temperature 1000 °C.

TEHNIČKI OPIS:

U nosivoj četverostranoj dvostrukoj oplati peći od čeličnih profila postavljena je toplinska izolacija od vatrootpornih keramičkih materijala i instalirani elektrootporni spiralni grijači na keramičkim cjevnim nosačima, koji pomoću termoelementa/manteltermoelementa i PID programatora/regulatora automatski upravljaju postavljenim procesom zagrijavanja. Pomoću pneumatske naprave za vertikalno otvaranje peći s protu-utegom omogućava se šaržiranje i dešaržiranje metalnih kalupa.

Slika 6.5. Tehničke karakteristike peći.

Za eksperimentalni dio ovog rada izrađeni su uzorci od aluminijske pjene koji su bili podvrgnuti tlačnom ispitivanju s ciljem da se odredi količina apsorbirane energije. Uzorci su bili podijeljeni u 2 grupe, prva grupa imala je manju masu, a druga veću. Nadalje, u svakoj od tih grupa polovica uzoraka je bila podvrgnuta tlačnom naprezanju manje i veće brzine.

Tablica 6.6. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti svih uzoraka u [3]

NAZIV UZORAKA	1200MATm	1200MATv	1430MATm	1430MATv
MASA, m [g]	1200		1430	
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,25		0,3	
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	6	60	6	60

Tablica 6.7. Iskoristivost apsorpcije energije udara prema [3]

Uzorak	Sila kN	Iskoristivost apsorpcije energije %
1430 MATv	50	50
	100	50
	150	55
	200	67
1430 MATm	50	50
	100	52
	150	56
	200	65
1200 MATm	50	50
	100	63
	150	64
	200	
1200MATv	50	50
	100	63
	150	65
	200	

6.5 Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena proizvedenih u komornoj peći prema [4]

Za praktični dio ovog diplomskog rada izrađeni su uzorci aluminijske pjene različitih gustoća, dimenzija (oblika) i materijala i ispitani na kidalici.

Tehnologija korištena za izradu uzoraka je plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi. Korištena je elektrotopna peć snage 2,5 kW koja se nalazi u Laboratoriju za nemetale, FSB, (slika 6.5.).



Slika 6.6. Komorna peć

Tablica 6.8. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti svih uzoraka u [4]

NAZIV UZORAKA	<u>ALULIGHT</u> <u>AlMgSi 0,6</u> <u>TiH₂ - 0,4</u> <u>(450 SJAJ</u> <u>CIL)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlMgSi 0,6</u> <u>TiH₂ - 0,4</u> <u>(600 SJAJ</u> <u>CIL)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlMgSi 0,6</u> <u>TiH₂ - 0,4</u> <u>(900 SJAJ</u> <u>CIL)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlSi 10 TiH₂</u> <u>- 0,8 (450</u> <u>MAT CIL)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlSi 10 TiH₂</u> <u>- 0,8 (600</u> <u>MAT CIL)</u>
MASA, m [g]	$m = 0,45\text{kg}$	$m = 0,6\text{ kg}$	$m = 0,9\text{ kg}$	$m = 0,45\text{ kg}$	$m = 0,6\text{ kg}$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,3	0,4	0,6	0,3	0,4
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$	$v = 6\text{mm/min}$
NAZIV UZORAKA	<u>ALULIGHT</u> <u>AlSi 10 TiH₂</u> <u>- 0,8 (900</u> <u>MAT CIL)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlSi 10 TiH₂ -</u> <u>0,8 (450 MAT)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlSi 10 TiH₂</u> <u>- 0,8 (600</u> <u>MAT)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlSi 10 TiH₂</u> <u>- 0,8 (900</u> <u>MAT)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlMgSi 0,6</u> <u>TiH₂ - 0,4</u> <u>(450 SJAJ)</u>
MASA, m [g]	$m = 0,9\text{ kg}$	$m = 0,45\text{ kg}$	$m = 0,6\text{ kg}$	$m = 0,9\text{ kg}$	$m = 0,45\text{ kg}$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,6	0,3	0,4	0,6	0,3
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 6$ mm/min	$v = 6\text{ mm/min}$	$v = 6\text{ mm/min}$	$v = 6\text{ mm/min}$	$v = 6\text{ mm/min}$
NAZIV UZORAKA	<u>ALULIGHT</u> <u>AlMgSi 0,6</u> <u>TiH₂ - 0,4</u> <u>(600 SJAJ)</u>	<u>ALULIGHT</u> <u>AlMgSi 0,6</u> <u>TiH₂ - 0,4</u> <u>(900 SJAJ)</u>			
MASA, m [g]	$m = 0,6\text{ kg}$	$m = 0,9\text{ kg}$			
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,4	0,6			
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 6$ mm/min	$v = 6\text{ mm/min}$			

Tablica 6.9. Iskoristivost apsorpcije energije prema [4]

Uzorak	Sila kN	Iskoristivost apsorpcije energije %
450 SJAJ CIL	50	43,7
	100	70,2
	150	62,3
	200	65,9
600 SJAJ CIL	50	55
	100	67,3
	150	85,4
	200	82,6
900 SJAJ CIL	50	1
	100	1,3
	150	8,2
	200	16,4
450 MAT CIL	50	67,9
	100	62,9
	150	60,9
	200	59,3
600 MAT CIL	50	57,7
	100	75,7
	150	74,4
	200	73,1
900 MAT CIL	50	9,9
	100	9,4
	150	32,4
	200	39,3
450 MAT	50	67
	100	62,7
	150	60,3
	200	58,5
600 MAT	50	38,6
	100	64,8
	150	63,1
	200	60,6
900 MAT	50	4,6
	100	8,9
	150	68,9
	200	90,5
450 SJAJ	50	33,2
	100	60,3
	150	69,4
	200	66,6

Tablica 6.10. Iskoristivost apsorpcije energije prema [4]

Uzorak	Sila kN	Iskoristivost apsorpcije energije %
600 SJAJ	50	39,4
	100	59,5
	150	66,3
	200	63,8
900 SJAJ	50	0,5
	100	3,2
	150	5,2
	200	10,5

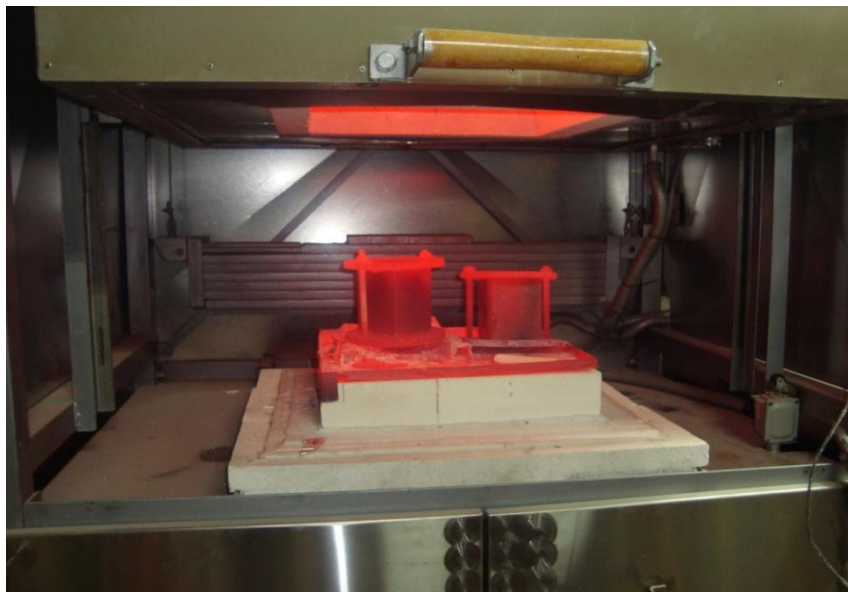
6.6 Apsorpcija energije udara ojačanih aluminijskih pjena

Uzorci su izrađeni u zvonastoj peći snage 7.5 kW.



