

# Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena

---

**Bobek, Petar**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2008**

*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:235:958723>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-16**

*Repository / Repozitorij:*

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





**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**



**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Petar Bobek**

**Zagreb, 2008**



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**



**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mentor : Doc.dr.sc. Krešimir Grilec**

**Petar Bobek**

**Zagreb, 2008**

## **Sažetak**

Tema ovog rada je “Apsorpcija energije udara aluminijskih pjena”. Metalne pjene predstavljaju relativno novu vrstu materijala kod koje još nismo potpuno ovladali parametrima procesa izrade, ali čije izučavanje pronalazi opravdanost u mogućem vrlo širokom polju primjena. U daljnjem tekstu pojašnjeno je što su to metalne pjene, navedeni su postupci proizvodnje metalnih pjena, svojstva i primjena metalnih pjena, te metode ispitivanja apsorpcije energije udara. Upravo ta sposobnost apsorpcije energije udara jedno je od najzanimljivijih uporabnih svojstava metalnih pjena.

U praktičnom dijelu ovog diplomskog rada izrađeni su uzorci od aluminijskih pjena, te je na njima ispitana apsorpcija energije udara. Uzorci su izrađeni od različitih aluminijskih pjena, različitih su dimenzija i gustoće. Za ispitivanjem ovog svojstva posebno je izražen interes u industriji transportnih sredstava jer mnogi dijelovi vozila u eksploataciji mogu biti izloženi udarnim opterećenjima.

---

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA.....	VII
GRČKE OZNAKE.....	VIII
IZJAVA.....	IX
1. UVOD.....	1
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA.....	6
2.1. Ubrizgavanje plina u taljevinu.....	7
2.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini.....	9
2.3. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi.....	11
2.4. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera.....	15
2.5. Taloženje metala na ćelijaste praobljke.....	17
2.6. Ekspanzija plina u taljevini.....	18
2.7. Građe s kuglastim šupljinama.....	20
2.8. Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv.....	23
2.9. Eutektičko skrućivanje plin-metal.....	24
3. SVOJSTVA METALNIH PJENA.....	27
3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena.....	27
3.1.1. Tlačna čvrstoća.....	30
3.1.2. Apsorpcija energije udara.....	33
3.1.3. Propagacija udarnog vala.....	37
3.1.4. Ojačane metalne pjene.....	39
3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena.....	42
3.3. Zvučna svojstva metalnih pjena.....	44
3.4. Prigušenje vibracija metalnih pjena.....	46
4. SPAJANJE METALNIH PJENA.....	47
4.1. Spajanje ljepilima.....	47
4.2. Rastavljivi spojevi.....	47
4.3. Zavarivanje.....	50
5. PRIMJENA METALNIH PJENA.....	52
6. METODE ISPITIVANJA APSORPCIJE ENERGIJE UDARA.....	61
6.1. Analitičke metode određivanja apsorpcije energije udara.....	61
6.1.1. Iskoristivost apsorpcije energije udara.....	61
6.1.2. Kapacitet apsorpcijske energije.....	63
6.1.3. Dijagram apsorbirane energije.....	64
6.2. Eksperimentalne metode određivanja apsorpcije energije udara.....	66
6.2.1. Statički tlačni pokus.....	66
6.2.2. Dinamički tlačni pokus.....	68
6.3. Ponašanje aluminijske pjene pri tlačnom pokusu.....	69
7. EKSPERIMENTALNI DIO.....	75
7.1. Idejni projekt.....	75
7.2. Izrada uzoraka.....	78

---

7.3. Ispitivanje uzoraka.....	84
7.4. Određivanje apsorpcije energije udara.....	94
8. ZAKLJUČAK.....	98
LITERATURA.....	99

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Mikrostruktura prirodnih ćelijastih materijala : a) pluto; b) balza; c) spužva; d) kost; e) koralj; f) riblja kost; g) list irisa; h) stabljika biljke.....	1
Slika 1.2. Prikaz strukture kosti (A) i metalne pjene (B) .....	3
Slika 1.3. Prikaz strukture Zn pjene i kruha (HMI Berlin) .....	3
Slika 1.4. Profil izrađen od aluminijske pjene .....	4
Slika 2.1. Proizvodnja aluminijske pjene ubrizgavanjem zraka u taljevinu postupkom "Alcan/NorskHydro/CYMAT" .....	8
Slika 2.2. Proces nastajanja metalne ALPORAS pjene .....	9
Slika 2.3. Ploče izrezane iz većeg bloka metalne pjene nastalog postupkom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u taljevini .....	10
Slika 2.4. Pojednostavljeni prikaz postupka FOAMINAL – ALULIGHT .....	12
Slika 2.5. Miješanje sastojaka .....	12
Slika 2.6. Stvaranje trupaca izostatičkim prešanjem (100 MPa) mješavine prahova .....	13
Slika 2.7. Stvaranje prekursora .....	13
Slika 2.8. Pjenjenje prekursora .....	14
Slika 2.9. Kruti uložak na okviru osobnog automobila izrađen od metalne ALULIGHT pjene .....	14
Slika 2.10. Ispuna naplatka kotača izrađenog od metalne ALULIGHT pjene ....	15
Slika 2.11. Proces nastajanja ERG DUOCEL metalne pjene .....	16
Slika 2.12. Proces nastajanja Ni metalne pjene (tzv. INCO pjena) .....	17
Slika 2.13. Proces nastajanja metalne pjene procesom širenja inertnog plina ..	19
Slika 2.14. Proces nastajanja metalne pjene razvijen na Georgia Techu .....	20
Slika 2.15. Proces nastajanja metalne pjene s kuglastim šupljinama IFAM postupkom .....	21
Slika 2.16. Metalna pjena s kuglastim šupljinama od nehrđajućeg čelika .....	22
Slika 2.17. Nastajanje metalne pjene povezivanjem dvaju materijala od kojih je jedan topljiv .....	23
Slika 2.18. Binarni dijagram stanja metal - vodik .....	24

Slika 2.19. Proces nastajanja metalne pjene eutektičkim plin - metal skrućivanjem .....	25
Slika 2.20. Izgled metalne pjene proizvedene eutektičkim plin – metal skrućivanjem .....	26
Slika 3.1. Dijagrami “naprezanje-skraćenje” metalnih pjena pri tlačnom opterećenju .....	30
Slika 3.2. Krivulje “naprezanje-deformacija” pod tlačnim opterećenjem aluminijskih pjena .....	31
Slika 3.3. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći .....	32
Slika 3.4. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja materijala ćelija ( $R_e$ ) o relativnoj gustoći .....	32
Slika 3.5. Omjer između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće .....	33
Slika 3.6. Krivulje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju (a) i tlaku (b) .....	34
Slika 3.7. Objekt obložen metalnom pjenom .....	35
Slika 3.8. Krivulja naprezanje – deformacija metalne pjene .....	37
Slika 3.9. Oblici mreža od nehrđajućeg čelika za ojačanje Al pjena .....	40
Slika 3.10. Utjecaj ojačanja na ponašanje pri savijanju grede od AlSi12 pjene poroznosti od 81 % .....	41
Slika 3.11. Ojačane Al pjene nakon udarnog opterećenja .....	42
Slika 3.12. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al .....	45
Slika 3.13. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode ; b) funkcija prigušenja .....	46
Slika 4.1. Proces povezivanja umetka i metalne pjene .....	48
Slika 4.2. Komad metalne pjene s bakrenim umetkom .....	48
Slika 4.3. Povezivanje metalne pjene pomoću vijka i umetka .....	49
Slika 4.4. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena .....	49
Slika 4.5. Lasersko zavarivanje metalne pjene .....	50
Slika 4.6. Presjek zavara dviju metalnih pjena .....	51
Slika 4.7. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena .....	51
Slika 5.1. Sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene .....	53



Slika 5.2. Primjena metalnih pjena u autoindustriji .....	53
Slika 5.3. Pregrada između kabine vozila i motora vozila, izrađena od metalne pjene .....	54
Slika 5.4. Branik automobila izrađen od aluminijske pjene .....	54
Slika 5.5. Udarni test nosača motora BMW – a .....	55
Slika 5.6. Grijača ploča izrađena od ALPORAS ojačane pjene .....	56
Slika 5.7. Izmjenjivač topline izrađen od DUOCEL aluminijske pjene .....	56
Slika 5.8. Plovak izrađen od metalne pjene .....	57
Slika 5.9. Vijadukt čija je donja površina izvedena od metalne pjene .....	58
Slika 5.10. Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena .....	58
Slika 5.11. Lijevani proizvod od aluminijske pjene .....	59
Slika 5.12. Korištenje metalnih pjena u estetske svrhe .....	59
Slika 5.13. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklene pjene .....	60
Slika 6.1. Dijagram tlačnog naprezanja i apsorpcijske iskoristivosti po relativnom skraćenju AlSi pjene ( $\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$ ) .....	62
Slika 6.2. Dijagram apsorbirane energije udara po jedinici volumena AlSi4 pjena različitih gustoća pri tlačnoj deformaciji od $\varepsilon = 20\%$ , $30\%$ , $40\%$ i $60\%$ .....	63
Slika 6.3. Tlačna karakteristika AlSi12 metalne pjene različitih gustoća .....	64
Slika 6.4. Maksimalno naprezanje metalne pjene različitih gustoća za zadanu apsorbiranu udarnu energiju .....	65
Slika 6.5. Kidalica u Laboratoriju za ispitivanje materijala (FSB Zagreb) .....	67
Slika 6.6. Dijagram tlačnog naprezanja i relativnog skraćenja metalne pjene pri statičkom tlačnom pokusu .....	68
Slika 6.7. Shematski prikaz SHPB uređaja .....	69
Slika 6.8. Dijagram tlačnog naprezanja i tlačne deformacije metale pjene .....	70
Slika 6.9. Dijagram tlačnog naprezanja i skraćenja aluminijske pjene AlSi 12 Mg 0,6 različitih gustoća .....	71
Slika 6.10. Utjecaj ćelija na tijek dijagrama tlačnog naprezanja – relativnog skraćenja metalne pjene konstantne gustoće $510 \text{ kg/mm}^3$ .....	72

Slika 6.11. Deformacijska krivulja AlSi 12 Mg 0,6 pjene .....	72
Slika 6.12. Dijagram tlačnog naprezanja i relativnog skraćivanja AlSi 12 Mg 0,6 pjene bez vanjske opne uz konstantnu gustoću u ovisnosti visine uzorka .....	73
Slika 6.13. Ovisnost brzine stlačivanja i granice stlačivanja po jedinici (relativne gustoće) za ALPORAS pjenu u odnosu na PS pjenu .....	74
Slika 7.1. Čelične cijevi koje služe kao kalupi za izradu uzoraka .....	75
Slika 7.2. Čelična cijev pripremljena za kalupljenje .....	76
Slika 7.3. Uzorak aluminijske pjene izvađen iz kalupa .....	77
Slika 7.4. Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (FSB, Zagreb) .....	77
Slika 7.5. Elektrootporna peć (FSB, Zagreb) .....	78
Slika 7.6. Vaga (Scout Pro) za mjerenje mase prekursora .....	79
Slika 7.7. Kalup napunjen sa prekursorima .....	79
Slika 7.8. Brtvljenje pripremljenog kalupa .....	80
Slika 7.9. Kalup u peći zagrijanoj na 850 °C .....	81
Slika 7.10. Stavljanje izradka u posudu sa vodom .....	81
Slika 7.11. Posuda sa vodom u koju je uronjen izradak .....	81
Slika 7.12. Izbijanje kvadratnog uzorka iz kalupa .....	82
Slika 7.13. Izbijanje cilindričnog uzorka iz kalupa .....	82
Slika 7.14. Uzorci aluminijskih pjena različite gustoće, materijala i oblika .....	83
Slika 7.15. Kidalica (WPM, EU 40 mod) na kojoj je izvršeno ispitivanje .....	84
Slika 7.16. Kvadratni uzorak prije početka ispitivanja .....	85
Slika 7.17. Kvadratni uzorak za vrijeme ispitivanja .....	85
Slika 7.18. Cilindrični uzorak za vrijeme ispitivanja .....	86
Slika 7.19. Kvadratni uzorak nakon završetka ispitivanja .....	86
Slika 7.20. Uzorci nakon statičkog tlačnog pokusa .....	87
Slika 7.21. Dijagram tlačna sila – skraćenje za kvadratne uzorke 470 mat .....	88
Slika 7.22. Dijagram srednje vrijednosti za kvadratne uzorke 470 mat .....	88
Slika 7.23. Dijagram tlačna sila – skraćenje za kvadratne uzorke 470 sjaj .....	89
Slika 7.24. Dijagram srednje vrijednosti za kvadratne uzorke 470 sjaj .....	89

Slika 7.25. Dijagram tlačna sila – skraćenje za kvadratne uzorke 600 sjaj .....	90
Slika 7.26. Dijagram srednje vrijednosti za kvadratne uzorke 600 sjaj .....	90
Slika 7.27. Dijagram tlačna sila – skraćenje za cilindrične uzorke 470 mat .....	91
Slika 7.28. Dijagram srednje vrijednosti za cilindrične uzorke 470 mat .....	91
Slika 7.29. Dijagram tlačna sila – skraćenje za cilindrične uzorke 600 sjaj .....	92
Slika 7.30. Dijagram srednje vrijednosti za cilindrične uzorke 600 sjaj .....	92
Slika 7.31. Dijagram srednjih vrijednosti svih ispitivanih uzoraka .....	93
Slika 7.32. Pravokutna metoda numeričkog integriranja .....	95

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva metalnih pjena .....	28
Tablica 2. Izrazi za izračunavanje svojstava metalnih pjena .....	29
Tablica 3. Toplinska svojstva metalnih pjena .....	43
Tablica 4. Moguća primjena metalnih pjena .....	52
Tablica 5. Uzorci aluminijskih pjena kvadratnog oblika .....	83
Tablica 6. Uzorci aluminijskih pjena cilindričnog oblika .....	83
Tablica 7. Apsorbirana energija udara za kvadratne uzorke .....	96
Tablica 8. Apsorbirana energija udara za cilindrične uzorke .....	96

## POPIS OZNAKA

$A$ ,	površina, mm <sup>2</sup>
$a^*$ ,	negativno ubrzanje, m/s <sup>2</sup>
$C$ ,	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
$E_f$ ,	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 <sup>1/2</sup>
$L$ ,	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 <sup>3</sup>
$x$ ,	veličina relativnog skraćenja u točki D, mm/mm
$y$ ,	veličina tlačnog naprezanja u točki D, N/mm <sup>2</sup>

## GRČKE OZNAKE

$\alpha$ ,	koeficijent toplinske rastezljivosti, 1/K
$\gamma$ ,	električna vodljivost, $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
$\varepsilon$ ,	deformacija, sabijanje, relativno skraćenje, mm/mm ili %
$\varepsilon_0$ ,	relativno skraćenje, mm/mm
$\varepsilon_D$ ,	deformacija pri zgušnjavanju, mm/mm ili %
$\varepsilon_f$ ,	vlačna duktilnost
$\varepsilon_t$ ,	sabijanje, mm/mm
$\eta$ ,	iskoristivost apsorbirane energije
$\eta^c$ ,	faktor gubitka, %
$\lambda$ ,	koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
$\nu$ ,	Poissonov faktor
$\rho$ ,	gustoća metalne pjene, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$ ,	gustoća neporoznog metala, kg/m <sup>3</sup>
$\rho/\rho_s$ ,	relativna gustoća
$\sigma$ ,	naprezanje, MPa
$\sigma_c$ ,	tlačno naprezanje, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_t$ ,	tlačno naprezanje, N/mm <sup>2</sup>

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem uz pomoć navedene literature.

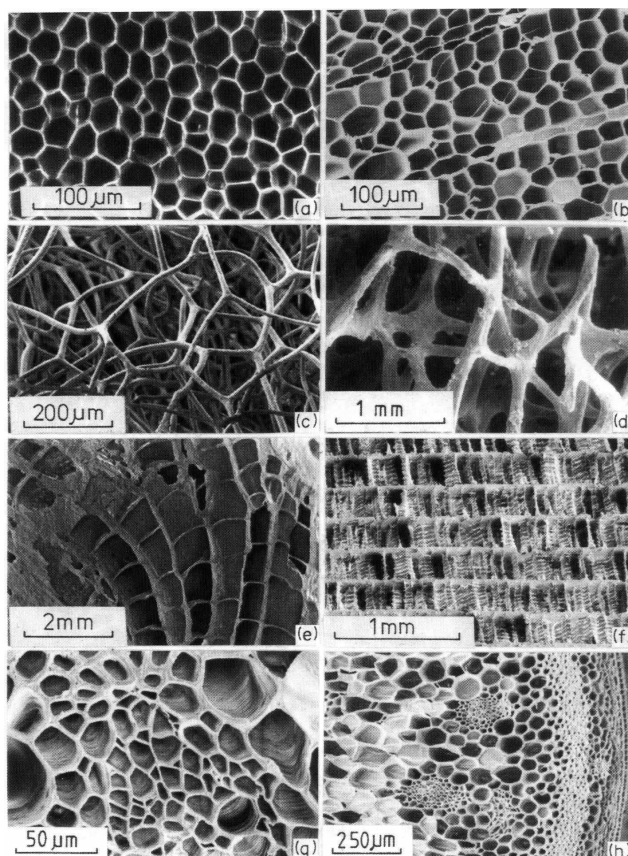
Ovom prilikom želim se zahvaliti na stručnoj pomoći svome mentoru doc.dr.sc. Krešimiru Grilecu i kolegama na katedri za materijale i tribologiju.

Zahvaljujem se laborantu Božidaru Bušetinčanu ,iz Laboratorija za nemetale, na pomoći u izradi uzoraka i laborantu Romanu Divjaku ,iz Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava, na pomoći pri ispitivanju uzoraka.

Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i potpori.

## 1. UVOD

Metalne pjene predstavljaju potpuno novi oblik metalnih materijala koji je još uvijek relativno nepoznat inženjerima. Iako su prvi patenti na ovom području prijavljeni prije 50-tak godina intenzivna istraživanja metalnih pjena počela su tek unazad 10-tak godina. U prirodi često nailazimo na ćelijaste materijale, kao što su npr. kamen, drvo, kost, koralj i sl. (slika 1.1). Metalne pjene su pokušaj oponašanja takvih građa i struktura za tehničke uvjete primjene. Njihova glavna karakteristika je visoka poroznost koja se kreće od 40 do 90 %. To su porozni metalni materijali ispunjeni šupljinama (ćelijama) koje mogu varirati po obliku (otvorene, zatvorene) i veličini. Uz sve gore navedeno i vrsta osnovnog materijala bitno određuje njihova svojstva.



Slika 1.1. Mikrostruktura prirodnih ćelijastih materijala : a) pluto; b) balza;  
c) spužva; d) kost; e) koralj; f) riblja kost; g) list irisa; h) stabljika biljke /1/



Svojstva se uglavnom reguliraju promjenom parametara procesa proizvodnje, čime se primarno utječe na strukturu. Čelijasta struktura omogućuje optimalnu kombinaciju mehaničkih svojstava i funkcionalnosti pri minimalnoj težini.

Materijali koji se koriste za izradu ćelijastih nosivih struktura su :

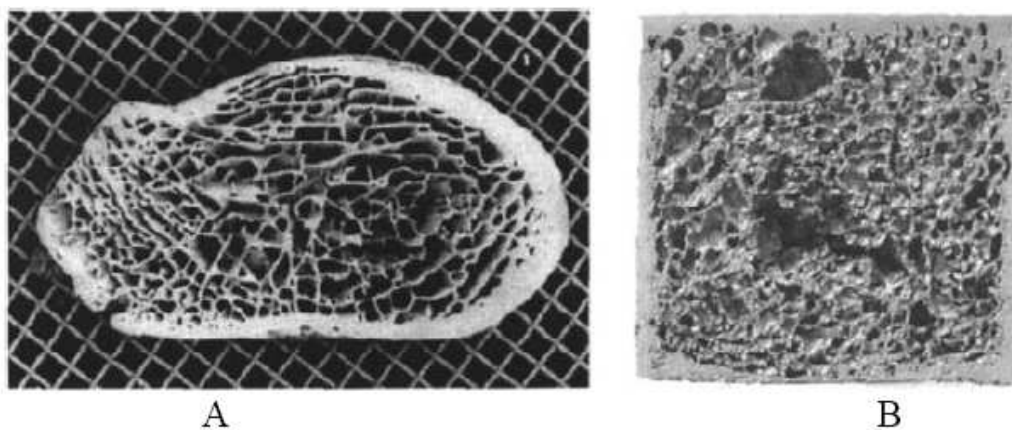
- polimeri - preslabi za veća opterećenja
- keramika -prekrhka
- metali – dovoljno žilavi i kruti

Osnovna svojstva metalnih pjena su /2/ :

- visoka poroznost (40 – 90 %) tj. niska gustoća (masa)
- relativno visoka krutost (naročito kod sendvič konstrukcija)
- dobra izolacijska svojstva (zvuk, toplina)
- stabilni su na povišenim temperaturama (negorivost), kada su izloženi vatri ne oslobađaju otrovne plinove
- odlična apsorpcija energije udara
- lako se recikliraju

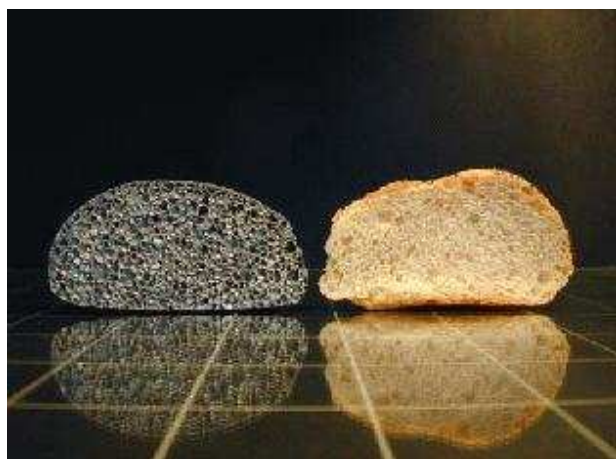
Metalne pjene izrađuju se novim procesnim tehnikama koje se iz dana u dan razvijaju i unapređuju. Neki od tih postupaka još nisu potpuno dorađeni i kvantitativno opisani, što može izazvati neželjene varijacije svojstava, a niti metode ispitivanja nisu u potpunosti razrađene i provjerene.

Slika 1.2 prikazuje strukturu kosti i metalne pjene.



Slika 1.2. Prikaz strukture kosti (A) i metalne pjene (B) /3/

Slika 1.3 prikazuje usporedbu metalne pjene i kruha



Slika 1.3. Prikaz strukture Zn pjene i kruha (HMI Berlin) /4/

Početne sirovine za proizvodnju metalnih pjena mogu biti u obliku taljevine ili praha. Samo upjenjavanje materijala se uvijek događa iz tekuće faze tako da se i prah dovodi u rastaljeno stanje. Izvor plina nužan je preduvjet za stvaranje praznina unutar rastaljenog metala. On može biti vanjski ili se u taljevinu dodaje raspršujući agens koji pospešuje upjenjavanje. Stvaranje pjene može biti trenutno ili odgođeno.

Komercijalno su danas najdostupnije metalne pjene na bazi aluminijske (Al) i nikla (Ni), no metalne pjene mogu se proizvesti iz gotovo svih vrsta metala koji postoje u obliku praha. Po posebnoj narudžbi proizvode se i pjene na bazi olova (Pb), magnezija (Mg), cinka (Zn), bakra (Cu), titana (Ti), čelika, bronce, čak i zlata (Au).



Slika 1.4. Profil izrađen od aluminijske pjene /5/

S obzirom na intenzivnost proučavanja metalnih pjena u narednih pet godina očekuje se znatno povećanje vrsta ovih materijala na tržištu. Kombinacijom više metala može se dobiti širok raspon svojstava, a također je moguće i konstruiranje materijala za točno određeni proizvod.

Budući da su proizvodni procesi za izradu metalnih pjena još u ranoj fazi razvitka, postoje i neki nedostaci koji još uvijek nisu riješeni, a to su najčešće /6/ :

- nedostatak razumijevanja osnovne mehanike metalnih pjena. Neki dijelovi tog područja još su uvijek nerazjašnjeni.
- nemogućnost proizvodnje pjena konstantne kvalitete pomoću prethodno definiranih parametara
- primjena ovih materijala u inženjerskoj praksi još je uvijek na niskoj razini.

Razlozi tome su sljedeći: fizikalna svojstva pjena još su nedovoljno poznata – rješenja se traže u optimalizaciji procesa upjenjivanja; znanje o svojstvima pjena nedovoljno je – traže se novi, djelotvorniji načini ispitivanja metalnih pjena koji će omogućiti njihovu potpunu karakterizaciju; prijenos rezultata istraživanja između institucija danas još uvijek nije na zadovoljavajućoj razini; neki oblici metalnih pjena još su uvijek preskupi; potrebno je naći mogućnosti primjene metalnih pjena tamo gdje su njihova svojstva u potpunosti iskorištena i tamo gdje cijena materijala nema prevelik udio u cijeni konačnog proizvoda.