Slika 6.7. Zvonasta peć

U peć zagrijanu na oko 780°C umeću se kalupi ispunjeni prekursorom i umetkom ili samo prekursorom. Za umetke je upotrebljena opruga dimenzija \varnothing 66 mm, dužine 95 mm i promjera žice 9 mm, izrađena od čelika Č 2130. Kao umetci koristili su se i 3 lima dimenzija 62 mm × 95 mm, debljine 0,75 mm. Također su korištene i 4 šipke presjeka 6 mm × 6 mm, dužine 95 mm, zavarene kako bi mogle biti postavljene okomito u kalup.



Slika 6.8. Kalupi unutar peći prilikom izrade aluminijskih pjena

Izrađeno je dvanaest uzoraka aluminijske pjene, od kojih će tri biti ojačana oprugom, tri ojačana šipkama, tri ojačana limovima, te tri neojačana uzorka. Nakon toga provedeno je tlačno ispitivanje uzoraka aluminijskih pjena,

Tablica 6.11. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti uzoraka ojačanih oprugom [2]

NAZIV UZORAKA	380 sjaj opruga 1 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	410 sjaj opruga 2 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	410 sjaj opruga 3 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4
MASA, m [g]	$m = 0.9089$	$m = 0.938$	$m = 0.938$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,293	0,316	0,316
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 60\text{mm/min}$	$v = 60\text{mm/min}$	$v = 60\text{mm/min}$

Tablica 6.12. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti uzoraka ojačanih šipkama [2]

NAZIV UZORAKA	390 sjaj šipke 1 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	390 sjaj šipke 2 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	390 sjaj šipke 3 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4
MASA, m [g]	$m = 0.5297$	$m = 0.5297$	$m = 0.5297$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,272	0,272	0,272
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 60\text{mm/min}$	$v = 60\text{mm/min}$	$v = 60\text{mm/min}$

Tablica 6.13. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti uzoraka ojačanih limom [2]

NAZIV UZORAKA	390 sjaj lim 1 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	390 sjaj lim 2 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4	390 sjaj lim 3 ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH2 - 0,4
MASA, m [g]	$m = 0.4962$	$m = 0.4962$	$m = 0.4962$
Relativna gustoća (ρ/ρ_s)	0,270	0,270	0,270
BRZINA ISPITIVANJA, v [mm/min]	$v = 60\text{mm/min}$	$v = 60\text{mm/min}$	$v = 60\text{mm/min}$

Tablica 6.14. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije materijala ojačanih oprugom pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN

Iskoristivost apsorpcije energije (%) pri tlačnoj sili od 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN	naziv uzorka	390 sjaj opruga 1	410 sjaj opruga 2	410 sjaj opruga 3	Prosjek
	50	44,07	37,4	61,12	47,5
	100	59,78	51,6	44,8	51,9
	150	46,82	38,81	34,01	39,8
	200	39,82	31,99	28	34,8

Tablica 6.15. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije materijala ojačanih šipkom pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN

Iskoristivost apsorpcije energije (%) tlačnoj sili od 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN	naziv uzorka	390 sjaj šipke 1	390 sjaj šipke 2	390 sjaj šipke 3	Prosjek
	50	34,5	42,03	50,2	42,16
	100	42,14	41,09	69,79	51
	150	81,5	81,8	76,87	80,05
	200	64,1	64	61,2	63,1

Tablica 6.16. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije materijala ojačanih limom pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN

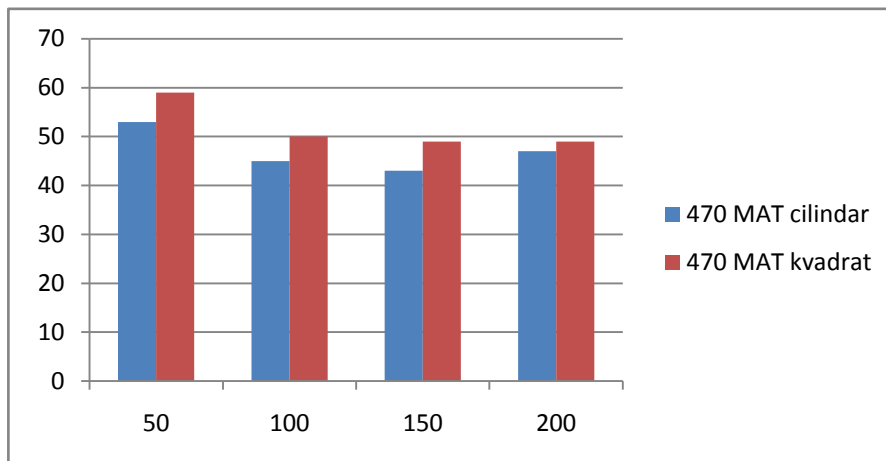
Iskoristivost apsorpcije energije (%) pri tlačnoj sili od 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN	naziv uzorka	390 sjaj lim 1	390 sjaj lim 2	390 sjaj lim 3	Prosjek
	50	48,75	46,25	46,25	47,08
	100	63,93	57,54	63,23	61,5
	150	45,9	66,71	62,5	58,33
	200	67,2	55,3	52,7	58,2

Tablica 6.17. Izračunate vrijednosti iskoristivosti apsorpcije energije neojačanih materijala pri vrijednostima sila 50, 100, 150, 200 kN

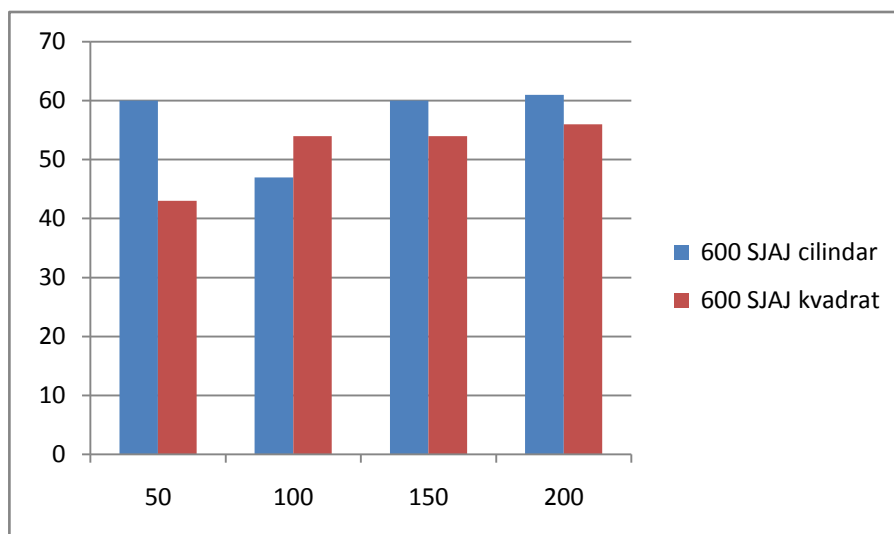
Iskoristivost apsorpcije energije (%) pri tlačnoj sili od 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN	naziv uzorka	390 sjaj 1	390 sjaj 2	390 sjaj 3	Prosjek
	50	50	60	62	57,3
	100	64	41	41	49,3
	150	56	30	31	39
	200	47	27	27	33,6

6.7 Analiza dobivenih rezultata

6.7.1. Utjecaj oblika poprečnog presjeka

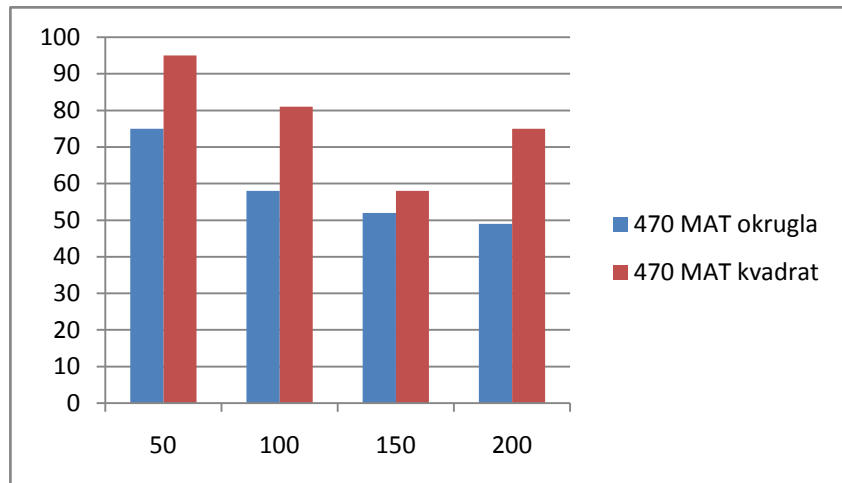


Slika 6.9 Usporedba 470 MAT cilindar i 470 MAT kvadrat iz [9]

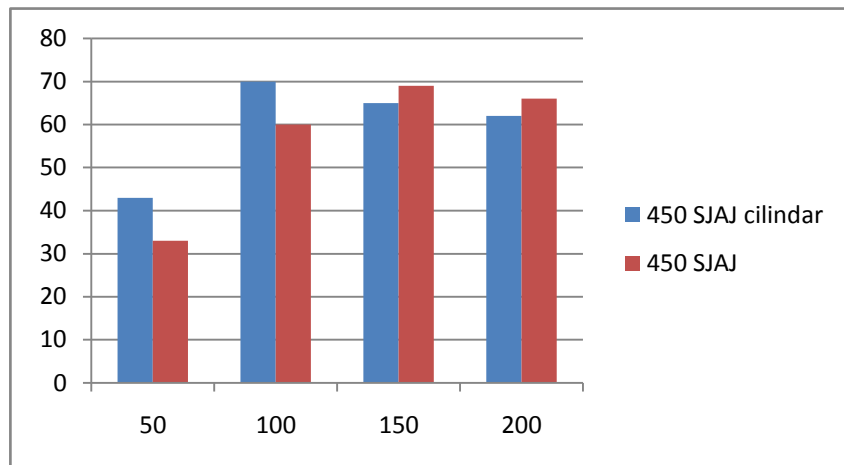


Slika 6.10 Usporedba 600 SJAJ cilindar i 600 SJAJ kvadrat iz [9]

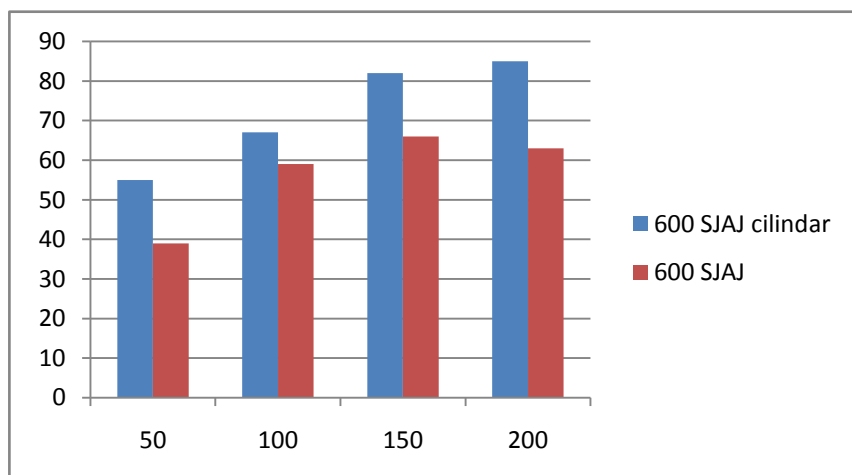
Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena



Slika 6.11 Usporedba 470 MAT okrugla i 470 MAT kvadrat prema [1]

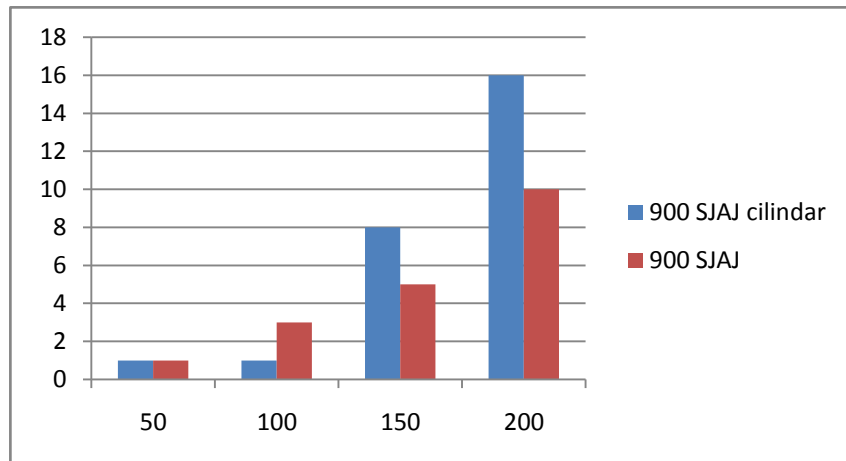


Slika 6.12 Usporedba 450 SJAJ cilindar i 450 SJAJ prema [4]