## 2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

Pronalaženje novih, djelotvornijih i bolje upravljivih procesa za proizvodnju pjena nužno je kako bi se ostvarila još bolja svojstva. To je važno i zato da se procesom proizvodnje, na temelju prethodno zadanih parametara, postignu točno određena svojstva. Danas je poznato devet načina proizvodnje metalnih pjena od kojih je pet u komercijalnoj uporabi.

Svi ti načini dijele se na četiri šira područja :

- pjena se oblikuje iz parne faze
- pjena se oblikuje elektrotaloženjem iz tekuće faze
- pjena se oblikuje u rastaljenoj fazi
- pjena se oblikuje u čvrstoj fazi

Svakim od tih devet postupaka može se donekle utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija te na relativnu gustoću. Postupci će biti ukratko opisani u narednom dijelu teksta (u zagradama navedeni su metali od kojih se određenim postupkom mogu proizvesti pjene) :

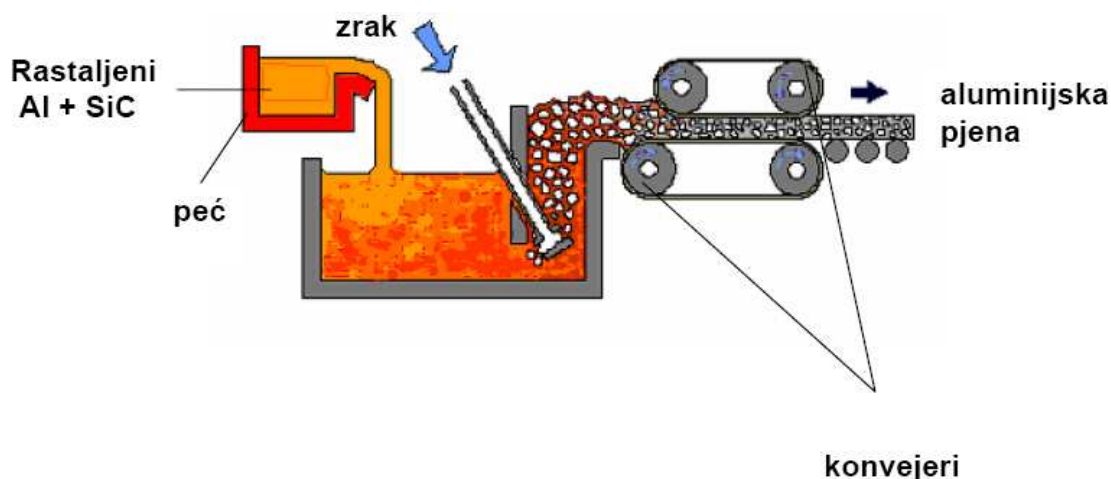
- ubrizgavanje plina u taljevinu legura Al-SiC i Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Al, Mg]
- u aluminijsku taljevinu dodaje se agens (TiH<sub>2</sub>) koji se raspada i tvori mjehuriće pri određenom tlaku i temperaturi [Al]
- mješavina metalnog praha i agensa (TiH<sub>2</sub>) zagrijava se pri čemu se oslobađaju mjehurići u taljevini i stvara se pjena (Al, Zn, Fe, Pb, Au)
- ubrizgavanje pod tlakom metalne taljevine u kalup od polimerne pjene ili voska koji je premazan keramičkim prahom (Al, Mg, Ni-Cr, Cu, nehrđajući čelik)
- kemijsko taloženje metala iz parne faze na kalup od polimerne pjene koji se kasnije uklanja izgaranjem (Ni, Ti)
- vrućim izostatičkim prešanjem praha (HIP-Hot Isostatic Pressing) inertni plin pod visokim tlakom biva zarobljen u porama. Povišenjem temperature dolazi do ekspanzije plina (Ti)

- kuglaste šupljine koje nastaju procesom atomizacije ili taloženjem iz parne faze na polimerne kugle (Ni, Co, Ni-Cr legure)
- spajanje dvaju materijala u obliku praha od kojih je jedan topljiv. Topiva komponenta uklanja se otapalom i ostaje metalna porozna građa (Al+sol u obliku praha)
- otapanje plina (obično H<sub>2</sub>) u taljevini pod visokim tlakom. Porozni materijal nastaje eutektičkom reakcijom plina i metala (Cu, Ni, Al)

## 2.1. Ubrizgavanje plina u taljevinu

Metalna pjena ne može se proizvesti samo ubrizgavanjem plina u rastaljeni metal, zato što je sušenje metala oko ruba mjehurića prebrzo da bi pjena ostala stabilna do skrućivanja. Zbog toga se u taljevinu dodaju vrlo sitne, nerastvorljive čestice koje povećavaju viskoznost aluminijske taljevine, sprečavaju sušenje opne mjehurića i na taj način stabiliziraju pjenu. Kao čestice se najčešće koriste SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, MgO ili TiB<sub>2</sub> promjera 0,5 μm do 25 μm. Volumni udio im iznosi 10 - 20%. Prilikom unošenja tih čestica u aluminijsku taljevinu koriste se tehnike miješanja kako bi njihova raspodjela bila jednolika. Ovim postupkom uglavnom se upjenjuje aluminijska taljevina zbog njegove niske gustoće i dobre otpornosti na oksidaciju. Nakon toga se u taljevinu upuhuje plin pomoću posebno konstruiranih rotirajućih ubrizgavalica i vibrirajućih raspršivača. Tako nastaju fini jednoliki mjehurići raspršeni u taljevini. U ovom procesu može se koristiti više vrsta plinova. To su zrak, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, inertni plinovi (npr. argon), N<sub>2</sub>, pa čak i vodena para. Mješavina metala i mjehurića ispliva na površinu gdje se metal suši. Vrijeme skrućivanja ovisit će o toplinskom gradijentu. Tako stvorena pjena izlazi na površinu pomoću pomičnih traka (konvejskih remena). Na taj se način proizvode aluminijske pjene gustoće od 69 kg/m<sup>3</sup> do 540 kg/m<sup>3</sup> s porama promjera od 3-25 mm i debljinom stjenke 50-85 μm. Na veličinu ćelija može se utjecati protokom plina, brzinom ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača te ostalim parametrima.

Shema procesa proizvodnje metalne pjene prikazana je na slici 2.1

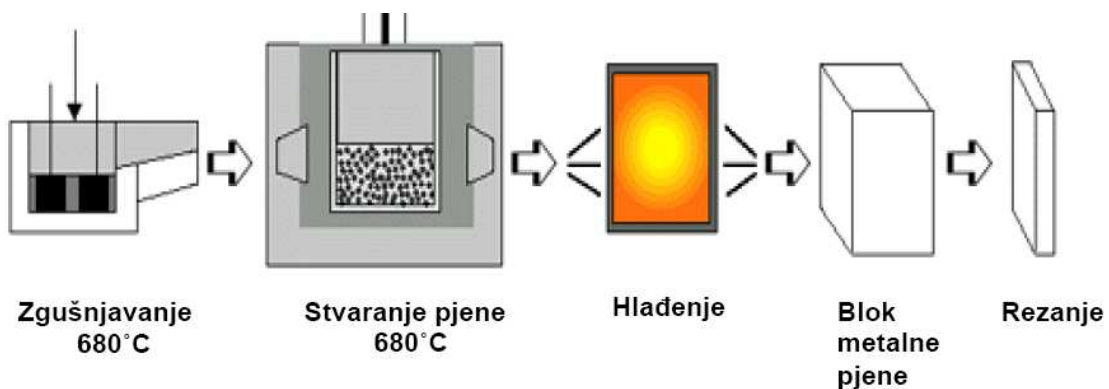


Slika 2.1. Proizvodnja aluminijske pjene ubrizgavanjem zraka u taljevinu postupkom "Alcan / NorskHydro / CYMAT" /7/

Ako je sadržaj čestica prevelik ili premalen mogu nastupiti određene poteškoće. Poteškoće se mogu pojaviti i zbog sila pomičnih traka tijekom vučenja na površinu. Čelije se dijagonalno deformiraju što negativno utječe na mehanička svojstva koja postaju izotropna. Upjenjeni materijal koristi se ili sa zatvorenom površinom ili se reže u odgovarajuće oblike. Prednost ovog procesa je u tome što je jeftiniji i što se mogu proizvoditi komadi većih dimenzija, a loša strana je u tome što se rezanjem otvaraju ćelije i što je još uvijek ograničen samo na aluminij. Na tržištu su na ovaj način izrađene pjene poznate pod nazivima Hydro-Alcan. Danas se razvijaju procesi proizvodnje pjena ovim postupkom bez dodataka. Viskoznost se drži na niskoj razini tako da je u procesu tijekom ubrizgavanja stalno prisutno hlađenje. Međutim, takvi sustavi su još uvijek vrlo nestabilni.

## 2.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini

U ovom procesu taljevini se dodaje agens za pospješivanje upjenjivanja. Pod utjecajem povišene temperature on se rastvara i tako tvori plin. U početnoj fazi procesa, pri temperaturi tališta aluminija u rasponu od 670-690 °C, taljevini se dodaje oko 1,5 % Ca. Nakon nekoliko minuta vođenja procesa viskoznost se znatno povećava zbog spojeva CaO,  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  ili intermetalnog spoja  $\text{Al}_4\text{Ca}$ . Kao raspršujući agens dodaje se otprilike 1-2 %  $\text{TiH}_2$  koji se iznad temperature 465 °C rastvara na Ti i plinoviti  $\text{H}_2$ .  $\text{H}_2$  stvara mjehuriće koji služe za stvaranje metalne pjene sa zatvorenim ćelijama ako je sušenje dovoljno sporo. Promjer dodanih čestica kreće se u rasponu 5-20  $\mu\text{m}$ . Poslije hlađenja ispod temperature tališta stvorena je aluminijska metalna pjena koja se može dalje obrađivati. Cijeli proces traje otprilike 15 minuta i odvija se pod konstantnim tlakom.



Slika 2.2. Proces nastajanja metalne ALPORAS pjene /8/

Slika 2.2. prikazuje proces nastajanja ALPORAS metalne pjene. Pažljivom kontrolom parametara procesa, kao što su tlak, vrijeme ili temperatura, može se ostvariti homogena građa metalne pjene. Na neka svojstva, kao što su relativna gustoća ili veličina ćelija, može se utjecati variranjem količine Ca ili  $\text{TiH}_2$ . Gustoća ovako



proizvedenih pjena može biti od  $180 \text{ kg/m}^3$  do  $240 \text{ kg/m}^3$ , relativna gustoća od 0,07 do 0,2, a veličina ćelija od 0,5 mm do 5 mm.

Ćelije kod ove vrste pjena zatvorene su, no valjanjem se njihove stjenke mogu razbiti čime im se povećavaju zvučno izolacijska svojstva. Zbog uporabe relativno skupog Ca i  $\text{TiH}_2$  ovaj je postupak ipak nešto skuplji od prethodnog. Na slici 2.3. prikazani su proizvodi izrađeni ovim postupkom.



Slika 2.3. Ploče izrezane iz većeg bloka metalne pjene nastalog postupkom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u taljevini /7/

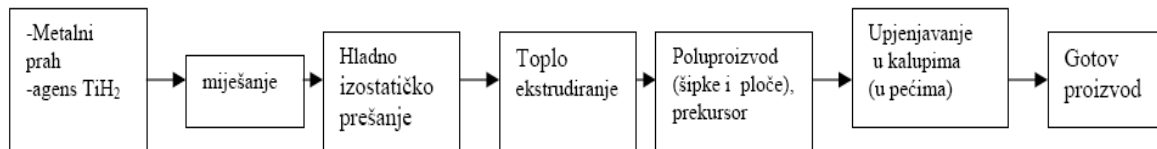
### 2.3. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi

Pjenasti metali mogu se također izrađivati od metalnog praha. Na samom početku procesa miješaju se prah čistog metala ili legure i dodatak koji pospješuje upjenjavanje, a to je najčešće  $\text{TiH}_2$ . Nastala mješavina zatim se sabija u poluproizvod u obliku šipke ili pločice. Tehnike sabijanja u metalnu matricu mogu biti razne: izostatičko tlačenje, ekstrudiranje, valjanje praha itd. Takav poluproizvod mora biti vrlo pažljivo napravljen zato što početna poroznost ili druge nepravilnosti uzrokuju loše rezultate u kasnijim fazama procesa. Poluproizvod se reže na male komade i stavlja u kalup gdje se zagrijava na temperaturu nešto višu od solidus temperature legure. Dodatak (agens) se raspada na Ti i plinoviti  $\text{H}_2$  koji uzrokuje širenje i stvaranje visoko poroznog materijala. Trajanje procesa ovisi o temperaturi i veličini poluproizvoda i kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Proizvod zadržava oblik kalupa, ima relativnu gustoću od 0,08 i više, te zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm.

Ovaj postupak nije ograničen samo na aluminij, već se njime mogu proizvoditi pjene na bazi cinka, mjedi, olova, zlata i drugih metala ovisno o početnim parametrima. Upjenjavanje se događa u polučvrstom stanju zato što se  $\text{TiH}_2$  raspada na  $465\text{ }^\circ\text{C}$  što je mnogo niže od tališta aluminija ( $660\text{ }^\circ\text{C}$ ). Sve to pospješuje upjenjavanje čvrstog aluminija koji se zatim zagrijava do taljenja, a hlađenjem se pjena stabilizira.

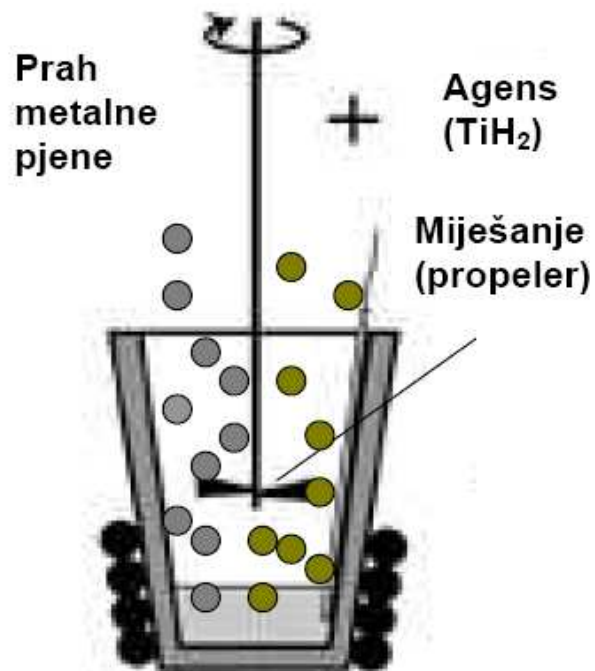
Fraunhoferov institut u Bremenu (Institut für Advanced Materials - IFAM) razvio je izradu sendvič-konstrukcija ovim postupkom. Takve konstrukcije sastavljene su od jezgre od upjenjenog metala zatvorene s dva metalna lima (ploče) koji su ljepilom povezani s pjenom.

Komercijalni naziv za ovako proizvedene metalne pjene je FOAMINAL-ALULIGHT. Na slikama koje slijede prikazan je postupak nastajanja takve pjene.



Slika 2.4. Pojednostavljeni prikaz postupka FOAMINAL-ALULIGHT /7/

a) Miješanje sastojaka



Slika 2.5. Miješanje sastojaka /7/

b) Hladno izostatičko prešanje u cilindrima



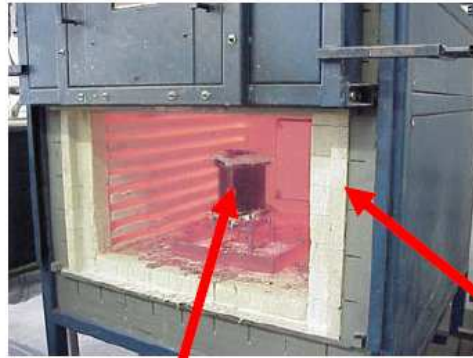
Slika 2.6. Stvaranje trupaca izostatičkim prešanjem (100 MPa) mješavine prahova /7/

c) Toplo ekstrudiranje



Slika 2.7. Stvaranje prekursora /7/

d) Priprema za pjenjenje i pjenjenje te dobivanje konačnog proizvoda

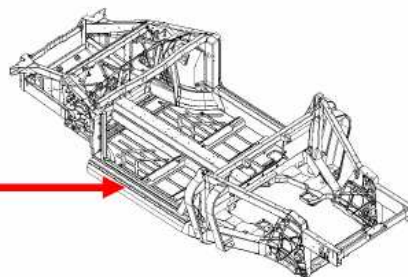
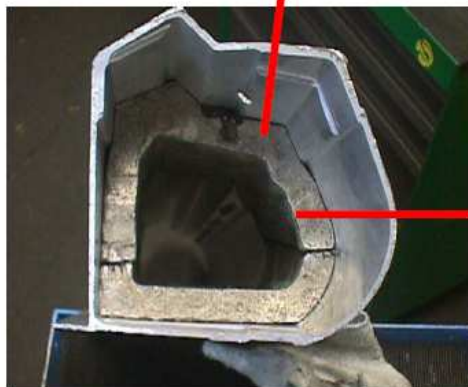


Kalup u kojem se nalazi ekstrudirani poluproizvod s agensom koji pospješuje stvaranje pjene

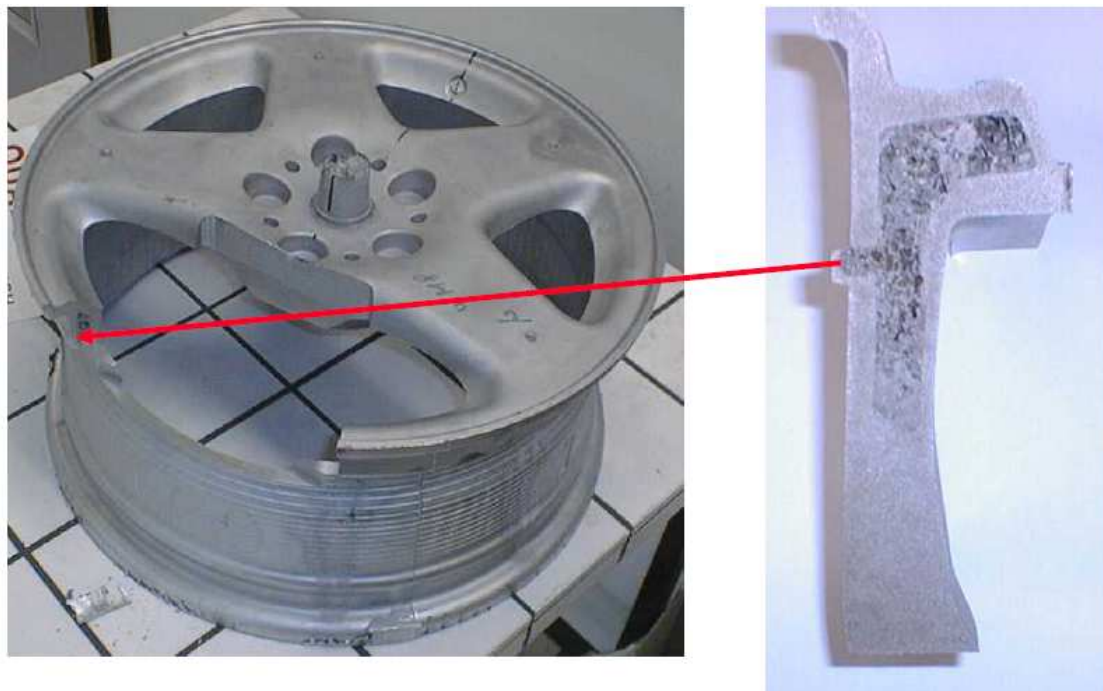
peć

Slika 2.8. Pjenjenje prekursora /7/

Nekoliko primjera primjene ALULIGHT metalnih pjena prikazano je na sljedećim slikama :



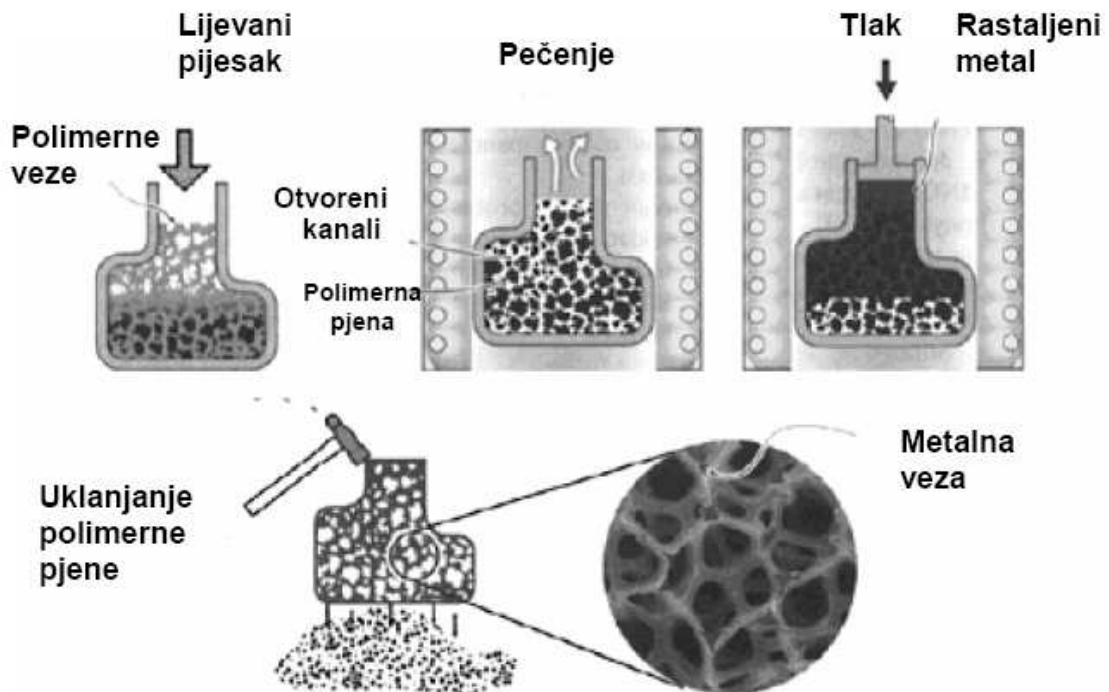
Slika 2.9. Kruti uložak na okviru osobnog automobila izrađen od metalne ALULIGHT pjene (povećava krutost i čvrstoću pokazanog dijela) /7/



Slika 2.10. Ispuna naplatka kotača izrađenog od metalne ALULIGHT pjene (ušteta oko 2 kg po kotaču) /7/

#### **2.4. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera**

Ovaj proces je razvila tvrtka Ergaerospace i njime su proizvedene sve tzv. "ERG DUOCEL" metalne pjene (slika 2.11.). Ti materijali imaju građu s otvorenim ćelijama u obliku duodekaedara. Gustoća im je od 3 do 50 % gustoće čvrstih metala dok im je gustoća ćelija 0,1968; 0,3937; 0,7874 ili 1,5748 šupljina po milimetru. Za izradu pjene najčešće se koriste aluminijske legure 6101 i A356 /9/.



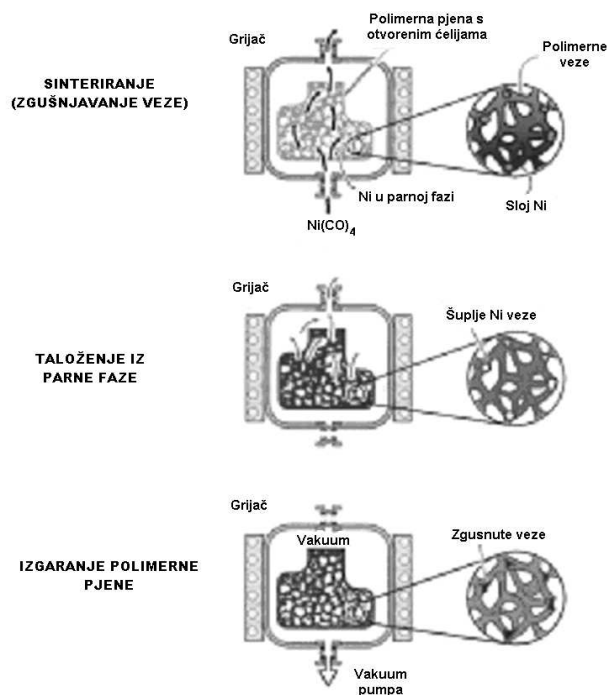
Slika 2.11. Proces nastajanja ERG DUOCEL metalne pjene /10/

Za izradu kalupa, u kojima se postupkom preciznog lijevanja proizvode metalne pjene, mogu se koristiti polimerne pjene s otvorenim ćelijama raznih veličina i oblika. Prvo se odabire polimerna pjena odgovarajuće veličine ćelija i relativne gustoće. Ona se zatim premazuje keramičkim prahom koji se zatim suši i ugrađuje u ljevački pijesak. Kalup se zatim peče da bi kalupni materijal očvrstnuo, a polimerna pjena isparila, te da bi se stvorio negativ oblika pjene. Sljedeći je korak punjenje kalupa rastaljenom legurom koja se zatim hladi. Opor tečenju nekih legura prevladava se primjenom tlaka za vrijeme ulijevanja u kalup. Nakon hlađenja i vađenja iz kalupa metalna pjena ima jednaku građu kao i korištena polimerna pjena.

Veličine šupljina metalnih pjena s otvorenim ćelijama iznose od 1 do 5 mm, dok im relativna gustoća iznosi više od 0,05. Ovim procesom mogu se izrađivati metalne pjene na bazi svih vrsta metala koji se mogu precizno ljevati.