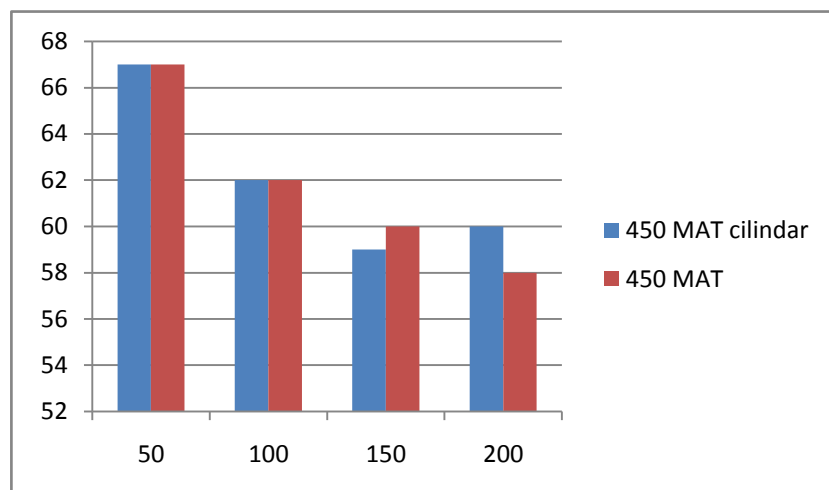


Slika 6.13 Usporedba 600 SJAJ cilindar i 600 SJAJ prema [4]

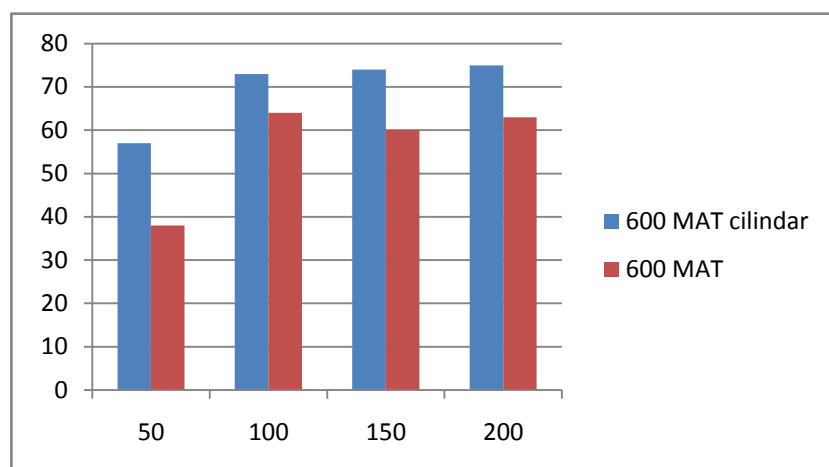
Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena



Slika 6.14 Usporedba 900 SJAJ cilindar i 900 SJAJ prema [4]

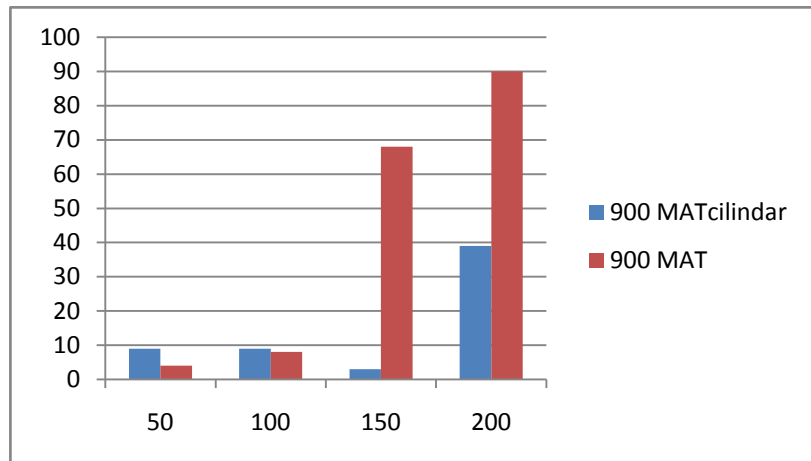


Slika 6.15 Usporedba 450 MAT cilindar i 450 MAT prema [4]



Slika 6.16 Usporedba 600 MAT cilindar i 600 MAT prema [4]

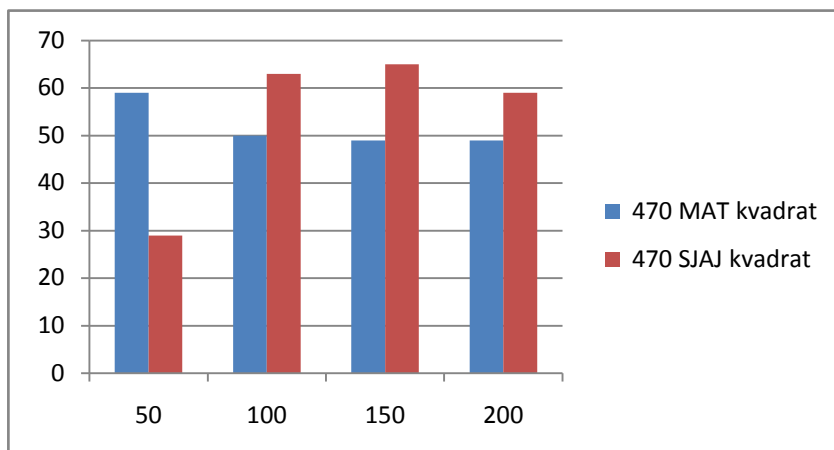
Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena



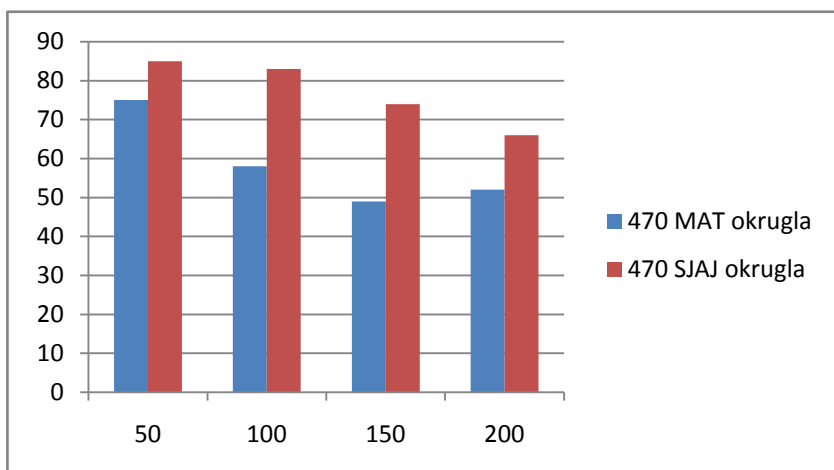
Slika 6.17 Usporedba 900 MAT cilindar i 900 MAT prema [4]

Uzorci kvadratnog poprečnog presjeka imaju veću iskoristivost imaju pri manjim gustoćama. Cilindrični uzorci pokazuju veću iskoristivost pri srednjim gustoćama, dok pri visokim gustoćama se ne može predvidjeti koji će uzorci imati veću iskoristivost.

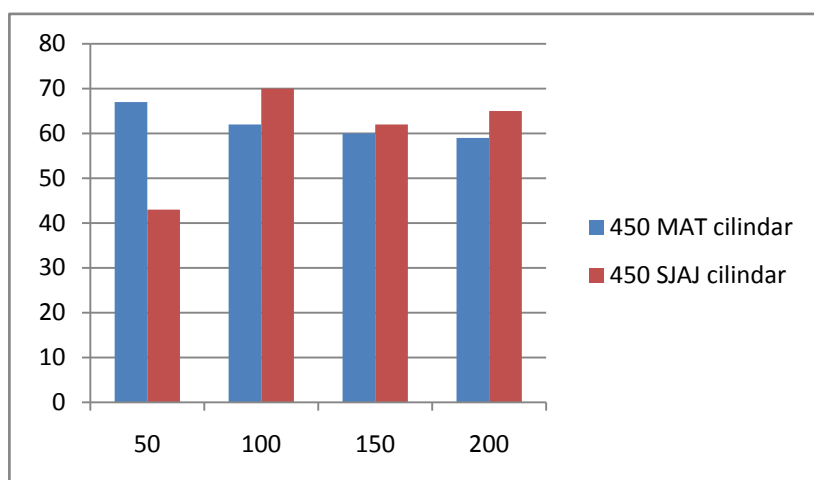
6.7.2. Utjecaj kemijskog sastava



Slika 6.18 Usporedba 470 MAT kvadrat i 470 SJAJ kvadrat prema [9]

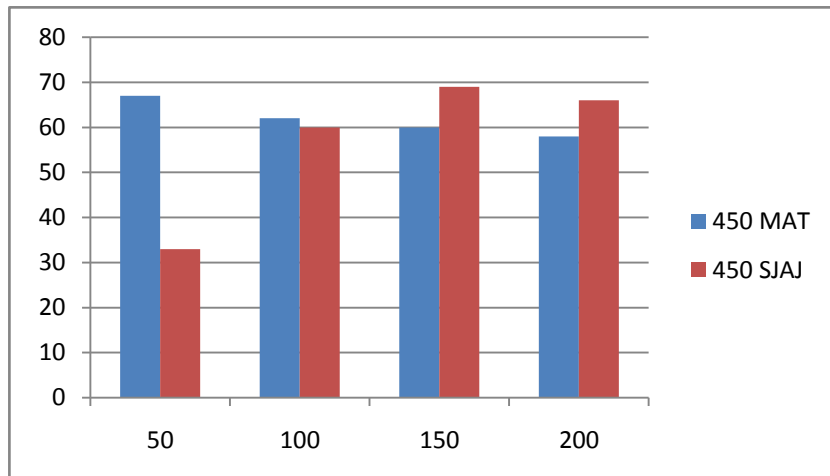


Slika 6.19 Usporedba 470 MAT okrugla i 470 SJAJ okrugla prema [1]

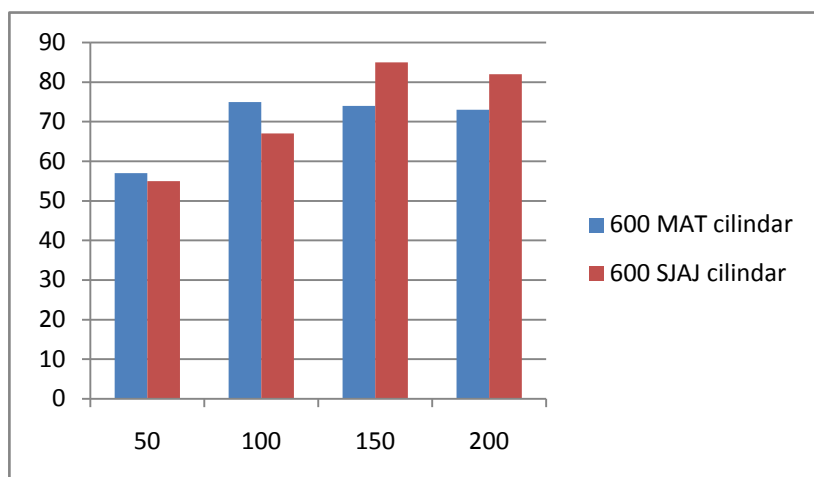


Slika 6.20 Usporedba 450 MAT cilindar i 450 SJAJ cilindar prema [4]

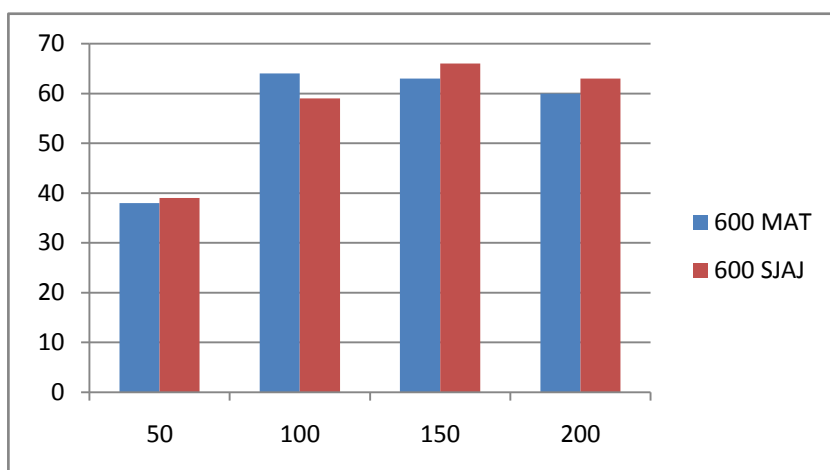
Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena



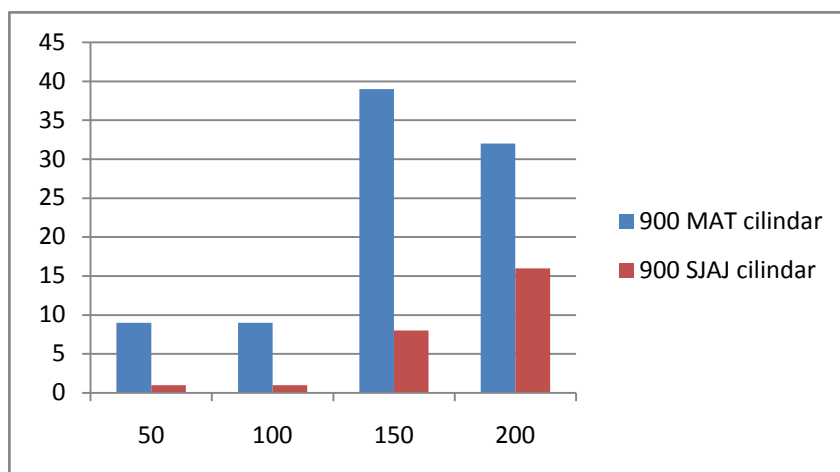
Slika 6.21 Usporedba 450 MAT i 450 SJAJ prema [4]