## 2.5. Taloženje metala na ćelijaste praobljke

Polimerne pjene s otvorenim ćelijama također mogu poslužiti kao baza na koju se postupkom kemijskog taloženja iz parne faze (Chemical Vapour Deposition – CVD) nanose metalni materijali evaporacijom ili elektrotaloženjem. U samom početku postupka polimerna pjena stavlja se u CVD retortu u koju se zatim uvodi  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  (slika 2.12.). Zagrijavanjem na temperaturu od oko  $100\text{ }^\circ\text{C}$   $\text{Ni}(\text{CO})_4$  se raspada na čisti nikal i ugljični monoksid CO. Nikal se u parnoj fazi taloži na polimerni materijal unutar retorte. Nakon što je nanoseno nekoliko desetaka mikrometara metalne prevlake, polimerne pjene se uklanjaju i spaljuju infracrvenim zagrijavanjem.



Slika 2.12. Proces nastajanja Ni metalne pjene (tzv. INCO pjena) /10/



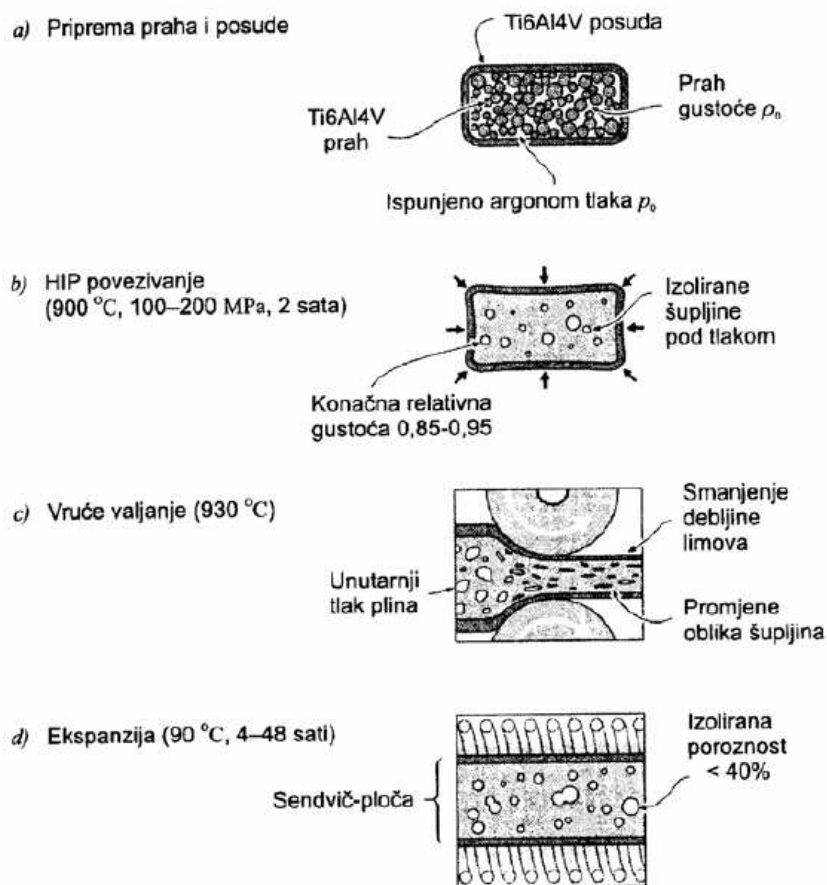
Građa ovako proizvedenih metalnih pjena je ćelijasta sa šupljikavim vezama. Gustoća takvih veza može se povećati sinteriranjem. Ovaj je postupak razvila tvrtka INCO iz Kanade. Pjena ima otvorene ćelije sa šupljinama veličine od 100 do 300 nm. Također se ovim procesom proizvode metalne pjene s najmanjom relativnom gustoćom od 0,02 do 0,05. Ovaj proizvodni postupak vrlo je skup zato što je  $\text{Ni(CO)}_4$  vrlo otrovan i za vrijeme njegove uporabe nužne su temeljite analize štetnih emisija u okoliš. Ova pjena se rijetko koristi zato što je njeno uvođenje u procesnu industriju vrlo skupo i regulirano oštrim zakonima. Još jedna loša strana ovog postupka je u tome što se moraju koristiti čisti metali, titan ili nikal, zbog nemogućnosti nanošenja legura CVD postupkom.

## 2.6. Ekspanzija plina u taljevini

Za proizvodnju materijala koji u svojoj građi imaju malene šupljine ispunjene inertnim plinom visokog tlaka koriste se postupci metalurgije praha. Najčešće korišteni inertni plin je argon koji ima vrlo nisku topljivost u metalima. Do puzanja materijala i širenja šupljina dolazi zbog visokog tlaka uzrokovanog povišenom temperaturom. To pokazuje kako se promjenom tlaka i temperature može utjecati na građu, a time i na svojstva metalnih pjena. U prvom koraku procesa prah legure  $\text{Ti6Al4V}$  stavlja se u posudu napravljenu od istog materijala (slika 2.13). Iz posude je izvučen sav kisik jer bi on inače na sebe vezao titan, te je potom napunjena argonom pod tlakom od 0,3 MPa do 0,5 MPa. Sadržaj posude potom se zgušnjava na relativnu gustoću 0,9 do 0,98 postupkom vrućeg izostatičkog prešanja (HIP), što također uzrokuje porast tlaka u šupljinama. No to još nije dovoljno da bi se izazvala ekspanzija  $\text{Ti6Al4V}$ . U posudi se u tom trenutku nalazi relativno mali broj ćelija koji je približno jednak broju zrna praha legure koja je na početku unesena u posudu. Sljedeći korak je valjanje tako pripremljene titanove legure pri temperaturi od približno 900-940 °C. Zbog tlaka valjanja šupljine u leguri postaju spljoštene i izdužene u smjeru valjanja.

Sve to rezultira profinjenijom strukturom koja sadrži mnogo jednoličniju raspodjelu šupljina i stvaranjem veza između plinom ispunjenih šupljina. Do širenja plina dolazi u posljednjoj fazi procesa pri temperaturi od 900 °C uz trajanje i do 48 sati. Zbog visoke temperature tlak u ćelijama raste (10 do 16 MPa) pa se one šire, što dovodi do smanjenja gustoće.

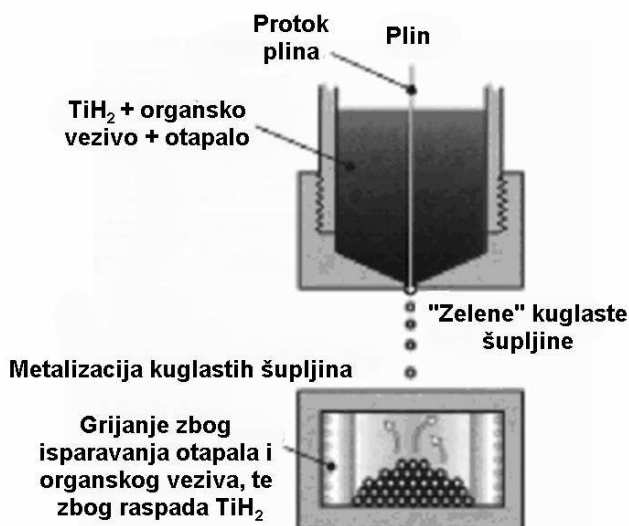
Ovim postupkom uglavnom se izrađuju sendvič-konstrukcije na bazi Ti-legura koje imaju poroznost jezgre do 50 % i veličinu ćelija od 10 do 300  $\mu\text{m}$ . To je prva iskoristila tvrtka Boeing za izradu sendvič-ploča s jezgrom niske gustoće. Ovaj postupak također je nešto skuplji zbog procesa vrućeg valjanja Ti legura.



Slika 2.13. Proces nastajanja metalne pjene procesom širenja inertnog plina /10/

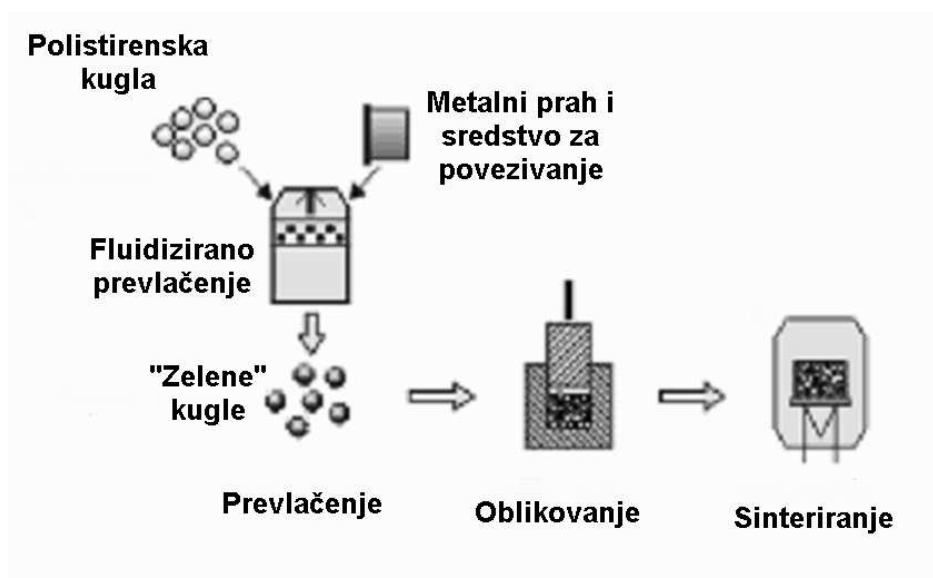
## 2.7. Građe s kuglastim šupljinama

U zadnje vrijeme razvija se čitav niz procesa za proizvodnju metalnih ćelijastih materijala s kuglastim oblikom šupljina. Smatra se kako atomizacija inertnog plina s malim udjelom (1 do 5 %) uzrokuje stvaranje legura s prethodno opisanom građom. Šupljine imaju relativno velik promjer, od 0,3 do 1 mm, te relativnu gustoću 0,1. Šupljine se prvo raspoređuju u materijalu raznim specijalnim postupcima, a zatim se zgušnjuju vrućim izostatičkim prešanjem, postupkom sinteriranja u vakuumu ili postupkom sinteriranja s tekućom fazom. Zadnji navedeni postupak smatra se najprikladnijim za neke legure jer se pri njemu izbjegavaju tlačne deformacije kuglastih čestica praha s tankim stjenkama, koje bi nastale vrućim izostatičkim prešanjem. Također nije potrebna naknadna visokotemperaturna obrada potrebna za učvršćivanje veza između čestica koja je nužna kod sinteriranja u vakuumu. Ovim postupkom danas se proizvode metalne pjene od Ni superlegura i legure Ti6Al4V s relativnom gustoćom 0,06. Drugi postupak razvijen je na sveučilištu Georgia Tech. u SAD-u (slika 2.14).



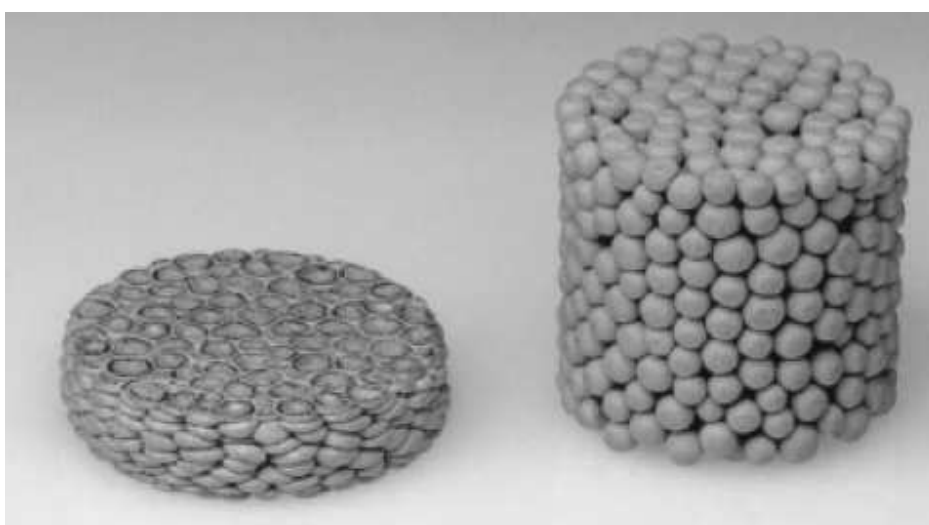
Slika 2.14. Proces nastajanja metalne pjene razvijen na Georgia Techu /6/

Kuglasta građa tvori se pomoću dodataka kao što su  $TiH_2$  pomiješana s organskim dodacima koji pospješuju povezivanje i s otapalom. Kugle se očvršćuju letom kroz visoki toranj. Povišena temperatura pospješuje uklanjanje otapala i hlapljenje sredstva za bolje povezivanje. Ovim postupkom može se proizvesti niz vrsta metalnih pjena, tako da se od  $Fe_2O_3$  i od  $Cr_2O_3$  može napraviti metalna pjena od nehrđajućeg čelika. Treći postupak razvio je Fraunhoferov institut u Bremenu (IFAM) – slika 2.15. Kugle od polistirena prevučene su metalom i sinterirane kako bi se dobila metalna građa s kuglastim šupljinama visokog stupnja jednoličnosti. Sinteriranje i spajanje stijenki kugala se obavlja u jednom koraku što znatno smanjuje troškove proizvodnje. Kasnije spajanje šupljina dovodi do građe s otvorenim i zatvorenim ćelijama što se, kao i relativna gustoća, može mijenjati kombinacijom različitih parametara proizvodnje. Iznosi relativnih gustoća kreću se od 0,05 naviše, a veličina šupljina od 100  $\mu m$  do nekoliko milimetara.



Slika 2.15. Proces nastajanja metalne pjene s kuglastim šupljinama IFAM postupkom

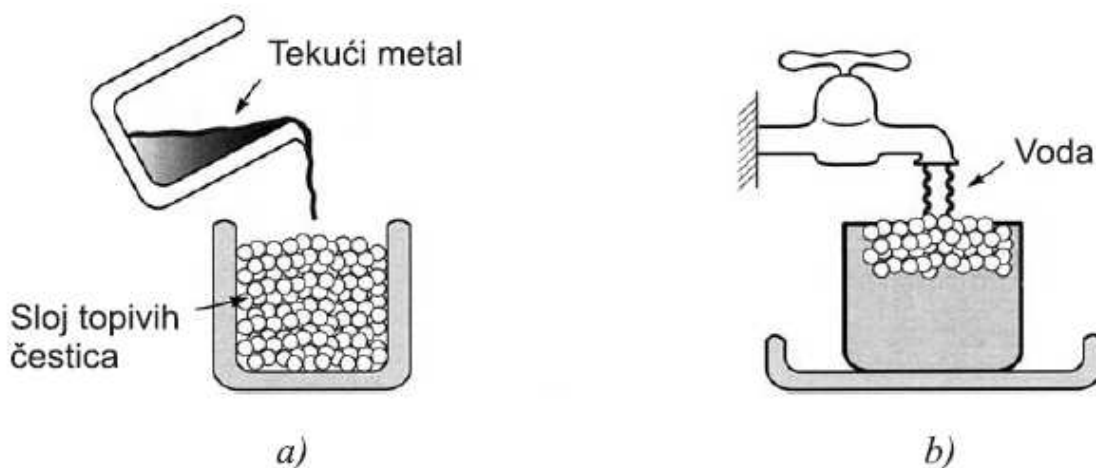
IFAM nastoji proizvesti pjenu i od nehrđajućeg čelika X2CrNiMo18-10 (AISI - 316L) velike gustoće. Proizvedena je pjena od te vrste čelika poroznosti 80 do 97% te su i ispitana neka njezina mehanička svojstva. Slika 2.16. prikazuje oblik takve pjene.



Slika 2.16. Metalna pjena s kuglastim šupljinama od nehrđajućeg čelika (AISI-316L) /8/

## 2.8. Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv

Dva praha, od kojih niti jedan nije u manjem volumnom udjelu od 25 %, miješaju se i kompaktiraju tvoreći dvostruko povezanu strukturu od obje faze. Nakon konsolidacije (povezivanja) jedan se prah (npr. sol) topi (rastvara) u odgovarajućem otapalu (slika 2.17.). Pjene bazirane na mješavini prahova aluminijskih legura s natrijevim kloridom uspješno su primijenjene za velike presjeke s jednoličnom građom. Kao otapalo najčešće se koristi voda. Građa ćelija im je vrlo jednolika.



Slika 2.17. Nastajanje metalne pjene povezivanjem dvaju materijala od kojih je jedan topljiv /10/

a) rastaljeni metal (npr. aluminij i njegove legure) infiltrira se u sloj topljivih čestica

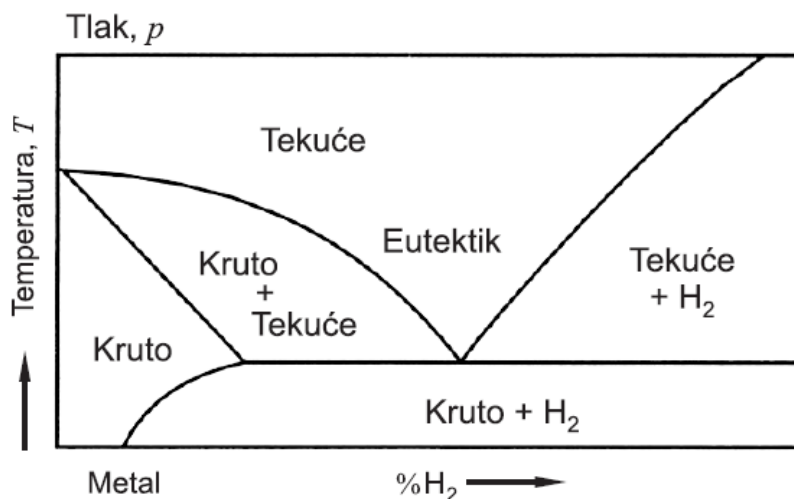
b) čestice se otapaju u prikladnom otapalu (npr. voda) čime nastaju otvorene ćelije

Oblik ćelija razlikuje se od onog proizvedenog drugim procesima i one su najčešće otvorene. Veličina ćelija ovisi o promjeru čestica praha i kreće se u širokom rasponu od 10  $\mu\text{m}$  do 10 mm. Relativna gustoća iznosi od 0,3 do 0,5.

Postoji i alternativa ovom procesu gdje se u nakupinu čestica od topljivog materijala infiltrira metalna taljevina pod tlakom, te se nakon toga hladi. Čestice se otapaju i ostaje metalna pjena vrlo uravnotežene građe ćelija.

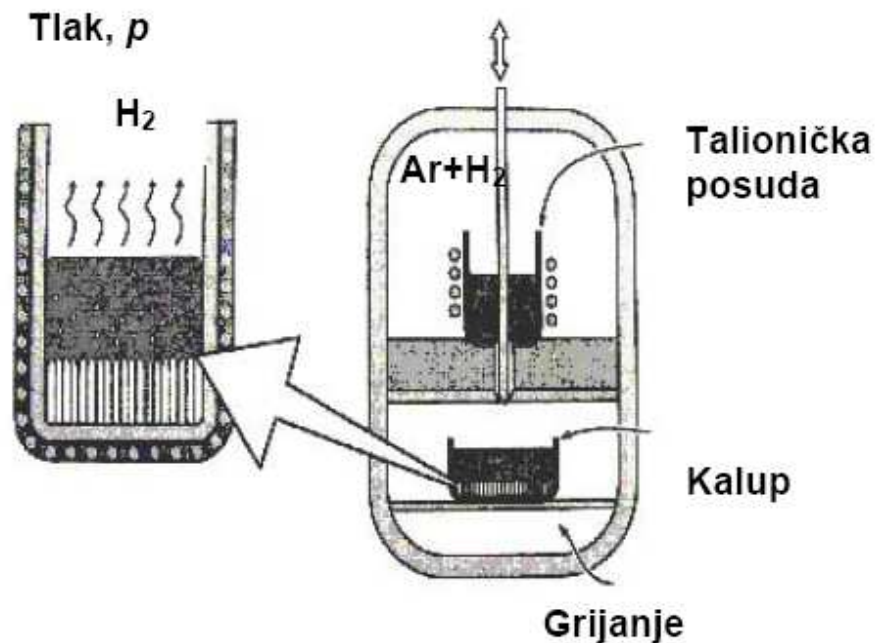
## 2.9. Eutektičko skrućivanje plin-metal

Ovaj postupak zasniva se na činjenici da neki metali i njihove legure tvore s vodikom eutektički sustav (slika 2.18.). U te metale ubrajaju se Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn i Ni te njihove legure. Legure se otapaju u vodikovoj atmosferi pod visokim tlakom, skrućuju se direktno brzim sniženjem tlaka. Rezultat je homogena taljevina ispunjena vodikom. Porozni materijal nastaje eutektičkom reakcijom plina i metala. Ako se temperatura snizi, taljevina će naposljetku doživjeti eutektičku pretvorbu u heterogeni dvofazni sustav plin + metal. Na određenoj temperaturi događaju se reakcije segregacije i plinske šupljine ostaju zatvorene u metalu.



Slika 2.18. Binarni dijagram stanja metal – vodik /12/

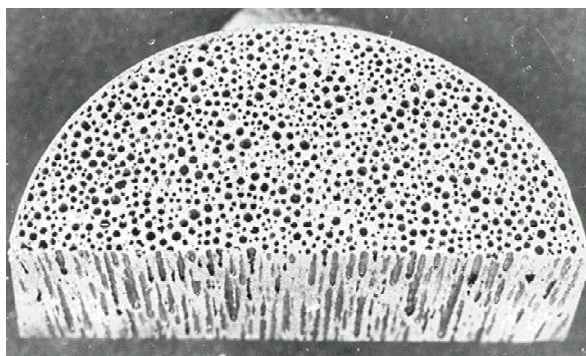
Legura se zagrijava u posudi pod određenim tlakom vodika i na taj se način tali (slika 2.19.). Tlak vodika uobičajeno iznosi od 0,5 do 1 MPa, no on može iznositi i do 5 MPa. Taljevina se zatim ulijeva u kalup gdje se događa eutektičko skrućivanje. Materijali nastali ovim postupkom u literaturi se nazivaju "GASAR" ili "GASERIT". To je jedna od prvih proizvedenih metalnih pjena sa visokom poroznošću, no takve pjene se još komercijalno ne primjenjuju.



Slika 2.19. Proces nastajanja metalne pjene eutektičkim plin – metal skrućivanjem /12/



Volumni udio šupljina u tako proizvedenoj metalnoj pjeni je i do 30 %. Na volumni udio i orijentaciju ćelija utječu kemijski sastav legure, tlak taljenja, zagrijavanje taljevine (što utječe i na topljivost vodika u leguri), temperaturno polje u taljevini tijekom skrućivanja i brzina skrućivanja. Tako velik broj parametara pokazuje kako je kontrola i optimalizacija strukture ćelija vrlo komplicirana. Ćelije su izdužene i orijentirane su u smjeru skrućivanja, mogu biti i koničnog oblika (slika 2.20.). Promjeri ćelija iznose od  $10 \mu\text{m}$  do  $10 \text{mm}$ , duljine su od  $100 \mu\text{m}$  do  $300 \text{mm}$ .



Slika 2.20. Izgled metalne pjene proizvedene eutektičkim plin – metal skrućivanjem  
/13/

### 3. SVOJSTVA METALNIH PJENA

Podaci o raznim svojstvima nužni su pri odabiru materijala za neki proizvod. Na svojstva materijala utječu: građa (struktura), kemijski sastav te način izrade i obrade. Vrlo su bitne dimenzije i način pripreme uzorka za ispitivanje.

Postupci ispitivanja metalnih pjena još se razvijaju i predstavljaju, zbog svoje kompleksnosti, pravi izazov za inženjere koji ih provode. Zbog svoje vrlo nepredvidive građe rezultati pri istom načinu ispitivanja često variraju i za nekoliko desetaka postotaka što smanjuje povjerenje u metalne pjene u primjeni. Da bi rezultati bili što vjerodostojniji, ispitivanja se provode po strožim režimima nego je to inače uobičajeno.

#### 3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena

Svojstva pjena određena su svojstvima osnovnog materijala i relativnom gustoćom  $\rho/\rho_s$ , gdje je  $\rho$  gustoća pjene a  $\rho_s$  gustoća materijala od kojeg je pjena napravljena. Vrijednosti relativne gustoće kreću se od 0,005 (rijetke pjene) do 0,5 (guste pjene) /6/.

Kod ispitivanja bilo kojeg svojstva nužno je odmah jasno naglasiti razliku između svojstava metalnih pjena i metala od kojih su one dobivene. Jedna je od najvećih prednosti metalnih pjena u primjeni njihova vrlo mala masa. To omogućuje izradu izrazito lakih konstrukcija kojima se danas teži zato što se njima ostvaruju uštede u masi i druge prednosti (npr. u autoindustriji manja potrošnja goriva). Takve konstrukcije u eksploataciji su često izložene statičkim ili dinamičkim mehaničkim opterećenjima koja mogu uzrokovati havarije. Zbog toga je nužno što točnije odrediti mehanička

svojstva metalnih pjena, kao što su: **tlačna i vlačna čvrstoća, modul elastičnosti i modul smičnosti, dinamička izdržljivost, tvrdoća, otpornost na umor ili puzanje, apsorpcija energije udara i propagacija udarnog vala.** Veliku ulogu igra i stupanj nepravilnosti i nehomogenosti građe pjene. Čelije su često nepravilnog oblika, različite veličine, zidovi ćelija često su potrgani što znatno umanjuje mehanička svojstva, poroznost varira po nekoliko desetaka postotaka itd. Izbor i dobra priprema uzoraka bitni su za utvrđivanje reprezentativnih podataka.

U tablici 1. navedene su vrijednosti mehaničkih svojstava metalnih pjena nekoliko najpoznatijih svjetskih proizvođača.

**Tablica 1.** Mehanička svojstva metalnih pjena /12/

SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća, $\rho/\rho_s$	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Građa	Zatvorene ćelije			Otvorene ćelije	
Gustoća, $\rho$ , Mg/m <sup>3</sup>	0,07-0,56	0,3-1,0	0,2-0,25	0,16-0,25	0,26-0,37
Modul elastičnosti, $E$ , GPa	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti, $G$ , GPa	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti, $E_t$ , GPa	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor, $\nu$	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Tlačna čvrstoća, $R_{mt}$ , MPa	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Granica razvlačenja, $R_e$ , MPa	0,04-7,0	2,0-20	1,6-1,8	0,9-2,7	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Dinamička izdržljivost, $R_d$ , MPa	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zgušnjavanju, $\epsilon_D$	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost, $\epsilon_f$	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka, $\eta^C$ , %	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, $K_{IC}$ , MPa·m <sup>1/2</sup>	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0

**Tablica 2.** Izrazi za izračunavanje svojstava metalnih pjena /12/

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 zgušćivanju, $\varepsilon_D$	$\varepsilon_D = (0,9-1) \cdot (1-1,4\rho/\rho_s + 0,4(\rho/\rho_s)^3)$	
Koeficijent gubitka, $\eta$	$\eta \approx (0,95-1,05) \cdot \eta_s / (\rho/\rho_s)$	
Tvrdoća, $H$	$H = R_{mt} \cdot (1+2\rho/\rho_s)$	
Toplinska vodljivost, (W/mK), $\lambda$	$(\rho/\rho_s)^{1,8} < \lambda/\lambda_s < (\rho/\rho_s)^{1,65}$	
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

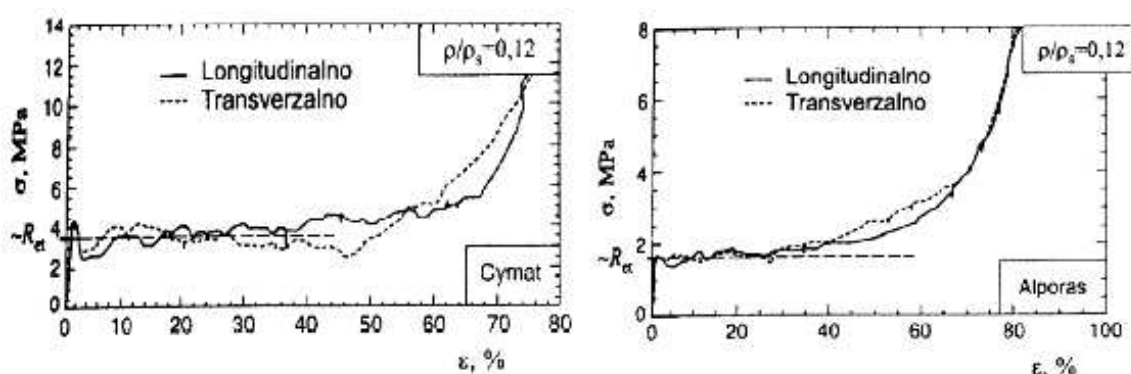
Metalne pjene imaju širok raspon svojstava tako da im je i veliko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja. Kada se usporede pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama, vidljivo je da su im mehanička svojstva uglavnom na jednakoj razini, no otvorene imaju ipak nešto niže vrijednosti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

U ovom radu dodatno su objašnjena mehanička svojstva :

- tlačna čvrstoća
- apsorpcija energije udara
- propagacija udarnog vala

### 3.1.1. Tlačna čvrstoća

Slika 3.1. prikazuje dijagrame “naprezanje-skraćenje” pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje realnih Al pjena ( s otvorenim ćelijama).



Slika 3.1. Dijagrami “naprezanje-skraćenje” metalnih pjena pri tlačnom opterećenju /12/

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

Pjene s otvorenim ćelijama imaju vrlo dobro definiranu granicu stlačivanja –  $R_{\alpha}$  (*engl. plateau stress*) vidljivo na slici 3.1.. Pri tom naprezanju ćelije počinju teći uslijed savijanja. Zatvorene ćelije pokazuju mnogo složenije ponašanje. Naprezanje veličine granice stlačivanja izaziva zgušnjavanje pjene sve do konačne deformacije zgušnjavanja ( $\epsilon_D$ ).

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

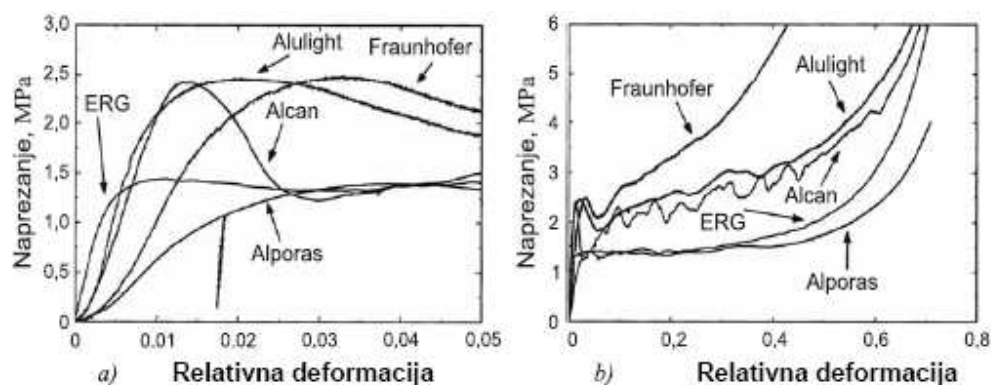
$$R_{ve} = (0,25 - 0,35) \cdot R_v \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m$$

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

gdje je :  $R_v$  – granica tečenja materijala pjene;  $m$  – eksponent koji za metalne pjene iznosi od 1,5 do 2;  $\alpha_1$  – koeficijent koji iznosi od 1,4 do 2.

Većina ispitivanja provodi se na aluminijskim ili niklenim pjenama budući da su one uglavnom prisutne u primjeni. Od aluminijskih pjena proučavaju se sljedeće vrste : CYMAT, ALPORAS, ERG Duocel, ALULIGHT i IFAM. Gustoća pojedinog uzorka određuje se vaganjem uzorka i mjerenjem njegovih dimenzija.

Iz dijagrama na slici 3.2. može se zaključiti kolike su deformacije uzoraka pri najvećim opterećenjima za svaki tip aluminijskih metalnih pjena.

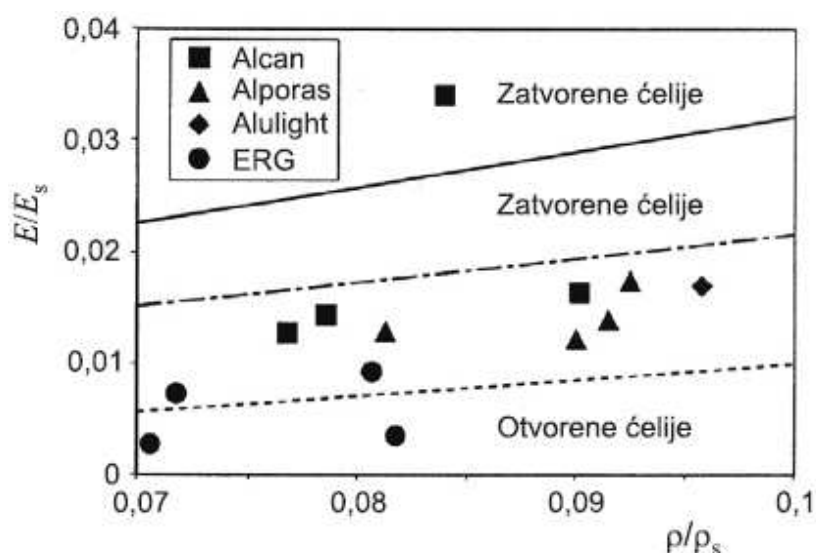


Slika 3.2. Krivulje “naprežanje-deformacija” pod tlačnim opterećenjem aluminijskih pjena :

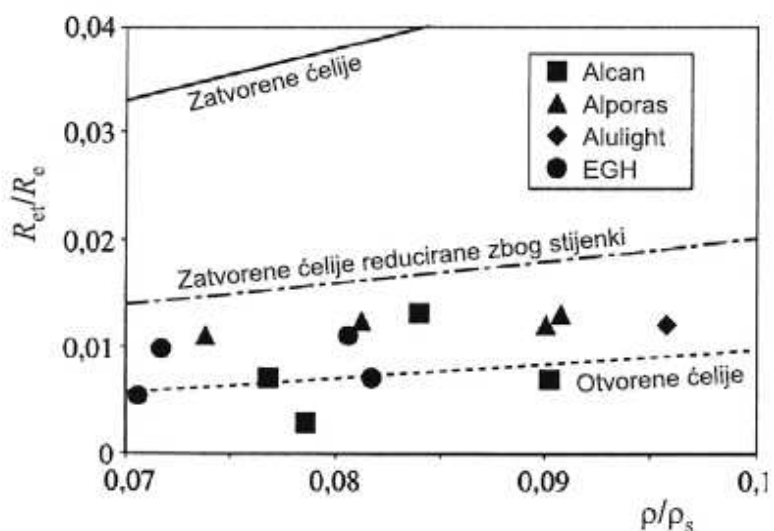
a) do deformacije od 5 %

b) pri većim deformacijama /14/

Kod ove vrste ispitivanja često se daju i grafikoni ovisnosti relativne gustoće o modulu elastičnosti ili o omjeru granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja ( $R_e$ ) materijala, kao što je i prikazano na slikama 3.3. i 3.4..



Slika 3.3. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći /14/



Slika 3.4. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja materijala ćelija ( $R_e$ ) o relativnoj gustoći /14/

### 3.1.2. Apsorpcija energije udara

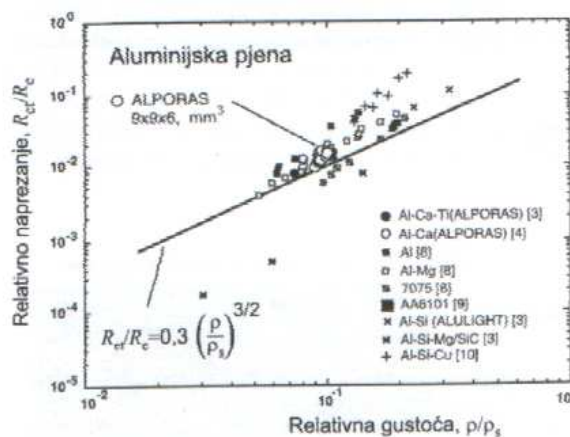
Kao što je već prije navedeno mogućnost apsorpcije energije udara jedno je od najvažnijih uporabnih svojstava metalnih pjena. Posebno je izražen interes u transportnoj industriji jer mnogi dijelovi vozila mogu biti izloženi udarnim opterećenjima. Ovo svojstvo zanimljivo je i kod pakirne ambalaže koja je prilikom transporta također izložena udarnim opterećenjima.

Gibson i Ashby pretpostavili su, na osnovi odnosa relativnih naprezanja tečenja i relativne gustoće, da do plastičnog kolapsa ćelija dolazi kada moment izazvan tlačnim opterećenjem prekorači moment plastičnosti čvorova ćelija. Prema [15] odnos između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće iznosi:

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

gdje je :  $R_{et}$  – granica stlačivanja pjene,  $R_e$  – granica tečenja materijala ćelija,  $\rho$  – gustoća pjene,  $\rho_s$  – gustoća materijala stijenki ćelija i  $C$  – konstanta

Slika 3.5. prikazuje empirijsku vezu između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće za različite vrste komercijalnih pjena, prema kojoj konstanta  $C$  iznosi 0,3 kao i kod poliuretanskih pjena.



Slika 3.5. Omjer između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće [16]



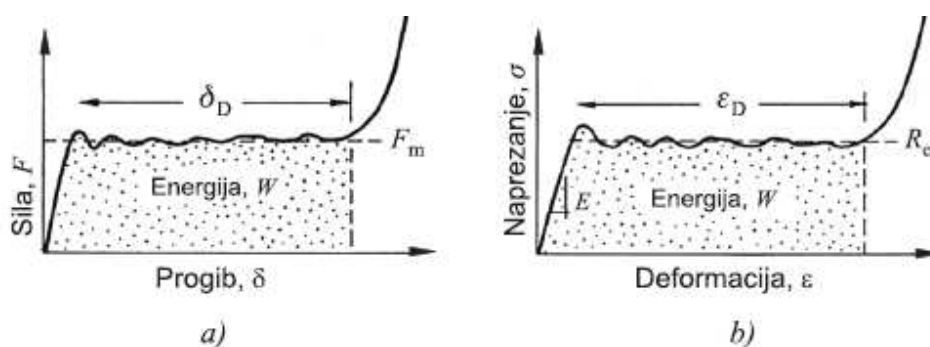
Apsorpcija energije udara po jedinici volumena ( $W$ ) može se prikazati sljedećom relacijom:

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

gdje je :  $\sigma$  – naprezanje;  $\varepsilon$  – deformacija

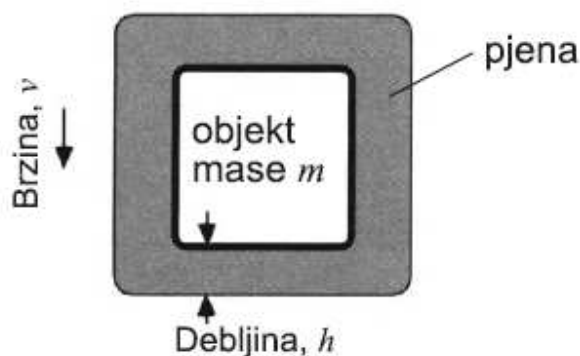
Prosječne vrijednosti apsorpcije energije udara po jedinici volumena za ALPORAS pjenu pri deformaciji od 55 % za statičko i dinamičko opterećenje iznose  $1,0 \text{ MJ/m}^3$  i  $1,51 \text{ MJ/m}^3$ . Iz toga je vidljivo kako je apsorpcija za 50 % veća pri dinamičkom opterećenju.

Kao što je već spomenuto, apsorpcija energije udara vrlo je važna kod izbora materijala za izradu pakirne ambalaže koja može biti izložena udarnim opterećenjima (slika 3.6). Tu je bitno da granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) bude tek nešto manja od naprezanja pri kojem dolazi do loma materijala, odnosno do dostizanja kritične deformacije zgušnjavanja ( $\varepsilon_D$ ). Površina ispod krivulje  $R_{et} - \varepsilon_D$  pokazuje kolika se količina energije udara može apsorbirati (slika 3.6).



Slika 3.6. Krivulje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju (a) i tlaku (b) /12/

Slika 3.7. prikazuje primjer padajućeg (udarno opterećenog) paketa obloženog pjenom.



Slika 3.7. Objekt obložen metalnom pjenom /6/

Objekt mase  $m$ , obložen pjenom debljine  $h$  može podnijeti kritično usporenje  $a^*$  (negativnu akceleraciju), pri čemu maksimalna dopuštena sila iznosi:

$$F = m \cdot a^*$$

Ako kontaktna površina između pjene i pakiranog objekta iznosi  $A$ , tada će do uništenja pjene doći pri sili:

$$F = \sigma \cdot A$$

gdje je :  $\sigma$  – naprezanje stlačivanja

Iz toga se može izračunati potrebna granica stlačivanja pjene :

$$R_{et} \leq \frac{m \cdot a^*}{A}$$

Apsorpcija po jedinici volumena  $W$  izračunava se na sljedeći način :

$$W = R_{et} \cdot \varepsilon_D$$

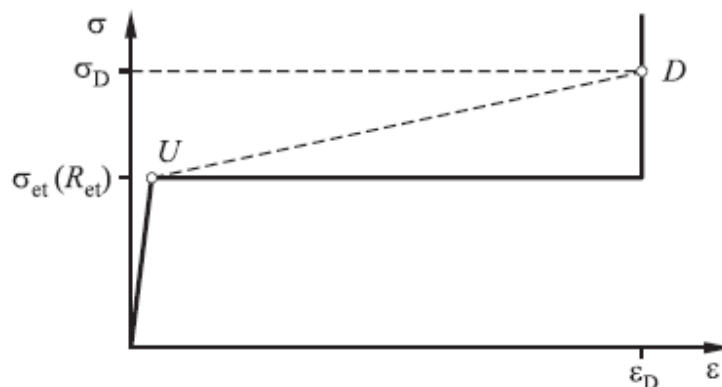
Na kraju je nužno odrediti i debljinu paketa pjene koja je potrebna za apsorpciju ukupne kinetičke energije ( $mv^2/a^*$ ).

$$h = \frac{1}{2} \cdot \frac{mv^2}{E_{et} \cdot \varepsilon_D \cdot A}$$

Kod tlačno opterećenih cijevi, ispunjenih metalnom pjenom i zatvorenih na jednom kraju, dolazi do savijanja ćelija koje stvaraju nakupine u obliku prstena. Kada se cijela cijev deformira, te nakupine dolaze u međusobni kontakt. I za ovaj oblik materijala vrijede dijagrami apsorpcije energije udara prikazani na slici 3.6.

### 3.1.3. 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 3.8. Krivulja naprezanje – deformacija metalne pjene /12/

Krivulja na slici 3.8. prikazuje kako metalna pjena prije udara ima granicu stlačivanja pri deformaciji zgušnjavanja  $\epsilon_D$ . 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  $\sigma_{et}$  :

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

Plastični val širi se brzinom  $v_{pl}$  pri čemu naprezanje raste od  $\sigma_{et}$  do vrijednosti  $\sigma_D$  u točki D.

Skok naprezanja sa  $\sigma_{et}$  na  $\sigma_D$  iznosi:

$$(\sigma_D - \sigma_{et}) = \rho v_{pi} v_D$$

$$v_{pi} = \sqrt{\frac{(\sigma_D - \sigma_{et})}{\rho \cdot \varepsilon_D}} = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}}$$

$$E_t = \frac{(\sigma_D - \sigma_{et})}{\varepsilon_D}$$

gdje je :  $v_D$  – brzina u točki D, a  $E_t$  – tangencijalni modul (vidi spojnicu U – D na slici 3.8.

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

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

gdje su :  $\alpha$  i  $\beta$  – koeficijenti koji iznose 0,8 i 1,75 ;  $C_1$  – koeficijent koji se bira proizvoljno (npr. 0,3) ;  $R_e$  – granica tečenja materijala ćelija i  $\rho/\rho_s$  – relativna gustoća.

Ako se kao primjer uvrste sljedeće vrijednosti :  $\rho/\rho_s = 0,15$  ;  $C_1 = 0,3$  ;  $R_e = 200$  MPa i  $\rho_s = 2700$  kg/m<sup>3</sup>, dolazi se do brzine od 21,5 m/s. Za mnoge primjene zemaljskog transporta brzine udara mnogo su manje od te vrijednosti, pa se može konstatirati da kvazistatička čvrstoća zadovoljava u konceptualnoj fazi konstruiranja.

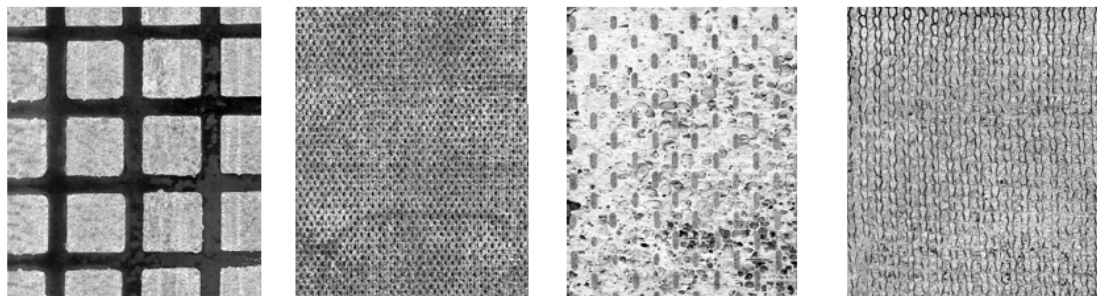
### 3.1.4. Ojačane metalne pjene

Tijekom proizvodnje formiraju se slučajne raspodjele šupljina različitih oblika, a neizbježno je i nastajanje guste površinske kore, koja značajno poboljšava savojnu krutost i izgled pjene. S druge strane, ta kora sadrži često nevidljive napukline i praznine koje mogu inicirati prijevremen lom pjene, naročito pri vlačnom opterećenju i kada su povoljni uvjeti za stvaranje napuklina u visokoporoznom materijalu. Upravo zbog toga danas se proizvode i metalne pjene s ojačanjima koja preuzimaju tu vrstu naprezanja.

Uloga ojačanja /17/ :

- sprečavaju urušavanje pjene
- povećavaju debljinu površinskog sloja
- značajno povećavaju lomnu i savojnu čvrstoću
- omogućuju odličnu apsorpciju energije
- kada je ograničen volumen pjene povećavaju savojnu krutost
- olakšavaju spajanje dijelova

Ojačanja se upotrebljavaju samo lokalno tako da ne uzrokuju značajna povećanja mase i troškova materijala. Uglavnom se koriste ojačanja čeličnim mrežicama (slika 3.9.). Ako materijal ojačanja ima viši modul elastičnosti i dovoljnu granicu tečenja, naprezanja se prenose s pjene na ojačavajući element i postojeća napuklina u ćeliji postaje neaktivna.



štancani lim

istegnuta mreža

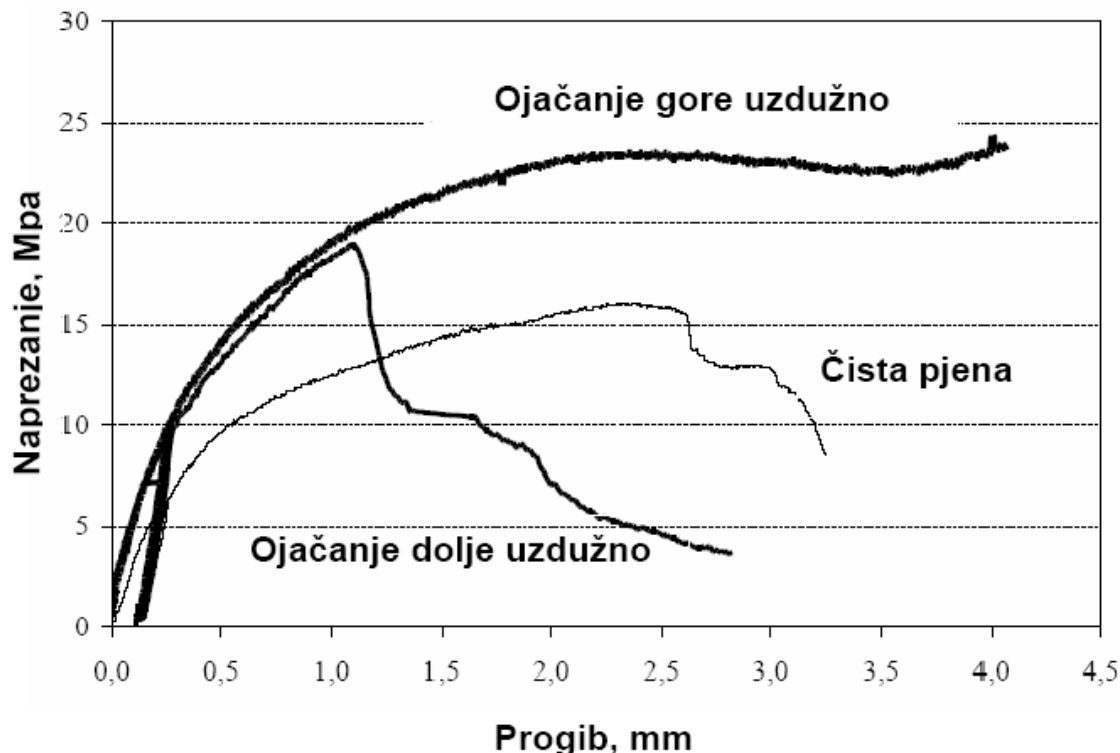
pletena mreža

mreža

Slika 3.9. Oblici mreža od nehrđajućeg čelika za ojačanje Al pjena /12/

Pjenu je moguće ojačati u onom smjeru gdje se očekuje najveće opterećenje i tako maksimalno optimirati svojstva u odnosu na masu. Također se ojačanja koriste za poboljšanje savojne krutosti sendviča kada je ograničena debljina limova.