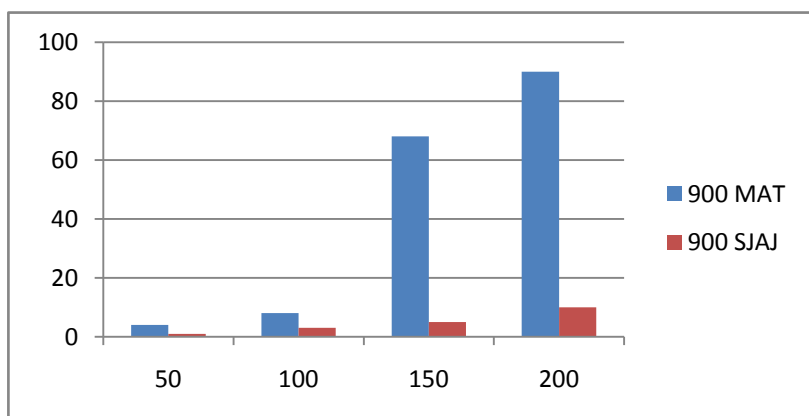
Slika 6.22 Usporedba 600 MAT cilindar i 600 SJAJ cilindar prema [4]



Slika 6.23 Usporedba 600 MAT i 600 SJAJ prema [4]



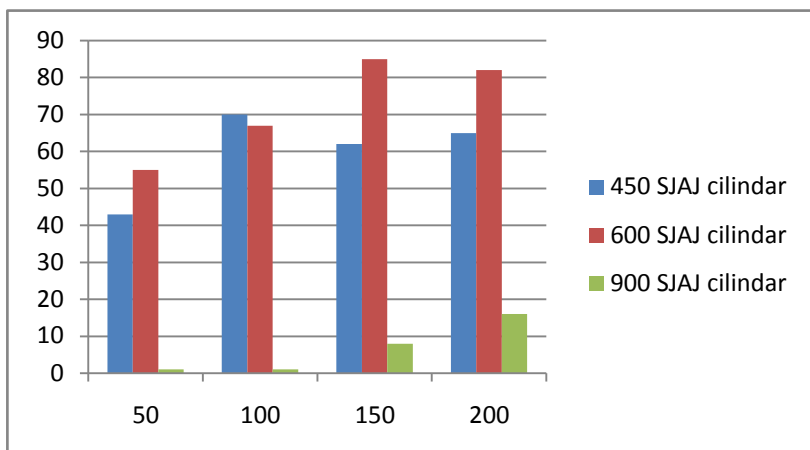
Slika 6.24 Usporedba 900 MAT cilindar i 900 SJAJ cilindar prema [4]



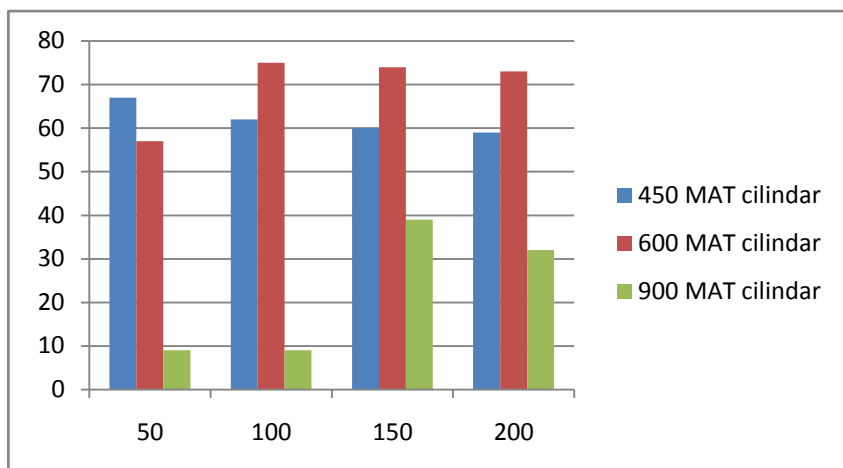
Slika 6.25 Usporedba 900 MAT i 900 SJAJ prema [4]

Pri manjim silama uzorci legirani silicijem (MAT) imaju malo veću iskoristivost od uzoraka legiranih magnezijom (SJAJ). Pri većim silama veća je iskoristivost SJAJ uzoraka, jedino pri velikim gustoćama (MAT 900 i SJAJ 900) iskoristivost uzoraka sa silicijem višestruko nadmašuje uzorke sa magnezijom.

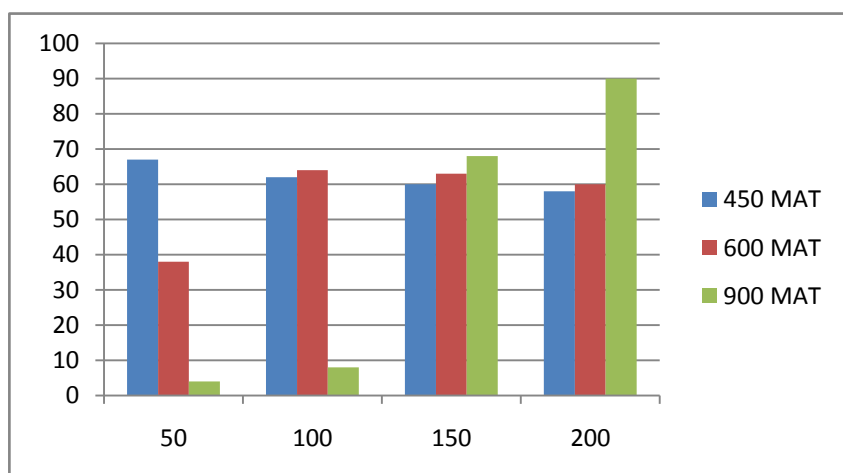
6.7.3. Utjecaj gustoće



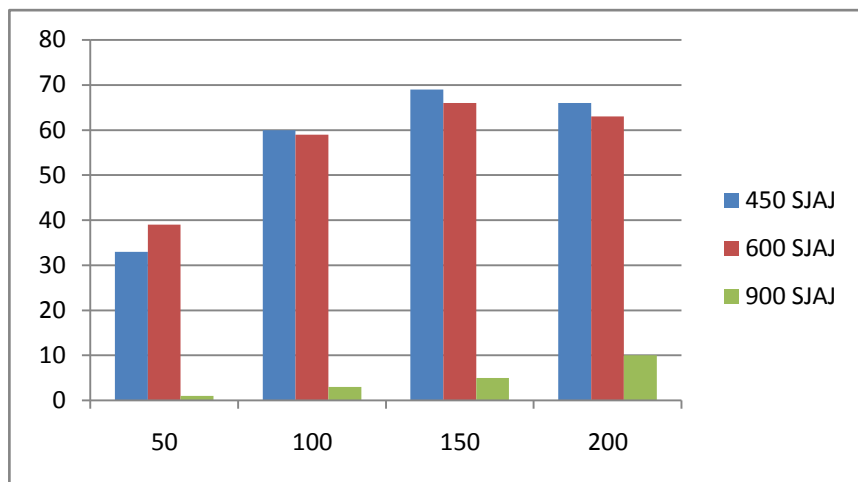
Slika6.26 Usporedba 450 SJAJ cilindar, 600 SJAJ cilindar i 900 SJAJ cilindar prema [4]



Slika6.27 Usporedba 450 MAT cilindar, 600 MAT cilindar i 900 MAT cilindar prema [4]