Slika 3.10. prikazuje ponašanje AlSi12 sa i bez ojačanja prilikom ispitivanja na savijanje. Poroznost pjene približno je ista. Ojačanje je postavljeno na donju ili na gornju stranu ispitnog uzorka, pa se vidi da je savojna krutost gotovo dvostruko veća, dok je masa uzorka porasla za oko 30 %. Najučinkovitije je ojačanje koje je postavljeno na donju, vlačno opterećenu stranu uzorka. U tom slučaju ne dolazi do loma tijekom ispitivanja. Ako je ojačanje postavljeno na gornju, tlačno opterećenu stranu uzorka, dolazi do loma pri znatno nižem opterećenju, koje je usporedivo sa uzorkom bez ojačanja.



Slika 3.10. Utjecaj ojačanja na ponašanje pri savijanju grede od AlSi12 pjene poroznosti od 81 % /18/

Utjecaj položaja ojačanja na žilavost jasno je vidljiv na slici 3.11. koja pokazuje konačnu deformaciju nakon udarnog ispitivanja. Uzorak bez ojačanja nije uspio apsorbirati gotovo ništa udarne energije, dok su uzorci s ojačanjem svu udarnu energiju pretvorili u deformaciju. Mogućnost apsorpiranja dodatne količine energije može se vidjeti iz kuta pod kojim je uzorak ostao savinut. Ponovo se može uočiti da je najefikasnija upotreba ojačanja na vlačno opterećenoj površini.





Slika 3.11. Ojačane Al pjene nakon udarnog opterećenja /18/

### 3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena

Gotovo sva svojstva metalnih pjena dovode se u vezu s njihovom vrlo malom masom, pa tako i toplinska. Osim male mase nužno je postići i toplinsko-izolacijska svojstva kako bi pjene bile primjenjive u eksploatacijskim uvjetima gdje su prisutne povišene ili snižene temperature. I na ova svojstva dosta utječe građa pjena, naročito relativna gustoća. Postoje velike razlike u svojstvima pjena s otvorenim i zatvorenim ćelijama. Unapređenje procesa proizvodnje i njegova bolja kontroliranost omogućuje postizanje boljih toplinskih svojstava. Željelo se naglasiti kako su metalne pjene, i u ovom području primjene, konkurentne konvencionalnim materijalima.

U tablici 3. navedene su vrijednosti toplinskih svojstava komercijalno dostupnih pjena.

**Tablica 3.** Toplinska svojstva metalnih pjena /12/

SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA,	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO 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 ćelije			Otvorene ćelije	
Talište, $T_m$ , K	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Maks. radna temperatura, $T_{max}$ , K	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Min. radna temperatura, $T_{min}$ , K	1 - 2				
Specifični topl. kapacitet, $C_p$ , J/kgK	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Toplinska vodljivost, $l$ , W/mK,	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Toplinska rastezljivost, $\epsilon$ , $10^{-6}/K$ ,	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

**Talište** -  $T_m$  ćelijastih materijala praktički je jednako talištu materijala ćelija. Kod Al pjena talište je više od tališta aluminija 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** -  $\alpha$  ćelijastih materijala gotovo je jednak koeficijentu materijala stijenki ćelija. Kako je koeficijent toplinske vodljivosti za pjene ( $\lambda$ ) znatno niži, omjer koeficijenta toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti ( $\alpha/\lambda$ ) je visok. Budući da je taj omjer mjerilo za veličinu toplinskih deformacija, kod konstrukcija s ugrađenim pjenama treba svesti na minimum pojavu temperaturnih razlika.

S druge strane, **otpornost na toplinske šokove** -  $R_m/(E\alpha)$  nije tako jednoznačno objašnjivo svojstvo. 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 /6/.

### 3.3. Zvučna svojstva metalnih pjena

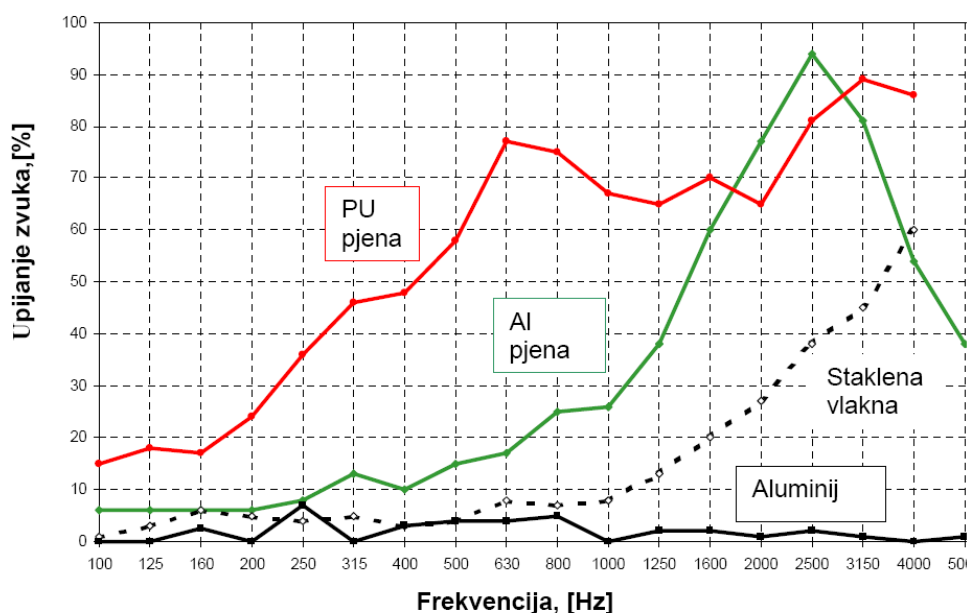
Dobra zvučna svojstva očituju se u činjenici da metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije. Metalna pjena mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije kako bi dobro apsorbirala zvuk.

Ispitivanja su provođena na Alporas pjeni sa zatvorenim ćelijama čije su stijenke različitim postupcima razbijane kako bi se omogućila cirkulacija zraka kroz njih. Apsorpcija zvuka može se poboljšati bušenjem rupa promjera 1 - 2 mm u metalnoj pjeni. Prema podacima proizvođača, prednosti Alporas pjena u odnosu prema konkurentnoj staklenoj vuni kada se radi o apsorpciji buke jesu /6/ :

- 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 3.12. pokazuje postotak upijanja zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i aluminija.



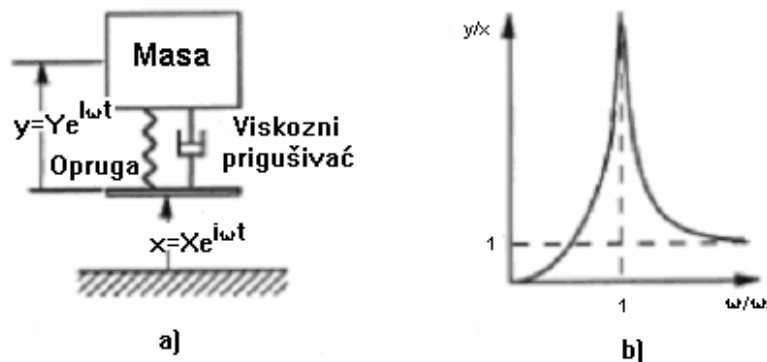
Slika 3.12. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al /17/

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.

### 3.4. Prigušenje vibracija metalnih pjena

Prigušenje je vrlo važno svojstvo dijelova konstrukcija koji su tijekom eksploatacije izloženi vibracijama (npr. dijelovi strojeva 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 3.13.).



Slika 3.13. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode; b) funkcija prigušenja/12/

Procesi prigušenja u materijalu najbolje su obilježeni bezdimenzijskim faktorom gubitka  $\eta$ . Čelijasti metali pokazuju za jedan red veličine više vrijednosti faktora gubitka od faktora gubitka materijala pune gustoće od kojih su napravljeni.

## 4. SPAJANJE METALNIH PJENA

Svojstva spoja moraju biti jednaka ili bolja od svojstava osnovnih materijala koji se spajaju. Treba spomenuti da porozna građa znatno otežava spajanje metalnih pjena, pa su nužne posebne tehnike spajanja. Ovdje će se kratko opisati tri načina spajanja :

- spajanje ljepilima
- stvaranje rastavljivih spojeva
- spajanje zavarivanjem

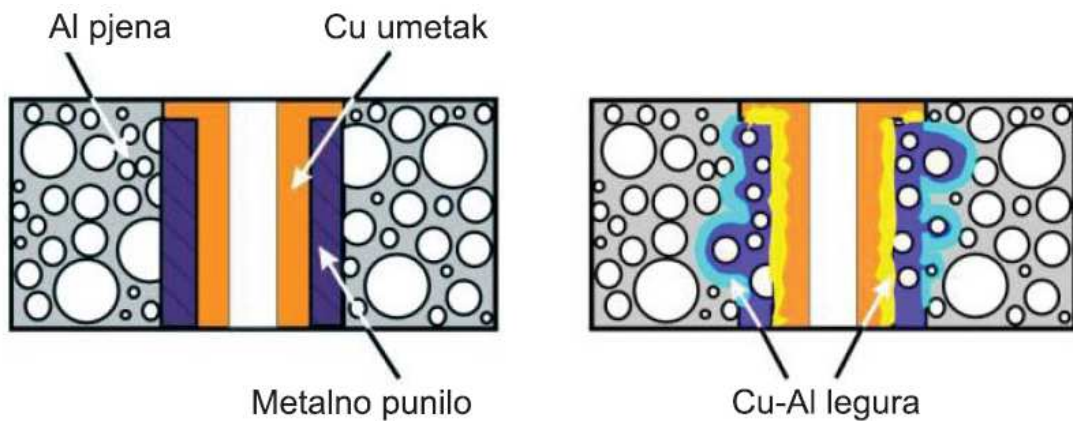
### 4.1. Spajanje ljepilima

Kao ljepila najčešće se rabe epoksidne smole koje se primjenjuju i prigodom spajanja neporoznih metala. Ljepila imaju jednaka ili bolja svojstva od osnovnog materijala. Određeni problemi koji se mogu javiti su: smanjenje toplinske stabilnosti i koeficijenta širenja topline, te povećanje toplinske ili električne izolacije. Ova metoda spajanja najčešće se upotrebljava kod stvaranja sendvič-konstrukcija s jezgrom od metalne pjene.

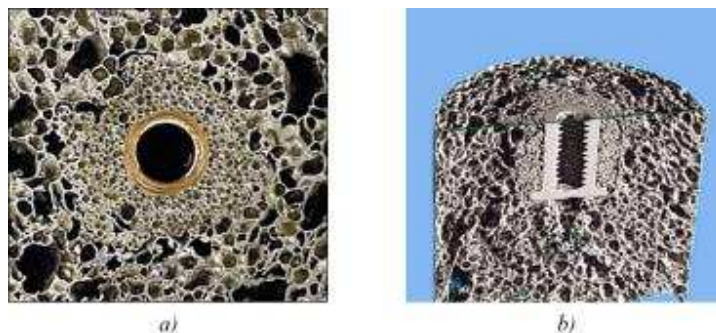
### 4.2. Rastavljivi spojevi

Rastavljivi spojevi metalnih pjena ostvaruju se pomoću drvenih vijaka ili pomoću metalnih umetaka u koje je urezan navoj. Ako se rabi umetak, koji je najčešće od bakra, nužno je postići dobro spajanje s metalnom pjenom. To se može postići uporabom ljepila, umetanjem spojnice tijekom proizvodnog procesa ili korištenjem

punila. Umetanje spojnice tijekom proizvodnog procesa ne osigurava željena svojstva spoja tako da se ono rijetko koristi. Kao punilo se koristi materijal koji se može upjeniti i ima niže talište od metalne pjene u koju se stavlja umetak. Kad se uloži punilo, cijeli sklop treba zagrijati. Tijekom zagrijavanja dolazi do upjenjavanja punila koje povezuje umetak i osnovnu metalnu pjenu. Dijelovi od metalne pjene s bakrenim umetkom prikazani su na slikama 4.1. i 4.2.

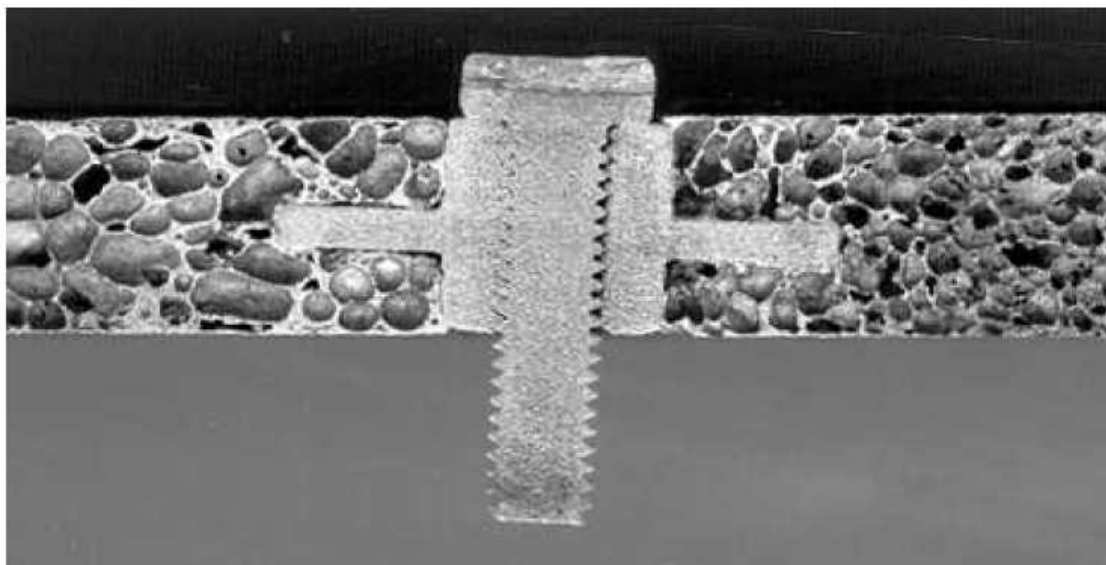


Slika 4.1. Proces povezivanja umetka i metalne pjene /10/



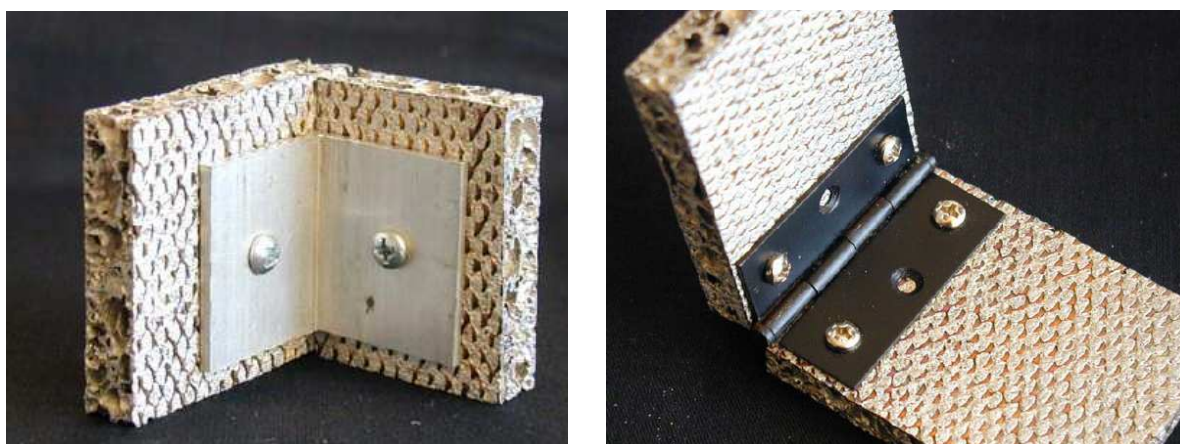
Slika 4.2. Komad metalne pjene s bakrenim umetkom /10/

Na slici 4.3. prikazana je fotografija rastavljivog povezivanja metalne pjene pomoću vijka i umetka.



4.3. Povezivanje metalne pjene pomoću vijka i umetka /19/

Na slici 4.4. prikazani su još neki primjeri rastavljivog povezivanja metalnih pjena.

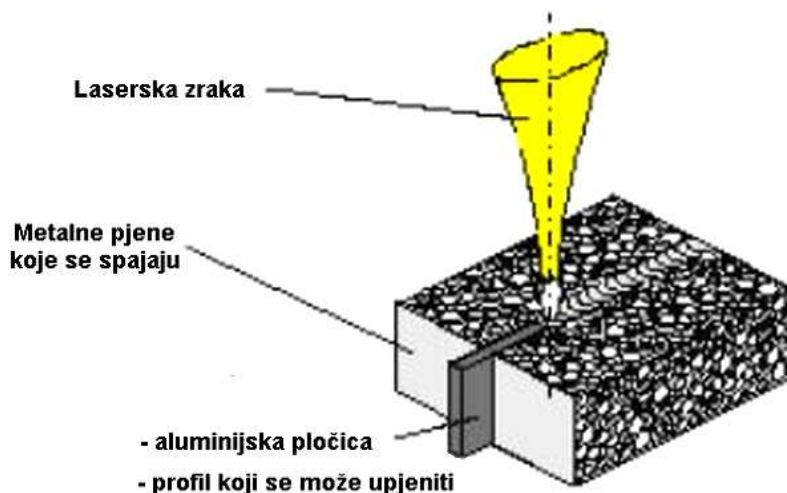


Slika 4.4. Primjeri rastavljivog spajanja metalnih pjena /20/

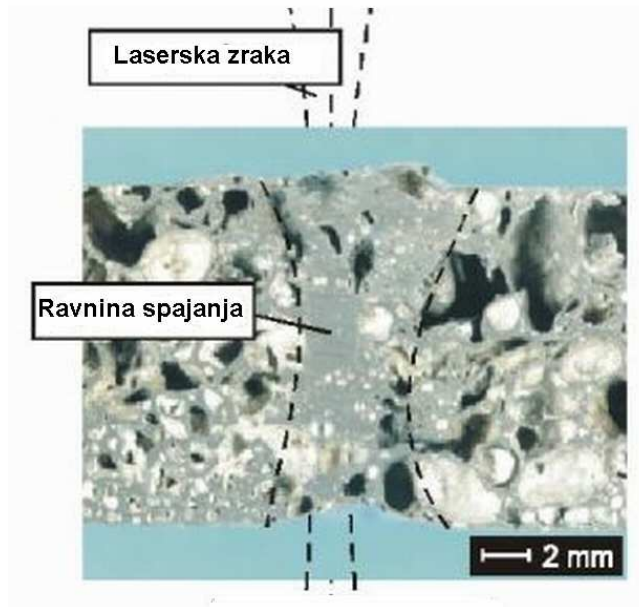


### 4.3. Zavarivanje

Metalne pjene mogu se spojiti postupcima lemljenja i zavarivanja. Zavarivanje neporoznog aluminija otežano je zbog tankog sloja oksida  $Al_2O_3$  na površini koji ima više talište od aluminija. Nakon uklanjanja oksida zavarivanje se provodi u atmosferi zaštitnog plina kako se sloj oksida ne bi obnovio. Sve to treba uzeti u obzir prilikom zavarivanja aluminijskih pjena. Zavaruje se najčešće laserom. Gustoća energije iznosi  $10^6 \text{ W/cm}^2$ . Laserska zraka je fokusirana zbog čega je i zona utjecaja topline puno uža nego kod drugih postupaka. To je vrlo važno kod metalnih pjena zato što se smanjuje mogućnost urušavanja ćelijaste strukture. Do urušavanja dolazi zbog prijelaza čvrste faze u tekuću što se također može spriječiti uporabom dodatnog materijala koji se na mjesto zavarivanja dodaje u obliku šipke ili ploče. Primjenjuje se takav dodatni materijal koji se pod utjecajem topline također pretvara u metalnu pjenu. Način spajanja laserom pokazuje slika 4.5., a presjek zavara slika 4.6.

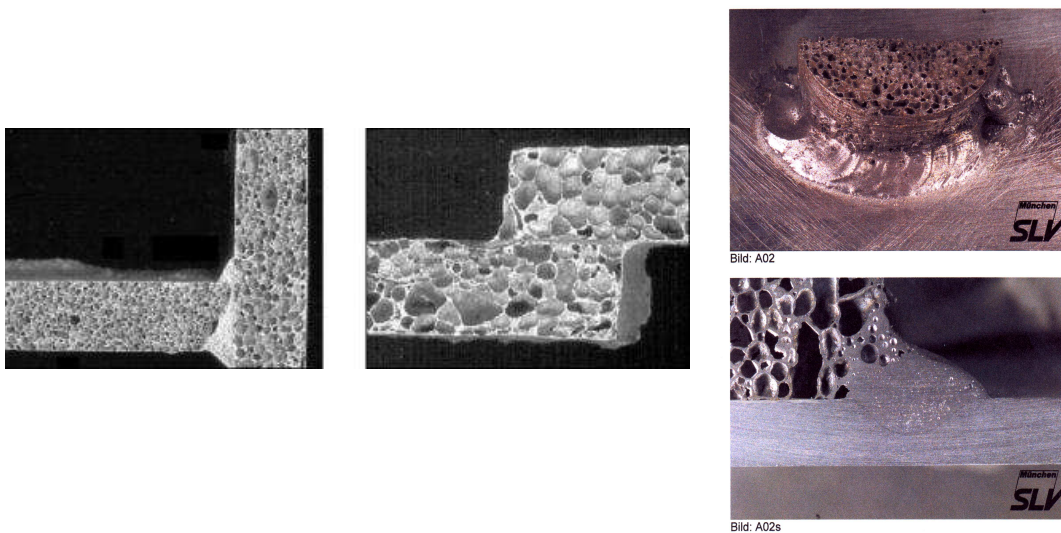


Slika 4.5. Lasersko zavarivanje metalne pjene /20/



Slika 4.6. Presjek zavora dviju metalnih pjena /20/

Budući da se želi postići ćelijasta struktura zavora, koristi se dodatni materijal koji se pod utjecajem topline također pretvara u metalnu pjenu. Na slici 4.7. prikazani su još neki primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena.



Slika 4.7. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena /20/

## 5. PRIMJENA METALNIH PJENA

Primjena metalnih pjena slijedi iz njihovih povoljnih svojstava u odnosu na ostale materijale. Budući da su metalne pjene relativno novi oblik materijala, njihova primjena još uvijek nije u potpunosti raširena, iako već i danas postoji nekoliko respektabilnih proizvođača ove vrste materijala. Loša strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no ona se neprestano smanjuje i u skoroj budućnosti mogu uspješno zamijeniti druge porozne materijale. Tablica 4. pokazuje neke od mogućih područja primjene metalnih pjena i obrazloženje svojstava.

**Tablica 4.** Moguća primjena metalnih pjena /12/

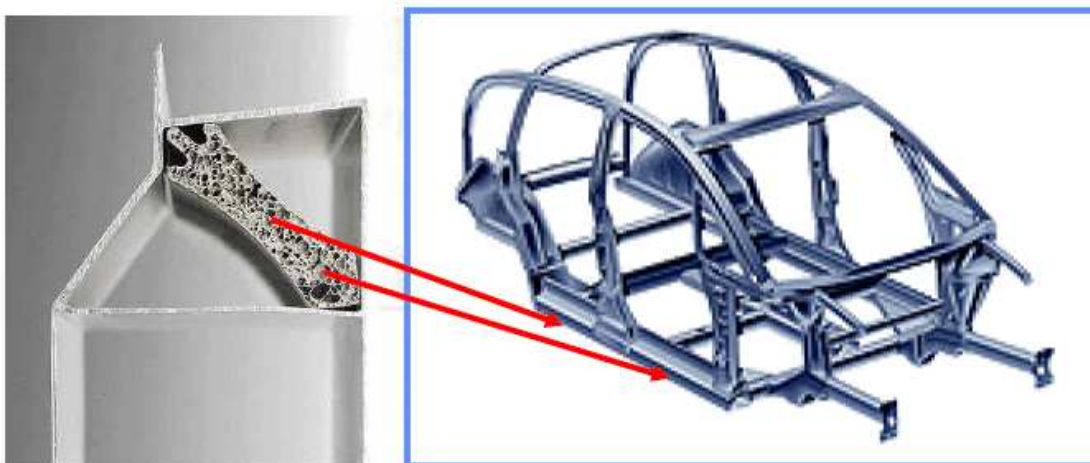
PODRUČJE PRIMJENE	OBRAZLOŽENJE
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i težine pri savijanju
Jezgra sendvič konstrukcija	Niska gustoća i dobra smična i lomna čvrstoća
Prigušenje vibracija	Prigušenje vibracija je i do 10 puta bolje nego kod neporoznih metala
Apsorpcija zvuka	Metalne pjene s mrežastom 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 - stjenke 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

Najčešći oblik metalnih pjena su sendvič-konstrukcije (slika 5.1.).



5.1. Sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene /22/

Istraživanja pokazuju da najveće zanimanje za metalne pjene pokazuje industrija transportnih sredstava (slika 5.2.).



Slika 5.2. Primjena metalnih pjena u autoindustriji /20/

Metalne pjene se u autoindustriji uglavnom koriste kao jezgra sendvič-konstrukcija. One se koriste za izradu dijelova oplata i okvira. Time se masa automobila može smanjiti za 20 % što predstavlja i značajne uštede u potrošnji goriva. Ako se zna da metalne pjene imaju dobra toplinska i zvučno-izolacijska svojstva te mogućnost prigušenja vibracija, jasno je da se one mogu primijeniti za razdvajanje kabine vozila od područja gdje je motor (slika 5.3.).



Slika 5.3. Pregrada između kabine vozila i motora vozila, izrađena od metalne pjene

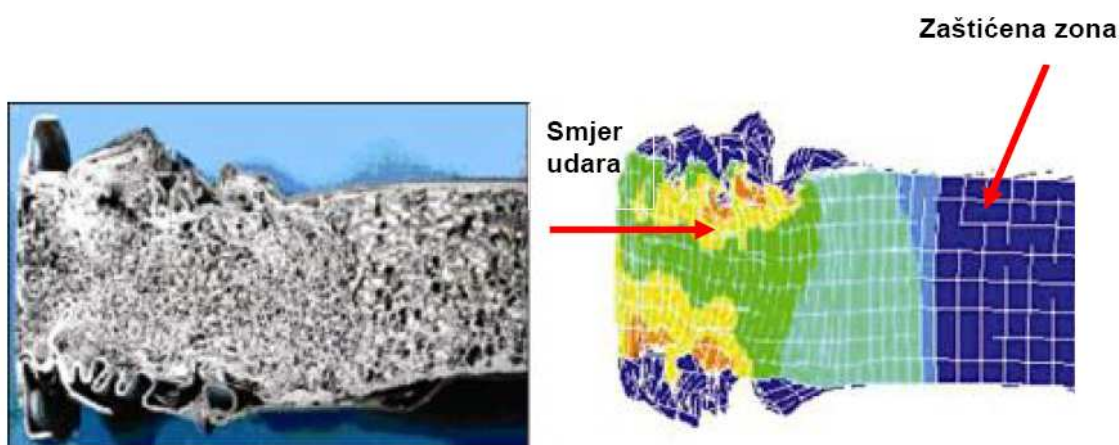
/23/

Budući da aluminijske pjene imaju vrlo dobru sposobnost apsorpcije energije udara, od njih se mogu izrađivati i branici koji povećavaju sigurnost putnika pri udarcima. Primjer korištenja Al pjene za izradu branika prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4. Branik automobila izrađen od aluminijske pjene /23/

Da se metalne pjene kao materijal koji apsorbira energiju udara već ispituju u industriji pokazuje sljedeći primjer. BMW je napravio niz udarnih testova na nosaču motora koji ima jezgru od metalne pjene. Nosač je udaren masom od 885 kg pri brzini od 30 km/h. Napravljen je kao sendvič-ploča u kojoj su vanjski limovi napravljeni od čelika, a jezgra od pjene AlSiMg. Nakon testa, gustoća u aluminijskoj pjeni nehomogeno je raspoređena u aksijalnom smjeru zbog dinamičkih procesa. Napravljen je simulirani model udara numeričkim metodama (slika 5.5.).



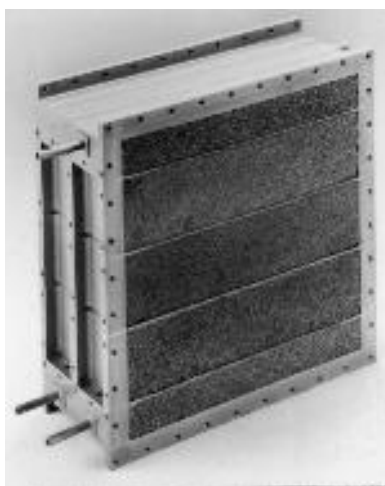
Slika 5.5. Udarni test nosača motora BMW -a, /24/

Osim u autoindustriji ovi materijali koriste se i u industriji tračnih vozila, brodova, zrakoplova i svemirskih letjelica. Posebno treba razmotriti mogućnost izrade titanovih pjena i njihovu primjenu u zrakoplovnoj industriji zato što titan ima vrlo dobra mehanička svojstva po jedinici gustoće.

Toplinska svojstva metalnih pjena dosta ovise o njihovoj građi. Ako pjena ima otvorene ćelije, ona će dobro provoditi toplinu, a ako su ćelije zatvorene, ona je vrlo dobar 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, grijaćih ploča, itd. (slike 5.6 i 5.7.).



Slika 5.6. Grijaća ploča izrađena od ALPORAS ojačane pjene /20/



Slika 5.7. Izmjenjivač topline izrađen od DUOCEL aluminijske pjene /9/

Velik omjer površina/volumen metalnih pjena također omogućuje izradu uređaja za kontrolu protoka fluida kao što su npr. difuzori plina, mjerači razine tekućine (slika 5.8.) i sl.



Slika 5.8. Plovak izrađen od metalne pjene /20/

Metalne pjene mogu se koristiti i u graditeljstvu gdje do izražaja dolazi njihova vrlo dobra mogućnost 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 5.9. prikazuje vijadukt čija je donja površina napravljena od metalne pjene koja dobro upija buku. Time je razina buke koju proizvode vozila znatno smanjena.





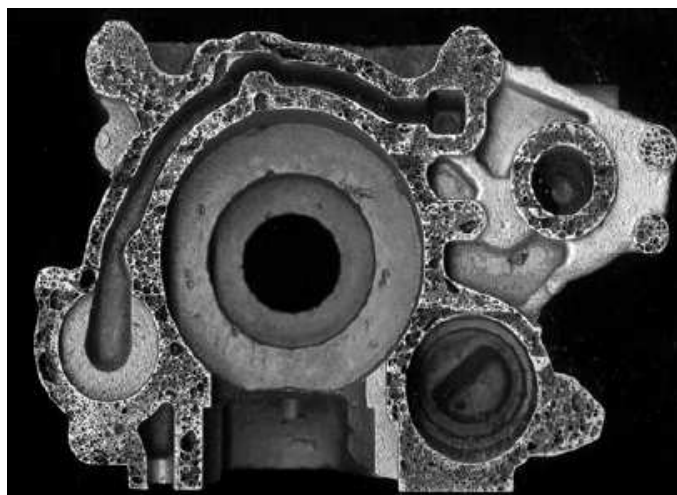
Slika 5.9. Vijadukt čija je donja površina izvedena od metalne pjene /25/

Od aluminijskih pjena izrađuju se također razni oblici prigušivača zvuka, kao što je i prikazano na slici 5.10. Osim toga, od ove vrste materijala izrađuju se i filteri koji služe za odvajanje dviju tekućina ili za odvajanje krutih čestica od plinova ili tekućina.



Slika 5.10. Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena /6/

Danas razvijeni postupci lijevanja omogućuju izradu izrazito složenih oblika proizvoda od metalnih pjena (slika 5.11.). Mehanička svojstva mogu se optimizirati različitim postupcima toplinske obrade legure od koje nastaje pjena, a također su moguća i modificiranja površine.



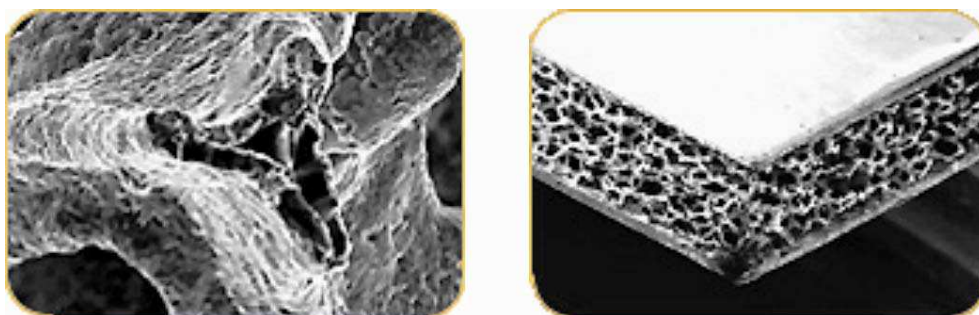
Slika 5.11. Lijevani proizvod od aluminijske pjene /26/

Mala masa metalnih pjena vrlo je poželjna u industriji namještaja. Porozna građa različite teksture ima izrazito zanimljiva estetska svojstva (slika 5.12.).



Slika 5.12. Korištenje metalnih pjena u estetske svrhe /20/

Osim aluminijskih pjena danas se u komercijalne svrhe proizvode i niklene pjene (slika 5.13). One se uglavnom primjenjuju za izradu dijelova NiCd i NiMH baterija koje se rabe u električnim alatima, video kamerama, mobitelima itd. Sendvič-konstrukcije s jezgrom od niklene pjene mogu se koristiti za izradu izmjenjivača topline.



Slika 5.13. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklene pjene /27/

U narednim godinama očekuje se znatan porast proizvodnje metalnih pjena kao i sniženje cijena, što će dovesti do znatno šire primjene.

## **6. METODE ISPITIVANJA APSORPCIJE ENERGIJE UDARA**

Moguće je proizvesti metalne pjene različite gustoće i svojstava. Upravo iz tog razloga potrebno je odrediti koja pjena najbolje zadovoljava zadane eksploatacijske uvjete. Metode koje se danas primjenjuju za ispitivanje apsorpcije energije udara možemo podijeliti u dvije osnovne skupine /28/ :

- analitičke metode
- eksperimentalne metode

### **6.1. Analitičke metode određivanja apsorpcije energije udara**

Osnovne analitičke metode koje se danas primjenjuju su /28/ :

- Iskoristivost apsorpcije energije udara
- Kapacitet apsorpcijske energije
- Dijagram apsorbirane energije

#### **6.1.1. Iskoristivost apsorpcije energije udara**

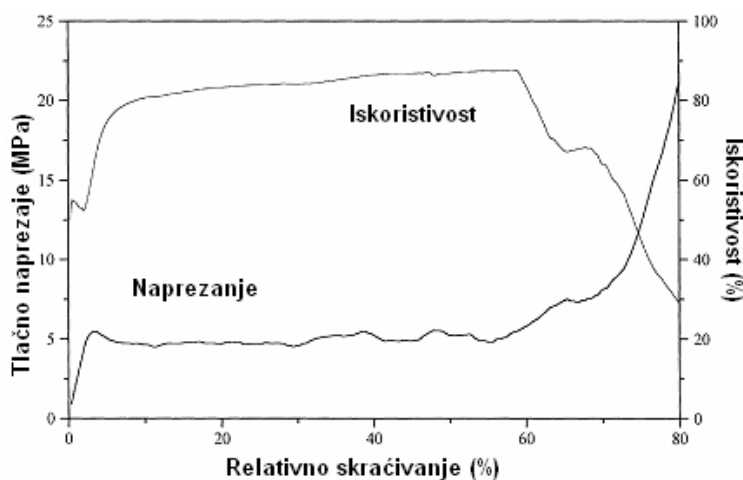
Iskoristivost apsorpcije energije udara uspoređuje apsorbiranu deformacijsku energiju materijala koji se ispituje s idealnim apsorpcijskim materijalom. Smatra se da je idealni apsorpcijski materijal onaj koji se opterećen tlačnom silom tijekom cijelog procesa deformira uz konstantno naprezanje.

Iskoristivost  $\eta$  definira se kao omjer apsorbirane energije ispitnog uzorka i apsorbirane energije idealnog apsorpcijskog materijala:

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

gdje je :  $F_{\max}(s)$  – maksimalna sila elastične deformacije ;  $s$  – skraćenje

Metalne pjene mogu se optimalno opterećivati sve dok iskoristivost drži neku konstantnu vrijednost. Kad se ćelije sabiju dolazi do naglog pada iskoristivosti uz povećanje naprezanja. Slika 6.1. prikazuje dijagram tlačnog naprezanja i apsorpcijsku iskoristivost AISi pjene.



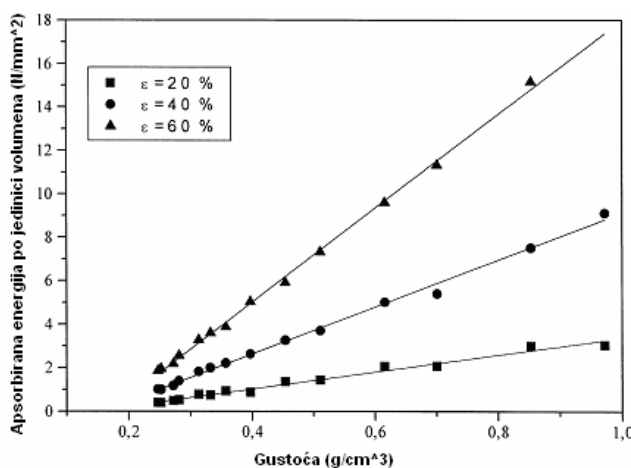
Slika 6.1. Dijagram tlačnog naprezanja i apsorpcijske iskoristivosti po relativnom skraćanju AISi pjene ( $\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$ ) /28/

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

### 6.1.2. Kapacitet apsorpcijske energije

Prilikom konstruiranja transportnih vozila, dimenzije i masa pojedinih dijelova su od velike važnosti. Da bi se odabrao idealan apsorpcijski materijal potrebno je usporediti kapacitete apsorbirane energije pojedinih pjenastih materijala.

Slika 6.2. prikazuje apsorbiranu energiju udara po jedinici volumena u odnosu na gustoću pri deformaciji od  $\epsilon = 20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$  i  $60\%$ .

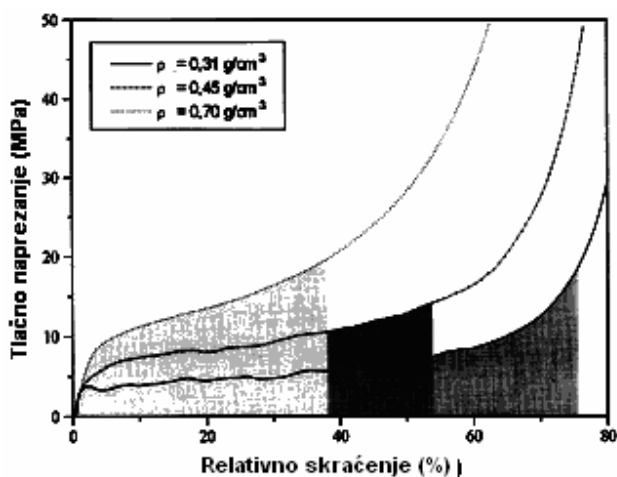


Slika 6.2. Dijagram apsorbirane energije udara po jedinici volumena AlSi4 pjena različitih gustoća pri tlačnoj deformaciji od  $\epsilon = 20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$  i  $60\%$  /28/

Iz dijagrama je vidljivo da pjene manje gustoće imaju manji kapacitet apsorpcije energije nego pjene veće gustoće.

### 6.1.3. Dijagram apsorbirane energije

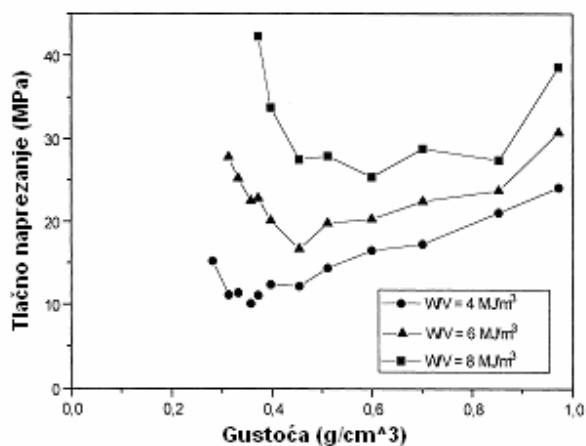
Maiti S.K. i Gibson L.J. razvili su metodu i predložili apsorpcijsko energetske dijagrame za utvrđivanje optimalnog materijala pri apsorpciji energije udara. Pretpostavili su da približno idealni pjenasti materijal apsorbira zadanu energiju uz minimalno naprezanje. Slika 6.3. prikazuje tlačno naprezanje AlSi12 metalne pjene različitih gustoća.



Slika 6.3. Tlačna karakteristika AlSi12 metalne pjene različitih gustoća /28/

Površina ispod krivulja predstavlja istu količinu apsorbirane udarne energije po jedinici volumena za pojedinu metalnu pjenu. Na ovaj način može se odrediti gustoća pjene s najnižim maksimalnim naprezanjem za zadanu udarnu energiju. U ovom slučaju pjena gustoće  $\rho=0,45 \text{ g/cm}^3$  doseže najniže tlačno naprezanje za zadanu količinu apsorbirane energije.

Slika 6.4. prikazuje maksimalno naprezanje metalne pjene različitih gustoća za zadanu apsorbiranu udarnu energiju.



Slika 6.4. Maksimalno naprezanje metalne pjene različitih gustoća za zadanu apsorbiranu udarnu energiju /28/

Smanjenjem zadane udarne energije po jedinici volumena pjene niže gustoće bolje apsorbiraju udarnu energiju od pjena veće gustoće. Na ovaj način može se odrediti idealni apsorpcijski materijal za zadane uvjete.



## 6.2. Eksperimentalne metode određivanja apsorpcije energije udara

Metode kojima se ispituju svojstva metalnih pjena još uvijek nisu dovoljno razrađene i provjerene. Prema današnjim saznanjima postoje dvije eksperimentalne metode koje se koriste pri određivanju apsorpcije energije za metalne pjene :

- statički tlačni pokus
- dinamički tlačni pokus

### 6.2.1. Statički tlačni pokus

Statičkim tlačnim pokusom utvrđuju se mehanička svojstva pjene pod djelovanjem normalnog jednoosnog tlačnog naprezanja. Ovakva ispitivanja se provode ponajprije na materijalima u građevinarstvu (kamen, drvo, cigla, beton).

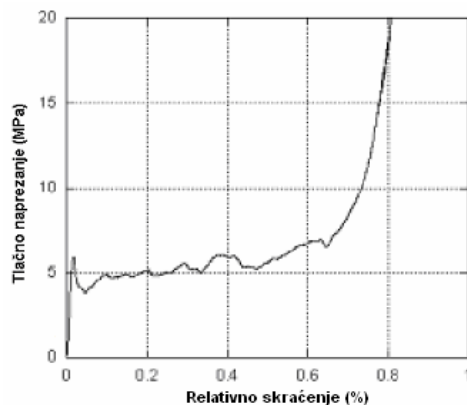
Ispitivanje se provodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama, te tlačnim prešama, a sila se ostvaruje mehanički ili hidraulički (slika 6.5.),



Slika 6.5. Kidalica u Laboratoriju za ispitivanje materijala (FSB Zagreb)  
proizvođač : WPM Njemačka, model : EU 40 mod

Uobičajeno je ispitivanje epruveta cilindričnog oblika, no koriste se i epruvete kvadratnog oblika. Zbog nerazrađenosti metode, dimenzije uzorka još uvijek nisu standardizirane.

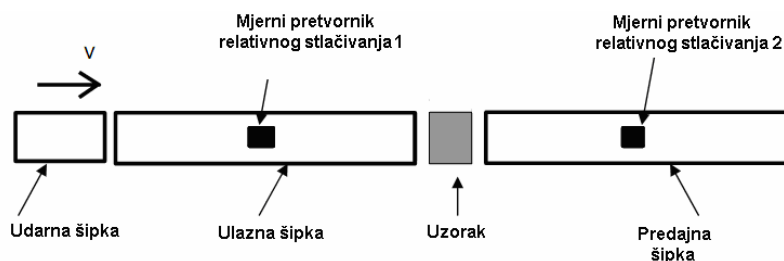
Statički tlačni pokus se izvodi pri malim brzinama stlačivanja. Uobičajena brzina stlačivanja iznosi oko 10 mm/min. Prilikom statičkog tlačnog pokusa mjeri se deformacija (sabijanje). Slika 6.6. prikazuje dijagram tlačnog napreznja i relativnog skraćenja (sabijanja) metalne pjene pri statičkom tlačnom pokusu.



Slika 6.6. Dijagram tlačnog napreznja i relativnog skraćenja metalne pjene pri statičkom tlačnom pokusu /29/

### 6.2.2. Dinamički tlačni pokus

Da bi se utvrdilo ponašanje metalnih pjena pri sudaru transportnih sredstva potrebno je provesti dinamički tlačni pokus. Dinamičkim tlačnim pokusom utvrđuje se mehanička svojstva pjene pod djelovanje jednoosnog udarnog tlačnog napreznja. Ispitivanja se najčešće provode (SHPB) metodom na istoimenom uređaju („Split Hopkins Pressure Bar“). Ovaj uređaj se ponajprije koristi pri ispitivanju betona i drugih građevinskih materijala. Uzorci su uobičajeno cilindričnog oblika, ali dimenzije uzoraka još uvijek nisu standardizirane. Slika 6.7. prikazuje shematski prikaz SHPB uređaja.



Slika 6.7. Shematski prikaz SHPB uređaja /30/

Pri sudaru vozila, brzine stlačivanja pojedinih dijelova transportnih sredstva najčešće se kreću od  $1 \times 10^2$  do  $1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  /31/. Da bi se što preciznije simulirao sudar transportnih sredstava, stlačivanje uzoraka SHPB metodom provodi se pri brzinama od  $2,0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ .

### 6.3. Ponašanje aluminijske pjene pri tlačnom pokusu

Tipična krivulja tlačnog naprezanja i tlačne deformacije može se podijeliti na tri područja (slika 6.8.) :

1. Tlačno naprezanje se povećava linearno sa povećanjem tlačne deformacije (elastična deformacija stjenka ćelija)
2. Deformacija pri konstantnom tlačnom naprezanju ( stjenke se deformiraju i pucaju)
3. Brzo povećanje tlačnog naprezanja poslije sabijanja ćelija



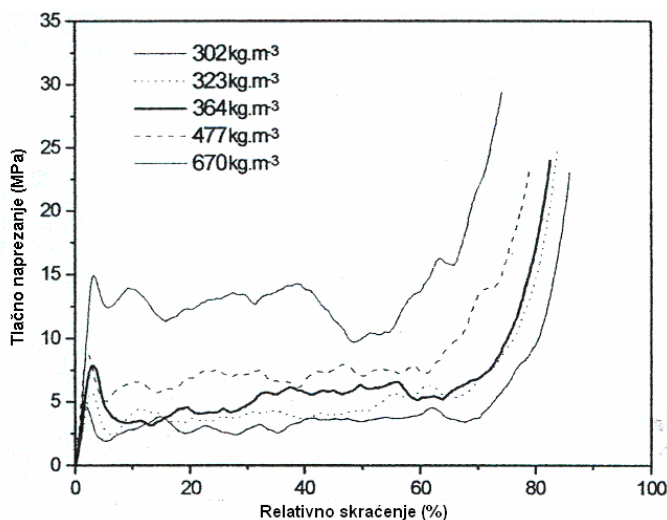
Slika 6.8. Dijagram tlačnog naprezanja i tlačne deformacije metale pjene

U prvom području krivulje tlačnog naprezanja i deformacije kod metalnih pjena dolazi do pada tlačnog naprezanja. Pad naprezanja je izazvan pucanjem stjenke ćelija i djelomične plastične deformacije u tom sloju uzorka. Početno pucanje stjenke ćelija u uzorku pojavljuje se u regiji niže lokalne gustoće. Pukotina propagira kroz cijeli presjek uzorka, što rezultira kolapsu pjene u tom nivou.

U drugom području krivulje dolazi do deformacije uzorka uz konstantno naprezanje. Valovitost krivulje u drugoj fazi uzrokovano je dodatnim popuštanjem susjednih nivoa sve dok se uzorak ne sabije.

U trećem području krivulje tlačno naprezanje naglo raste zbog toga što se uzorak u potpunosti sabio.

Slika 6.9. prikazuje dijagram tlačnog naprezanja i skraćenja aluminijske pjene AlSi 12 Mg 0,6 različitih gustoća.

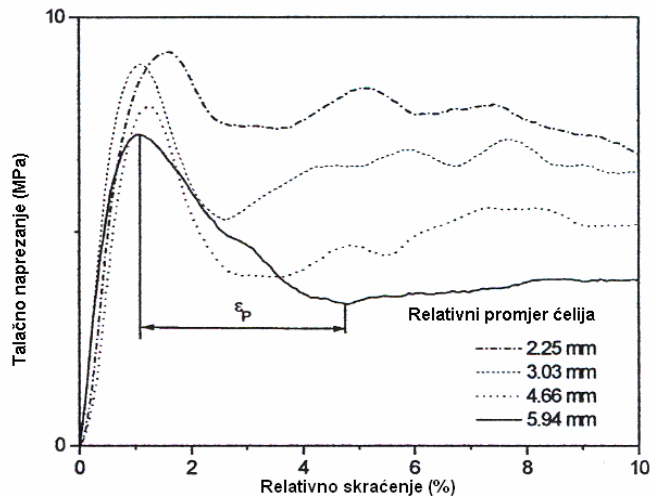


Slika 6.9. Dijagram tlačnog naprezanja i skraćenja aluminijske pjene AlSi 12 Mg 0,6 različitih gustoća /32/

Iz slike je vidljivo da povećanjem gustoće aluminijske pjene AlSi 12 Mg 0,6 dolazi do znatnog povećanja granice stlačivanja.