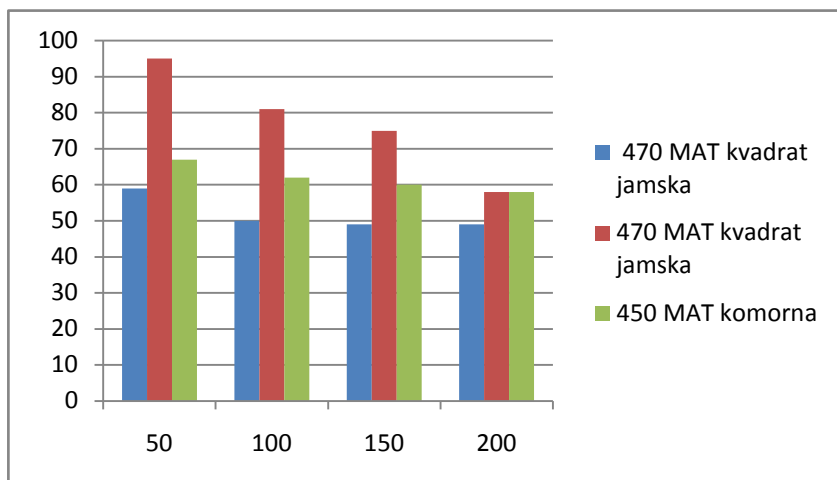
Slika6.28 Usporedba 450 MAT, 600 MAT i 900 MAT prema [4]



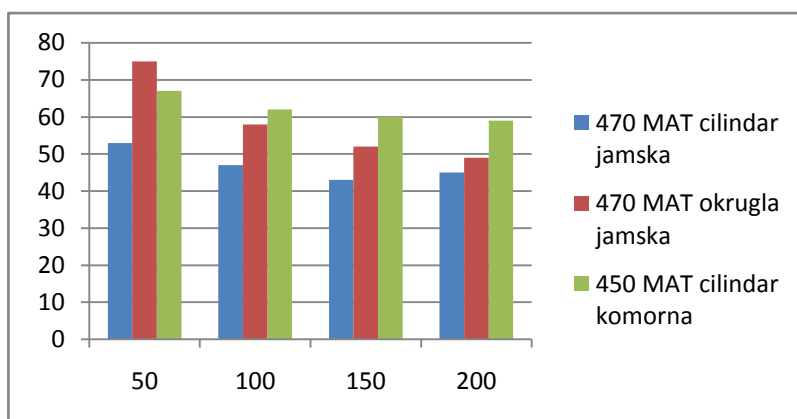
Slika6.29 Usporedba 450 SJAJ, 600 SJAJ i 900 SJAJ prema [4]

Kod uzoraka cilindričnog presjeka najbolja iskoristivost je uočljiva kod srednjih gustoća dok je kod kvadratnih uzoraka nemoguće odrediti hoće li iskoristivost biti bolja sa manjom ili većom gustoćom.

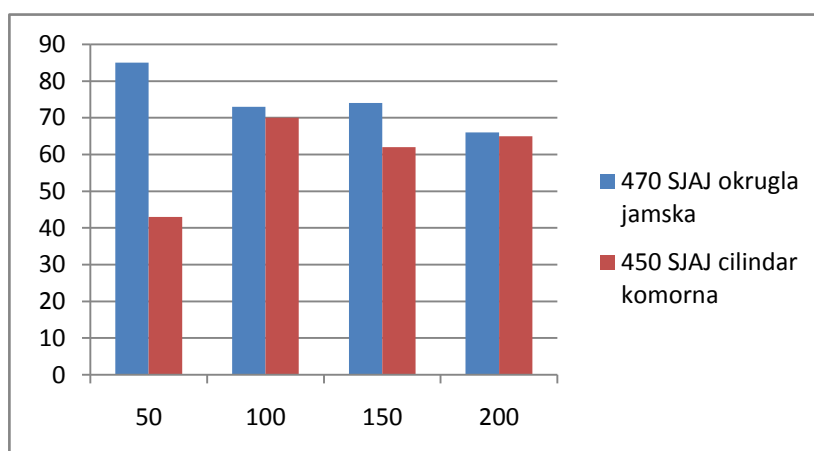
6.7.4 Utjecaj vrste peći



Slika6.30 Usporedba 470 MAT kvadrat, 470 MAT kvadrat i 450 MAT prema [9],[1] i [4]

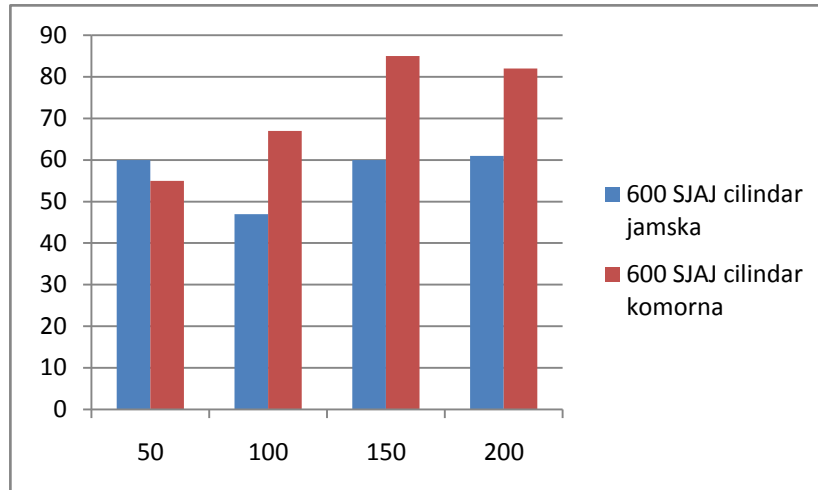


Slika6.31 Usporedba 470 MAT cilindar, 470 MAT okrugla i 450 MAT cilindar prema [9],[1] i [4]



Slika 6.32 Usporedba 470 SJAJ okrugla i 450 SJAJ cilindar prema [1] i [4]

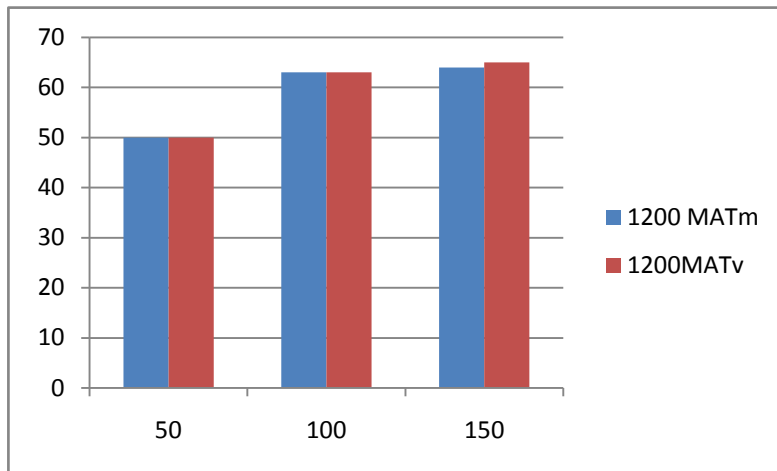
Iskoristivost apsorpcije energije udara aluminijskih pjena