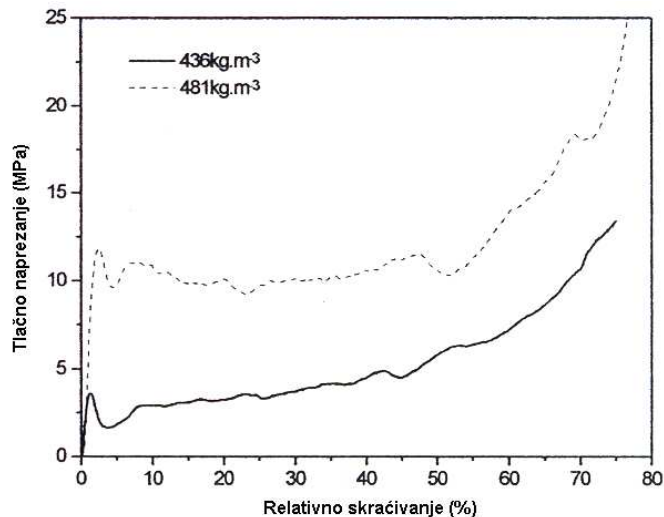
Smanjenjem ćelija dolazi do znatnog povećanja granice stlačivanja kod metalnih pjena. Uzrok povećanja granice stlačivanja je u manjoj vjerojatnosti pojavljivanja grešaka u strukturi metalne pjene. Međutim efekt povećanja gustoće znatno više utječe na povećanje granice stlačivanja.

Slika 6.10 prikazuje utjecaj ćelija na tijek dijagrama tlačnog naprezanja – tlačnog stlačivanja metalne pjene.



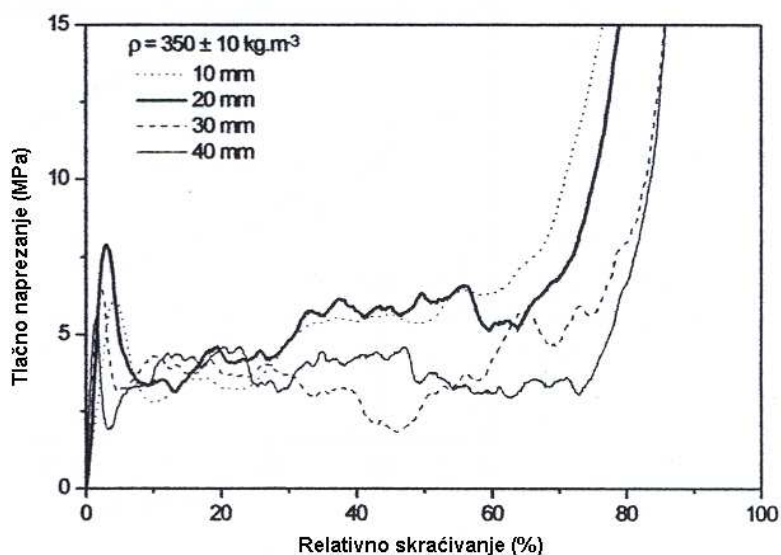
Slika 6.10. Utjecaj ćelija na tijek dijagrama tlačnog naprezanja – relativnog skraćivanja metalne pjene konstantne gustoće  $510 \text{ kg/mm}^3$  /32/

Uzorci s vanjskom opnom imaju do tri puta veću granicu stlačivanja nego uzorci bez nje, uz gotovo podjednaku relativnu gustoću. Prisutnost vanjske opne povisuje granicu stlačivanja uz konstantnu i homogeniju deformaciju pri konstantnom naprezanju (slika 6.11).



Slika 6.11. Deformacijska krivulja AlSi 12 Mg 0,6 pjene: uzorak bez opne ( $440 \text{ kg/mm}^3$ ,  $\text{Ø}35 \text{ mm} \times 51 \text{ mm}$ ) i uzorak s opnom ( $480 \text{ kg/mm}^3$ ,  $\text{Ø}40 \text{ mm} \times 51 \text{ mm}$ ) /32/

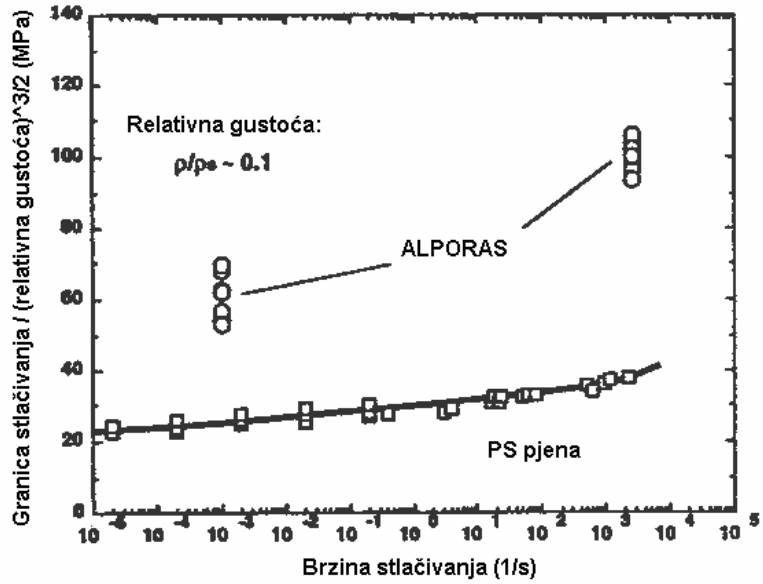
Varijacije u geometriji također utječu na mehanička svojstva metalnih pjena. Povećanjem visine uzorka granica stlačivanja pada dok relativno skraćivanje se produžuje. Pad granice stlačivanja kod dužih uzoraka uzrokovan je zbog veće vjerojatnosti prisutnosti velikih lokalnih grešaka u strukturi metalne pjene. Slika 6.12 prikazuje dijagram tlačnog naprezanja i relativnog skraćivanja AlSi12 Mg 0,6 pjene bez vanjske opne uz konstantnu gustoću u ovisnosti visine uzorka.



Slika 6.12. Dijagram tlačnog naprezanja i relativnog skraćivanja AlSi 12 Mg 0,6 pjene bez vanjske opne uz konstantnu gustoću u ovisnosti visine uzorka (promjer uzoraka  $\varnothing$  25 mm) /32/

Pri dinamičkom ispitivanju metalne pjene apsorbiraju znatno više udarne energije nego pri statičkom tlačnom ispitivanju. Metalne pjene apsorbiraju 50 % više udarne energije pri dinamičkom ispitivanju nego pri statičkom ispitivanju /33/. Zbog ovog svojstva potrebno je poznavati i brzine stlačivanja koje se mogu javiti u eksploataciji. Slika 6.13. prikazuje ovisnost brzine stlačivanja i granice stlačivanja za ALPORAS pjenu u odnosu na PS pjenu.





Slika 6.13. Ovisnost brzine stlačivanja i granice stlačivanja po jedinici (relativne gustoće) za ALPORAS pjenu u odnosu na PS pjenu /16/

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom eksperimentalnom dijelu izrađeni su uzorci od aluminijskih pjena različitih gustoća, određena je apsorpcija energije udara tih uzoraka, te su analizirani dobiveni rezultati.

### 7.1. Idejni projekt

Projekt je podijeljen u dva dijela. U prvom dijelu zamišljeno je da se izrade uzorci (od aluminijske pjene) različitih gustoća i oblika, a u drugom dijelu da se ti uzorci ispitaju i analiziraju rezultati. Naručene su dvije vrste čeličnih cijevi koje su poslužile kao kalupi za izradu uzoraka (slika 7.1) :

- Kvadratna cijev (80 × 80 × 2,0)
- Šavna cijev (Ø 88,9 × 2,0)



Slika 7.1. Čelične cijevi koje služe kao kalupi za izradu uzoraka

Materijal od kojih su čelične cijevi izrađene, prema DIN normi je St 37 – 2, a prema HRN normi je Č.0361.

Cijevi su izrezane na duljinu od 100 mm i takve su pripravljene za kalupljenje. Na slici 7.2. prikazana je čelična cijev pripravljena za kalupljenje i izradu uzorka od aluminijske pjene.



Slika 7.2. Čelična cijev pripravljena za kalupljenje

Odlučeno je da se izrade dvije vrste aluminijske pjene (sa zatvorenim ćelijama), pa su u tu svrhu i naručene dvije vrste prekursora :

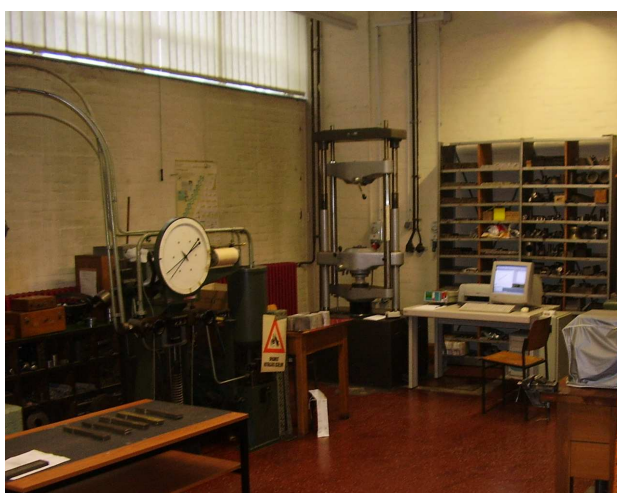
- ALULIGHT AlSi 10 TiH<sub>2</sub> – 0,8
- ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH<sub>2</sub> – 0,4

Prekursor je poluproizvod koji se proizvodi na način da se prah metalne legure, pomiješan sa agensom koji omogućava pjenjenje, ekstrudira u pločice. U našem slučaju prekursor se sastoji od praha AlSi 10 pomiješanog sa 0,8% TiH<sub>2</sub> i AlMgSi 0,6 pomiješanog sa 0,4% TiH<sub>2</sub>.

Na slici 7.3. prikazan je uzorak koji je ohlađen i izvađen iz kalupa, te je spreman za ispitivanje. Ispitivanje uzoraka izvršeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (slika 7.4.).



Slika 7.3. Uzorak aluminijske pjene izvađen iz kalupa



Slika 7.4. Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (FSB, Zagreb)

## 7.2. Izrada uzoraka

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 peč snage 10 kW (slika 7.5.).



Slika 7.5. Elektrootporna peč (FSB, Zagreb)

Postupak izrade uzoraka sastoji se od nekoliko faza :

- Punjenje kalupa sa prekursorima :

Već je ranije navedeno da su kao kalupi korištene dvije vrste čeličnih cijevi izrezane na duljinu od 100 mm. Kvadratna cijev (80 × 80 × 2,0) i šavna cijev (Ø 88,9 × 2,0). Volumen kalupa iznosi 578 cm<sup>3</sup> za kalup kvadratnog oblika i 566 cm<sup>3</sup> za kalup cilindričnog oblika. Budući da je volumen kalupa konstantan, kako bi se dobila različita gustoća aluminijske pjene potrebno je varirati masu prekursora u kalupima. Ako se želi postići veća gustoća aluminijske pjene potrebno je staviti i veću masu prekursora u kalup. Slika 7.6. prikazuje uređaj za mjerenje mase prekursora. Na kraju ove faze kalup se napuni sa prekursorima (slika 7.7).



Slika 7.6. Vaga (Scout Pro) za mjerenje mase prekursora



Slika 7.7. Kalup napunjen sa prekursorima

- Brtvljenje kalupa :

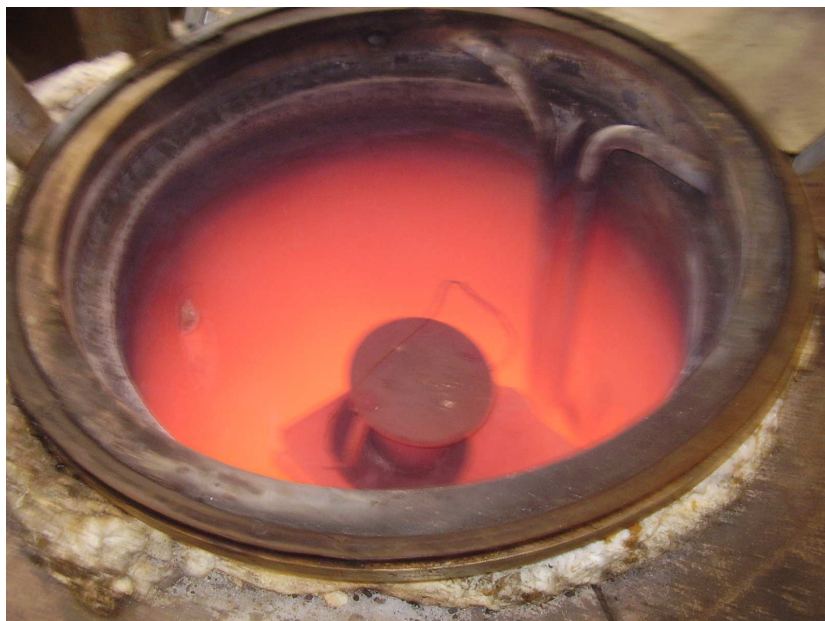
Da bi u potpunosti bio spreman za stavljanje u peć kalup je potrebno zabrtviti. Poklopac se na ostatak kalupa pričvršćuje uz pomoć dvije matice (slika 7.8.).



Slika 7.8. Brtvljenje pripremljenog kalupa

- Pjenjenje prekursora :

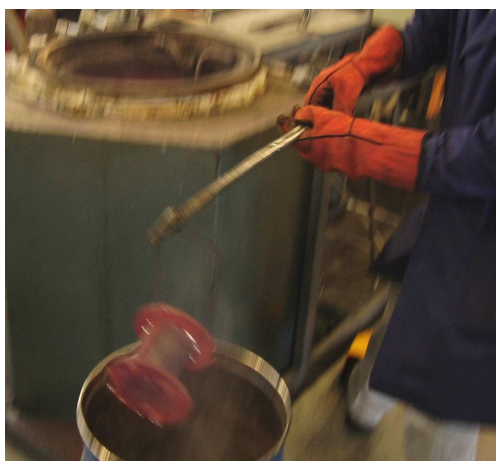
U peć zagrijanu na 850 °C stavlja se kalup (slika 7.9.), koji je prethodno napunjen sa prekursorima i zabrtvljen. Točno vrijeme koje kalup treba provesti u peći predstavlja problem jer ne postoji matematički model po kojem bi se izračunalo. Za svaki kalup i svaki materijal to vrijeme je potrebno odrediti ispitivanjem. Izradak je gotov kada se na poklopcu, koji na sebi ima otvor za izlaz plinova, pojavi prva kapljica taljevine. Da bi se mogla uočiti ta prva kapljica potrebno je peć često otvarati i provjeravati, ali to se mora izvesti što je brže moguće kako bi pad temperature u peći bio što manji.



Slika 7.9. Kalup u peći zagrijanoj na 850 °C

• Intenzivno hlađenje :

Nakon što se izradak izvadi iz peći potrebno ga je intenzivno ohladiti u vodi (slika 7.10. i 7.11.).



Slika 7.10. Stavljanje izradka u posudu sa vodom



Slika 7.11. Posuda sa vodom u koju je uronjen izradak



- Vađenje uzorka iz kalupa :

Na kraju procesa slijedi vađenje uzorka iz kalupa, a za to je ponekad potrebna i određena sila (slika 7.12. i 7.13.).



Slika 7.12. Izbijanje kvadratnog uzorka iz kalupa



Slika 7.13. Izbijanje cilindričnog uzorka iz kalupa

**Tablica 5.** Uzorci aluminijskih pjena kvadratnog oblika

Naziv	470 MAT x 1	470 MAT x 2	470 MAT x 3	470 SJAJ x 1	470 SJAJ x 2	470 SJAJ x 3	600 SJAJ x 1	600 SJAJ x 2	600 SJAJ x 3
Dimenzije (mm)	76 x 76 x 100								
Materijal	ALULIGHT AISi 10 TiH <sub>2</sub> – 0,8			ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH <sub>2</sub> – 0,4					
Masa (kg)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,60	0,60	0,60
Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	1,04	1,04	1,04

**Tablica 6.** Uzorci aluminijskih pjena cilindričnog oblika

Naziv	470 MAT x 1	470 MAT x 2	470 MAT x 3	600 SJAJ x 1	600 SJAJ x 2	600 SJAJ x 3
Dimenzije (mm)	Ø 84,9 x 100					
Materijal	ALULIGHT AISi 10 TiH <sub>2</sub> – 0,8			ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH <sub>2</sub> – 0,4		
Masa (kg)	0,47	0,47	0,47	0,60	0,60	0,60
Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	0,83	0,83	0,83	1,07	1,07	1,07



Slika 7.14. Uzorci aluminijskih pjena različite gustoće, materijala i oblika

### 7.3. Ispitivanje uzoraka

Ispitivanje (statički tlačni pokus) je izvršeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prilikom ispitivanja koristili smo kidalicu marke WPM, model EU 40 mod. Maksimalna tlačna sila ove kidalice iznosi 400 kN, a ispitivanje je vršeno brzinom od 6 mm/min. Slika 7.15. prikazuje kidalicu na kojoj je izvršeno ispitivanje.



Slika 7.15. Kidalica (WPM, EU 40 mod) na kojoj je izvršeno ispitivanje

Na idućim slikama prikazan je slijed ispitivanja uzoraka.



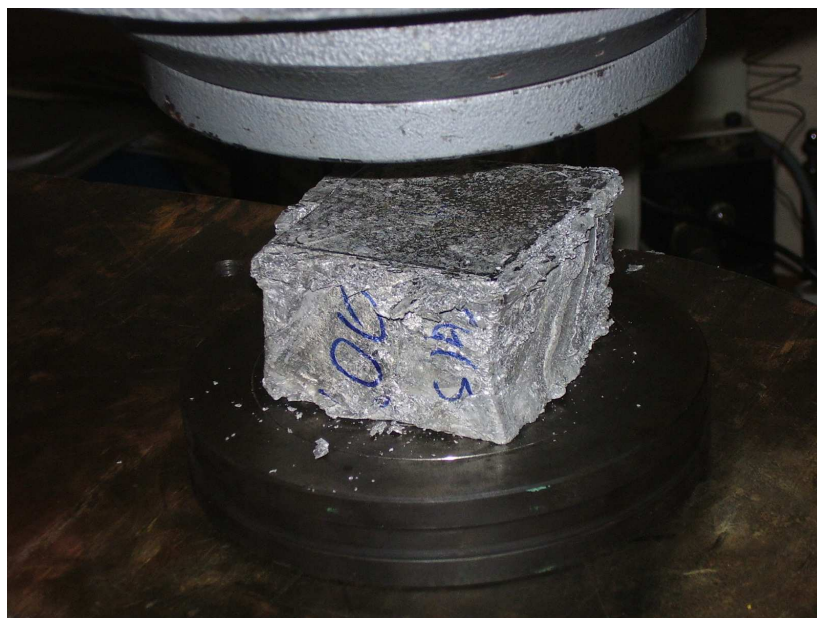
Slika 7.16. Kvadratni uzorak prije početka ispitivanja



Slika 7.17. Kvadratni uzorak za vrijeme ispitivanja



Slika 7.18. Cilindrični uzorak za vrijeme ispitivanja



Slika 7.19. Kvadratni uzorak nakon završetka ispitivanja

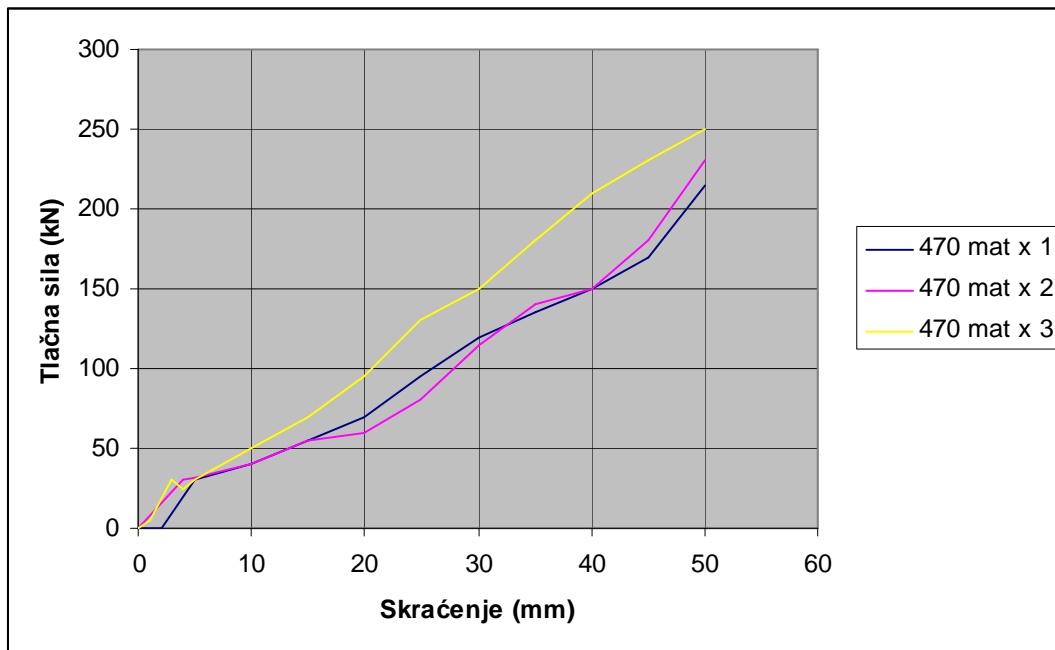


Slika 7.20. Uzorci nakon statičkog tlačnog pokusa

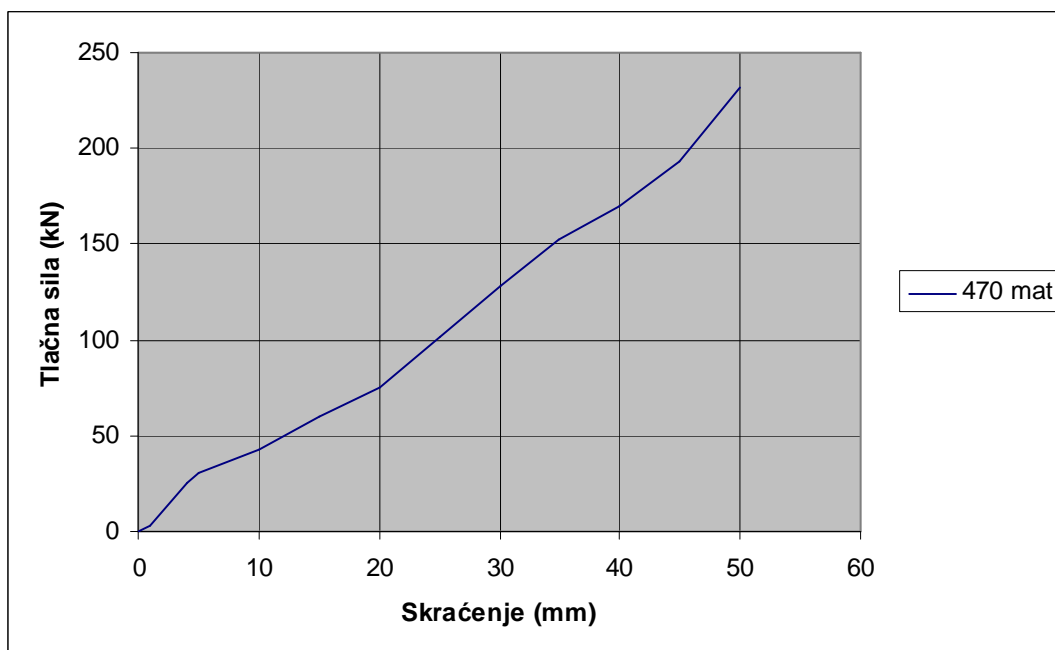
Dobiveni rezultati statičkog tlačnog pokusa priloženi su u prilogu 9.1. → dijagrami tlačna sila – skraćenje.

Na idućim slikama prikazani su aproksimirani dijagrami tlačna sila – skraćenje za uzorke kvadratnog i cilindričnog oblika (uzorci su navedeni u tablici 5 i tablici 6) .