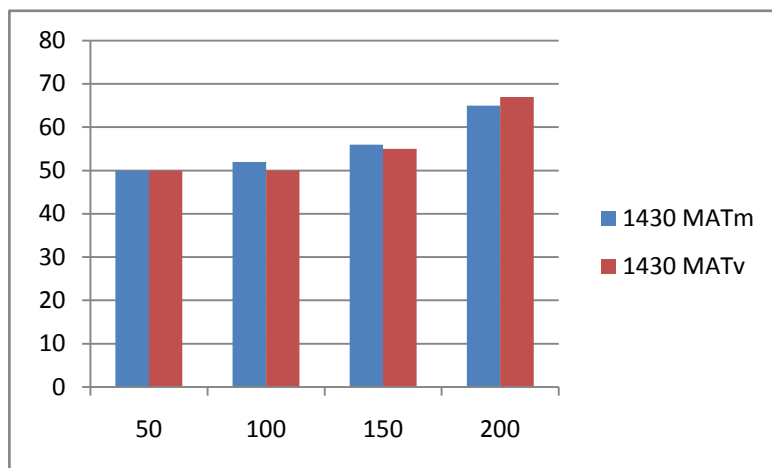
Slika 6.33 Usporedba 600 SJAJ cilindar i 600 SJAJ cilindar prema [9] i [4]

Iskoristivost apsorpcije energije uzoraka ne ovisi o vrsti peći u kojoj su uzorci izrađeni.

6.7.5. Utjecaj brzine tlačenja



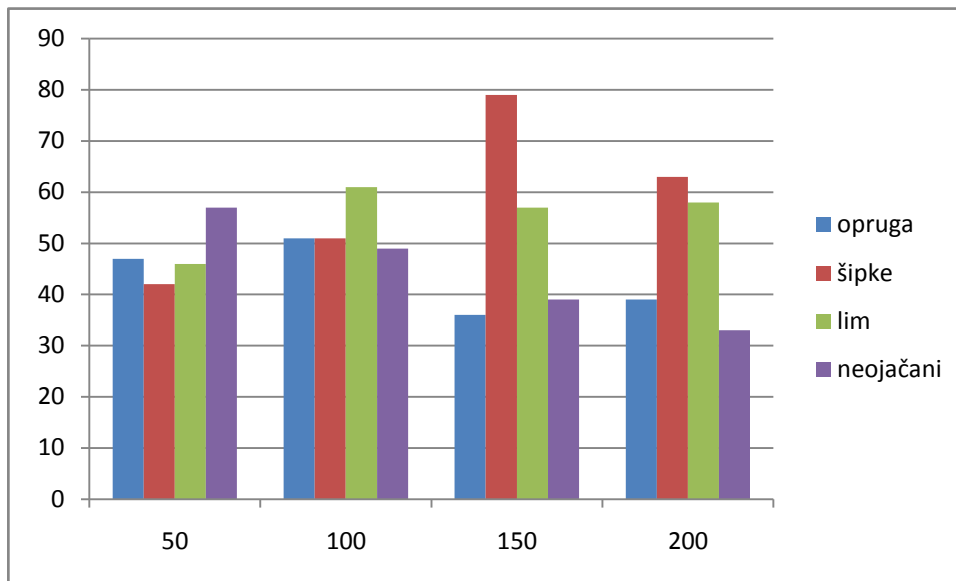
Slika 6.34 Usporedba 1200 MATm i 1200 MATv prema [3]



Slika 6.35 Usporedba 1430 MATm i 1430 MATv prema [3]

Brzina tlačenja nema ili ima neznatan i zanemariv utjecaj na iskoristivost apsorpcije energije.

6.7.6 Utjecaj ojačala



Slika 6.36 Usporedba uzoraka ojačanih oprugama, šipkama, limovima te neojačanih uzoraka prema [2]

Najbolju iskoristivost pokazuju uzorci ojačani šipkama, pogotovo pri većim silama. Uz njih su uzorci ojačani limovima dok neojačani uzorci najveću iskoristivost imaju pri sili od 50 kN nakon čega se njihova iskoristivost smanjuje.

7. Zaključak

Metalne pjene su relativno nova skupina materijala sa nedovoljno ispitanim mehaničkim, toplinskim, električnim i akustičnim svojstvima. Osim djelomično neistraženih svojstava ono što ih čini zanimljivim je njihova struktura koja je proizašla iz pokušaja oponašanja prirodnih ćelijastih građa i struktura te njihovog prilagođavanja za tehničku primjenu.

Uzorci kvadratnog poprečnog presjeka imaju veću iskoristivost imaju pri manjim gustoćama. Cilindrični uzorci pokazuju veću iskoristivost pri srednjim gustoćama, dok pri visokim gustoćama se ne može predvidjeti koji će uzorci imati veću iskoristivost.

Pri manjim silama uzorci legirani silicijem (MAT) imaju malo veću iskoristivost od uzoraka legiranih magnezijem (SJAJ). Pri većim silama veća je iskoristivost SJAJ uzoraka, jedino pri velikim gustoćama (MAT 900 i SJAJ 900) iskoristivost uzoraka sa silicijem višestruko nadmašuje uzorke sa magnezijem.

Kod uzoraka cilindričnog presjeka najbolja iskoristivost je uočljiva kod srednjih gustoća dok je kod kvadratnih uzoraka nemoguće odrediti hoće li iskoristivost biti bolja sa manjom ili većom gustoćom.

Iskoristivost apsorpcije energije uzoraka ne ovisi o vrsti peći u kojoj su uzorci izrađeni.

Brzina tlačenja nema ili ima neznatan i zanemariv utjecaj na iskoristivost apsorpcije energije.

Najbolju iskoristivost pokazuju uzorci ojačani šipkama, pogotovo pri većim silama. Uz njih su uzorci ojačani limovima dok neojačani uzorci najveću iskoristivost imaju pri sili od 50 kN nakon čega se njihova iskoristivost smanjuje

U budućnosti će metalne pjene zauzimati važno mjesto u industriji. Daljnja istraživanja će potpuno definirati strukturu metalnih pjena, a i cijena će im s vremenom se sniziti.

Literatura:

- [1] Hrabrić Ivan "Završni rad određivanje apsorpcije energije udara aluminijskih pjena", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [2] Hrabrić Ivan "Diplomski rad Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [3] Krapinec Zvonimir "Diplomski rad Određivanje apsorpcije energije aluminijske pjene", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [4] Previšić Pero "Diplomski rad' Apsoprcija energije udara aluminijskih pjena', Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2008
- [5] Prusac Denis "Magistarski rad Otpornost na trošenje keramičkih prevlaka na aaluminijskim pjenama", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2007
- [6] T.Filetin, I.Kramer, G.Marić "Metalne pjene- proizvodnja, svojstva i primjena", Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [7] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson: «Compressive and tensile behaviour of aluminium foams», Materials Science and Engineering A270 (1999.), p. 113-124
- [8] E.W. Andrews, J.-S. Huang, L.J. Gibson:» Creep behaviour of a closed-cell aluminium foam», Acta mater. Vol. 47, No. 10, p. 2927-2935, 1999;
- [9] Bobek Petar "Diplomski rad Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2008.