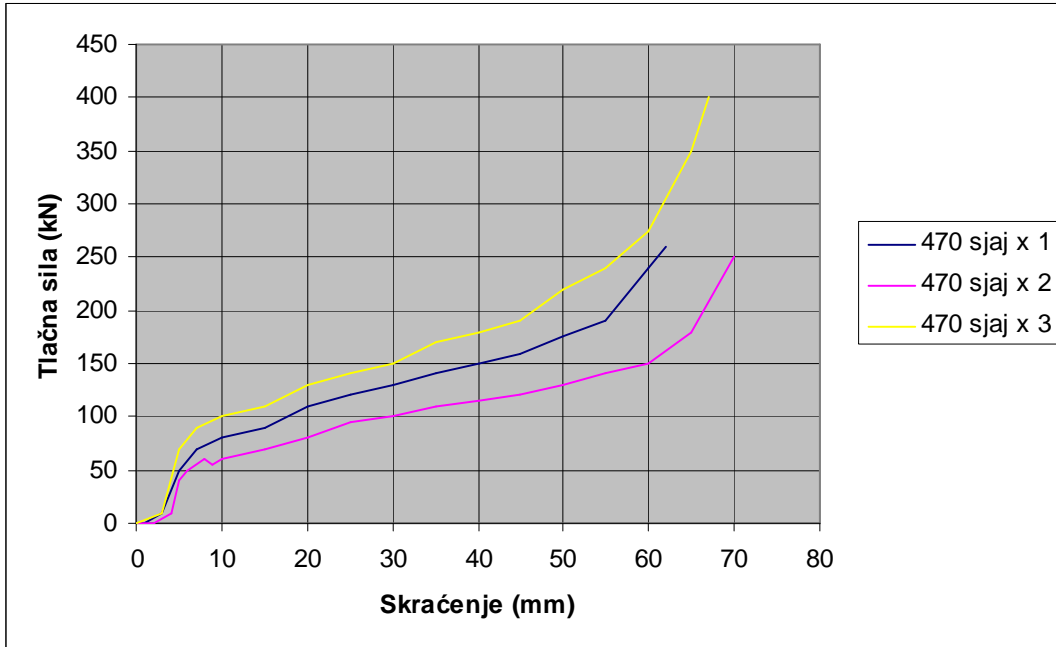
**KVADRATNI UZORCI :**



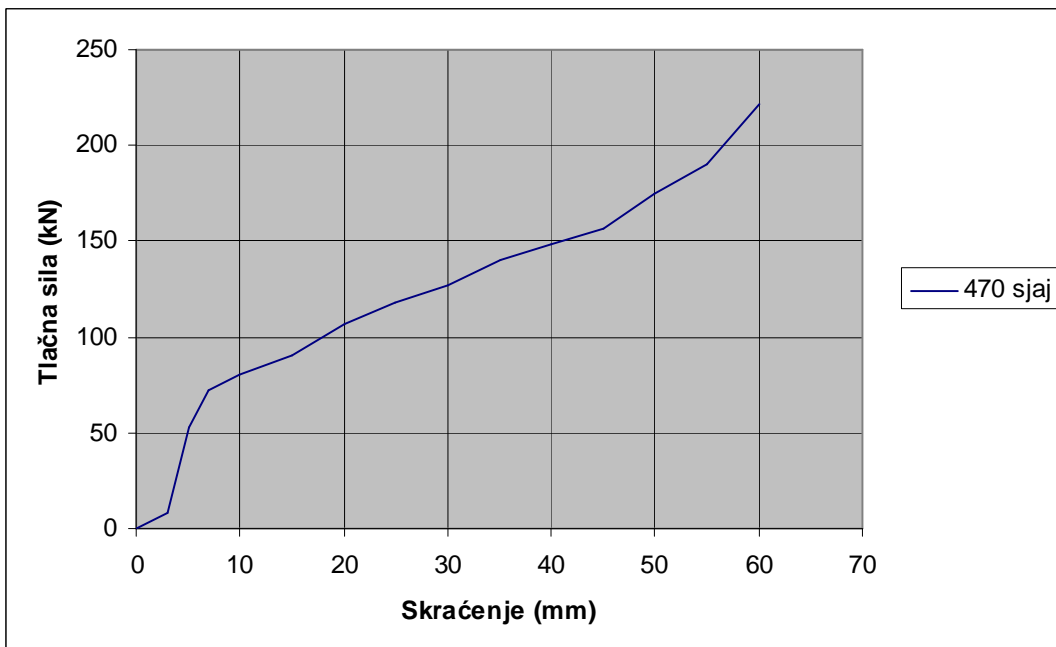
Slika 7.21. Dijagram tlačna sila – skraćenje za kvadratne uzorke 470 mat



Slika 7.22. Dijagram srednje vrijednosti za kvadratne uzorke 470 mat

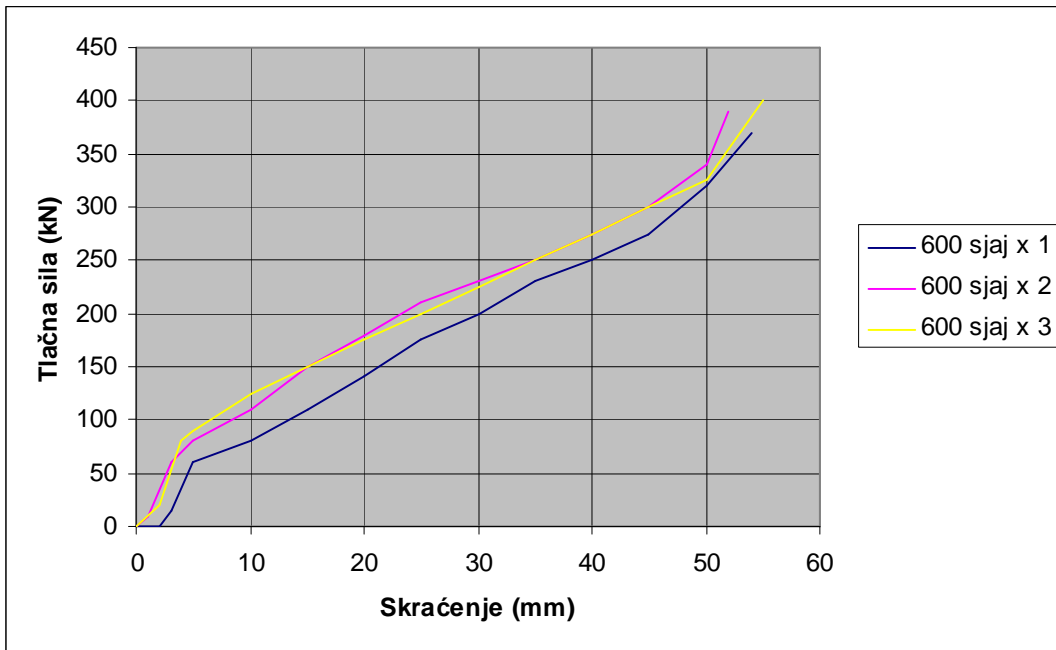


Slika 7.23. Dijagram tlačna sila – skraćenje za kvadratne uzorke 470 sjaj

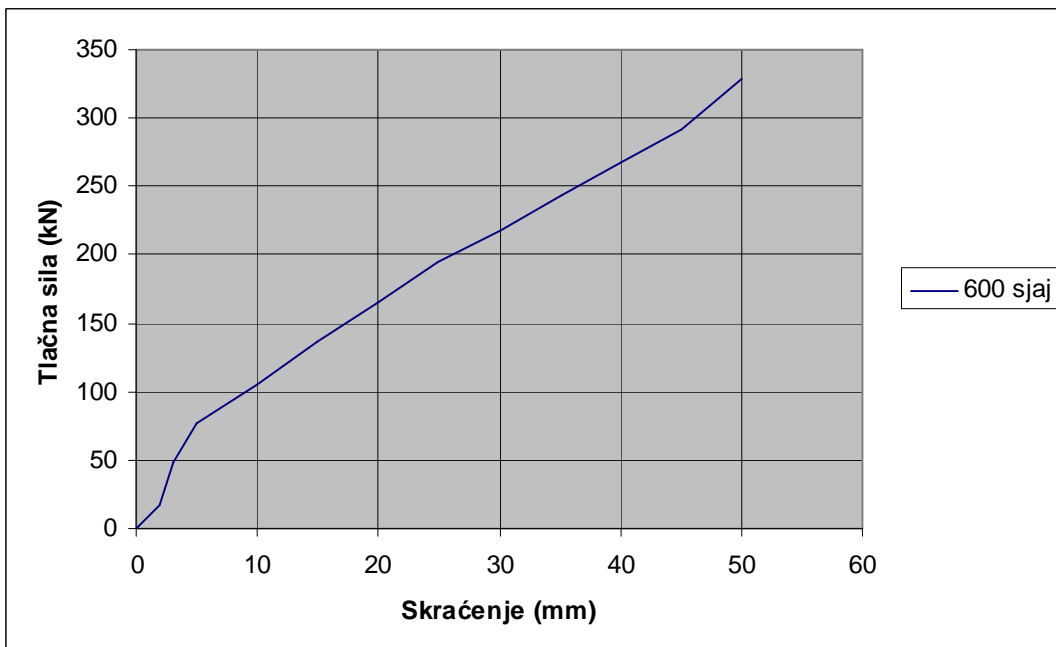


Slika 7.24. Dijagram srednje vrijednosti za kvadratne uzorke 470 sjaj





Slika 7.25. Dijagram tlačna sila – skraćenje za kvadratne uzorke 600 sjaj

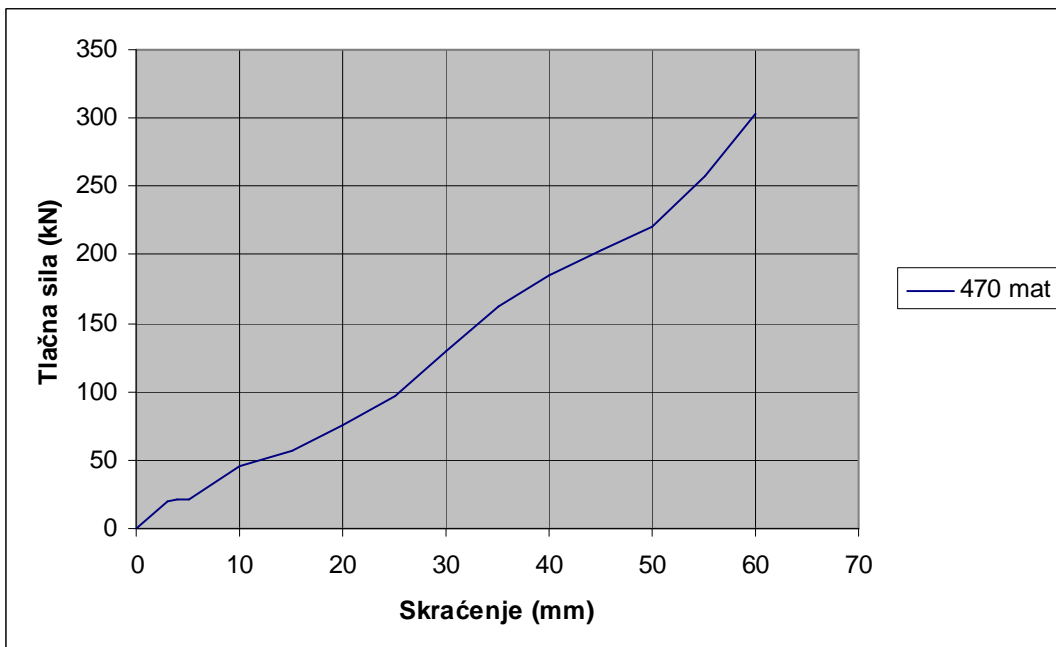


Slika 7.26. Dijagram srednje vrijednosti za kvadratne uzorke 600 sjaj

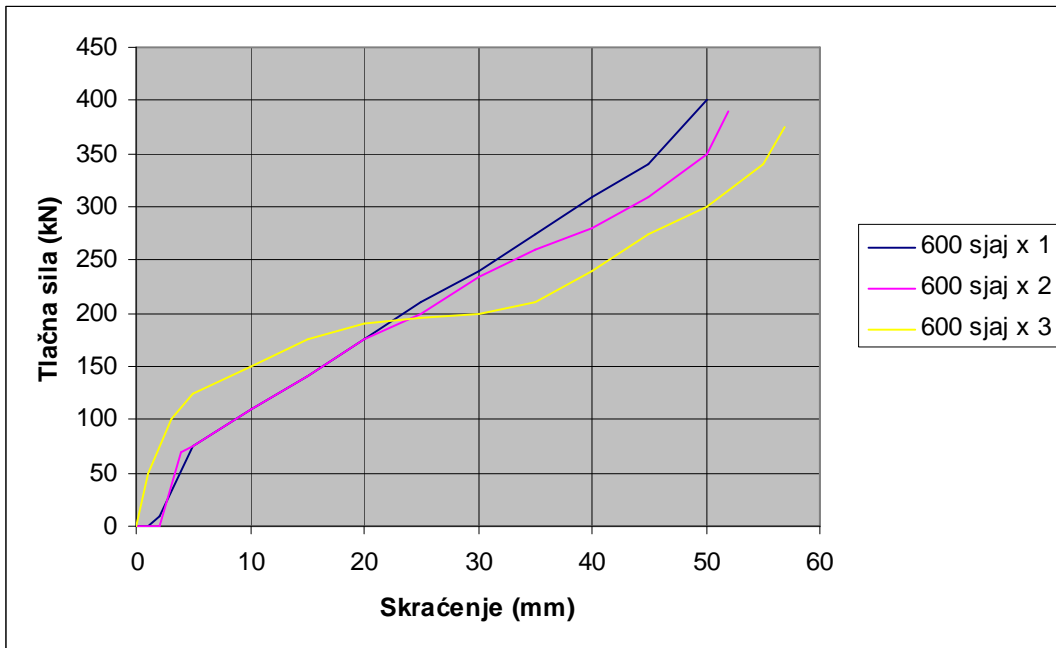
**CILINDRIČNI UZORCI :**



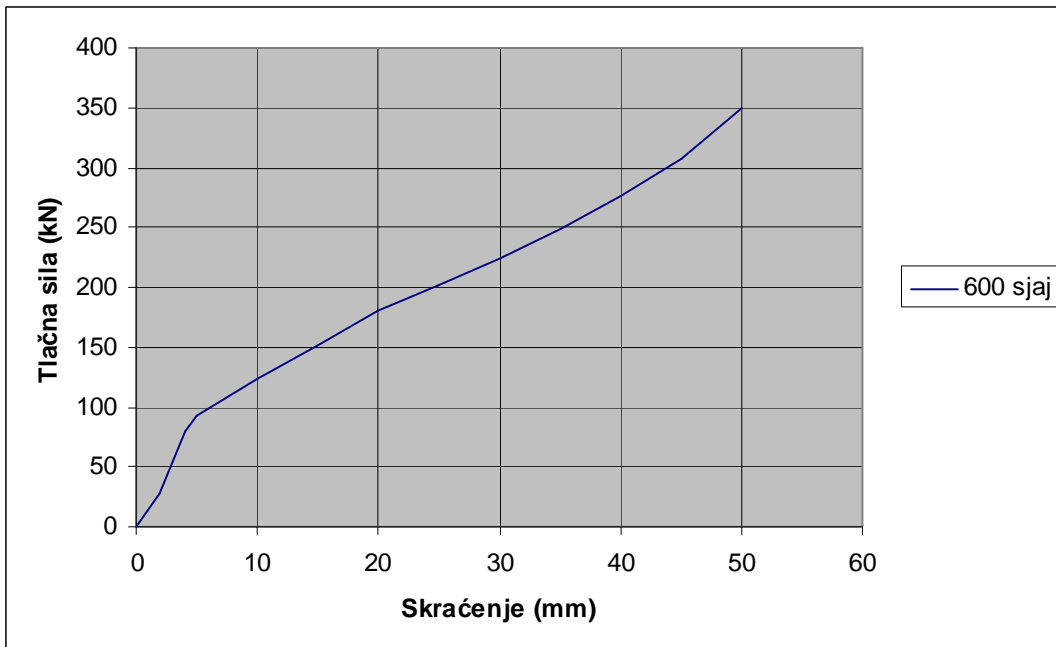
Slika 7.27. Dijagram tlačna sila – skraćenje za cilindrične uzorke 470 mat



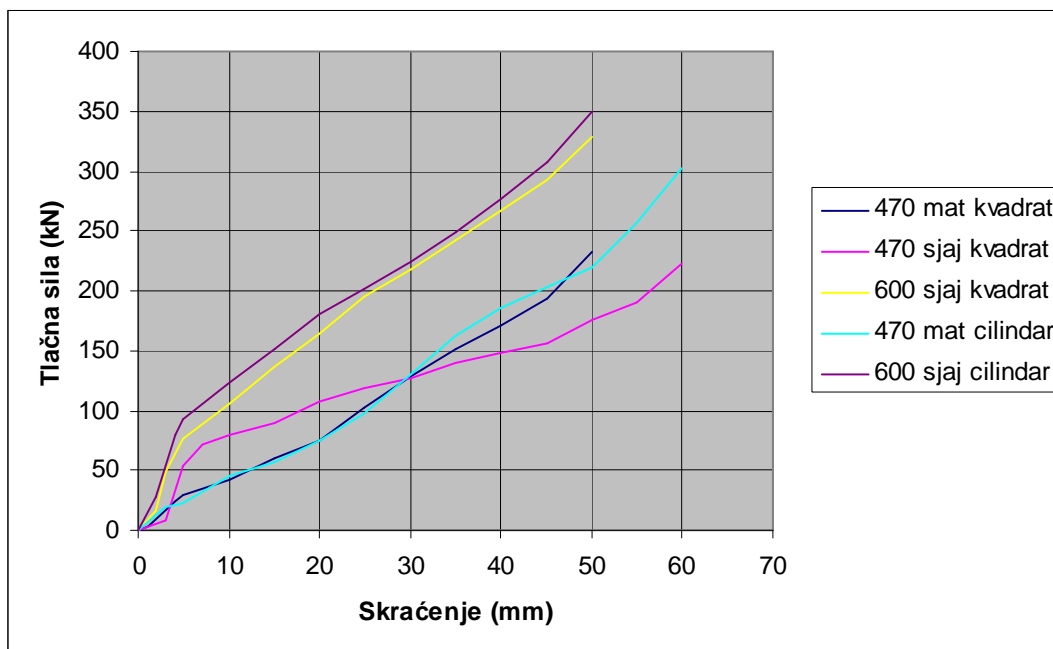
Slika 7.28. Dijagram srednje vrijednosti za cilindrične uzorke 470 mat



Slika 7.29. Dijagram tlačna sila – skraćenje za cilindrične uzorke 600 sjaj



Slika 7.30. Dijagram srednje vrijednosti za cilindrične uzorke 600 sjaj



Slika 7.31. Dijagram srednjih vrijednosti svih ispitivanih uzoraka

Iz svih dobivenih dijagrama vidljivo je da niti jedan uzorak nema izraženo područje deformacije pri konstantnom tlaku, a smatra se da je idealan apsorpcijski materijal onaj koji se opterećen tlačnom silom tijekom cijelog procesa deformira uz konstantno naprezanje.

Usporedbom uzoraka 470 mat kvadrat i 470 mat cilindar (slika 7.31.) može se uočiti da se krivulje gotovo poklapaju, odnosno da nije bitno radi li se o kvadratu ili cilindru vrijednosti su približno iste. Iz toga se može zaključiti da oblik uzoraka nema utjecaja na vrijednosti dobivene ovim ispitivanjem. Do istog zaključka dolazi se i usporedbom uzoraka 600 sjaj kvadrat i 600 sjaj cilindar.

Granica stlačivanja  $R_{et}$  je najizraženija kod uzorka AlSi 10 TiH2 – 0,8 mase 470 grama (470 mat cilindar).

#### 7.4. Određivanje apsorpcije energije udara

Apsorbirana energija udara odgovara površini ispod krivulje eksperimentalno dobivenih dijagrama “tlačna sila – skraćenje“.

Kao što je objašnjeno u poglavlju 3.1.2. apsorbirana energija po jedinici volumena može se izračunati izrazom :

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

gdje je :  $\sigma$  – tlačno naprezanje;  $\varepsilon$  – deformacija

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

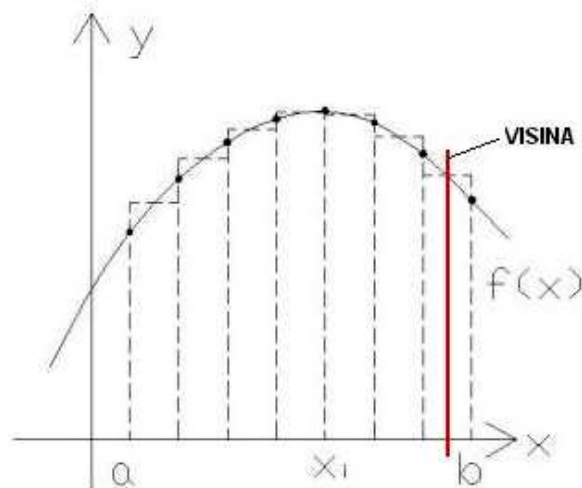
Numeričko integriranje je inženjerska numerička metoda koja se primjenjuje za izračunavanje integrala koji nije elementarno rješiv. Postoji više metoda numeričkog integriranja :

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

U ovom radu primjenjena je pravokutna metoda.

**Pravokutna metoda :**

Površina ispod krivulje podijeli se na pravilne dijelove u obliku pravokutnika (vidi sliku 7.32.) i to na slijedeći način. Prvo se na osi apscisa ( $x$  – os) nanese donje baze pravokutnika, što je podjela sitnija i aproksimacija će biti bolja, a zatim se iz sredine tih baza povuku visine. Na sjecištu visina i krivulje dijagrama povuku se gornje baze pravokutnika. Na kraju se izračuna površina svakog pojedinačnog pravokutnika, a zatim se te površine zbroje.



Slika 7.32. Pravokutna metoda numeričkog integriranja /33/

Matematički zapis pravokutne metode :

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f\left(a + \left(i + \frac{1}{2}\right)h\right)$$

Na temelju prethodno objašnjene pravokutne metode i eksperimentalno dobivenih dijagrama "tlačna sila – skraćenje" (nalaze se u prilogu 9.1.) izračunata je apsorbirana energija udara svakog pojedinog uzorka, a vrijednosti su predočene u tablici 7. i 8.

**Tablica 7.** Apsorbirana energija udara za kvadratne uzorke

Naziv	470 MAT x 1	470 MAT x 2	470 MAT x 3	470 SJJ x 1	470 SJJ x 2	470 SJJ x 3	600 SJJ x 1	600 SJJ x 2	600 SJJ x 3
Dimenzije (mm)	76 x 76 x 100								
Materijal	ALULIGHT AISi 10 TiH <sub>2</sub> – 0,8			ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH <sub>2</sub> – 0,4					
Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	1,04	1,04	1,04
Apsorbirana energija udara (kJ)	4,88	4,92	5,35	7,55	7,35	7,87	10,18	10,95	10,81

**Tablica 8.** Apsorbirana energija udara za cilindrične uzorke

Naziv	470 MAT x 1	470 MAT x 2	470 MAT x 3	600 SJJ x 1	600 SJJ x 2	600 SJJ x 3
Dimenzije (mm)	Ø 84,9 x 100					
Materijal	ALULIGHT AISi 10 TiH <sub>2</sub> – 0,8			ALULIGHT AIMgSi 0,6 TiH <sub>2</sub> – 0,4		
Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	0,83	0,83	0,83	1,07	1,07	1,07
Apsorbirana energija udara (kJ)	5,55	5,23	5,92	10,35	9,85	9,73

Usporedbom podataka navedenih u tablicama 7 i 8 dolazi se do zaključka da pjene manje gustoće imaju manji kapacitet apsorpcije energije udara nego pjene veće gustoće.

Može se primjetiti da uzorci jednake gustoće i oblika, ali izrađeni od različitih materijala, pokazuju i različito ponašanje. Materijal ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH<sub>2</sub> – 0,4 pokazao se kao bolji apsorpcijski materijal nego ALULIGHT AlSi 10 TiH<sub>2</sub> – 0,8.

Usporedbom uzoraka izrađenih od iste vrste materijala i jednake gustoće dobivaju se približno iste vrijednosti bez obzira na oblik uzorka. To samo potvrđuje zaključak izveden iz dijagrama da oblik uzorka nema utjecaja na rezultate ispitivanja.



## 8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu ispitivana je apsorpcija energije udara aluminijskih pjena. Ispitane su dvije vrste aluminijskih pjena ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH<sub>2</sub> – 0,4 i ALULIGHT AlSi 10 TiH<sub>2</sub> – 0,8.

Prilikom statičkog – tlačnog pokusa niti jedan uzorak nije imao izraženo područje deformacije pri konstantnom tlaku. Rezultati su pokazali da povećanjem gustoće raste granica stlačivanja i kapacitet apsorpcijske energije. Ustanovljeno je da oblik uzoraka nema utjecaja na rezultate, a materijal ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH<sub>2</sub> – 0,4 pokazao se kao bolji apsorpcijski materijal nego ALULIGHT AlSi 10 TiH<sub>2</sub> – 0,8.

Na kraju može se zaključiti da su metalne pjene izuzetno zanimljiv i primjenjiv konstrukcijski i izolacijski materijal jer omogućuju vrlo dobru kombinaciju nekih kontradiktornih svojstava. Takva kombinacija nije moguća kod konvencionalnih materijala. Primjena je raznolika zahvaljujući dobrim svojstvima kao što su : mala masa (težina), visoka krutost (sendvič-konstrukcije), dobra zvučna i toplinska izolacijska svojstva, negorivost, odlična apsorpcija energije udara, itd. No, potrebno je naglasiti da osim ovih prednosti postoje i određeni problemi u kontroli i vođenju procesa proizvodnje, što može rezultirati proizvodima nepouzdanе kvalitete s nepredvidljivom strukturom (različiti oblik i veličina ćelija), a time i nepredvidljivim eksploatacijskim svojstvima. Također je potrebno voditi računa i o procesima završne obrade, zbog ćelijaste strukture, da ne dođe do oštećenja stijenki ćelija. Nedovoljno su poznate i provjerene metode konstrukcijskog oblikovanja i proračuna mehaničke otpornosti, posebno u uvjetima širenja pukotine.

Smatra se kako će za otprilike 5 godina ovaj materijal zauzimati značajno mjesto u velikoj većini tehničkih grana. Ispitivanja provedena u ovom diplomskom radu i dobiveni rezultati trebali bi poslužiti kao dobar poticaj za daljnje istraživanje.

## LITERATURA

- [1] Natural cellular materials, <http://web.mit.edu/dmse/csg/recent.html>
- [2] Nastupno predavanje : Gojko Marić, Zagreb, 2008.
- [3] W. Krach, T. Daxner, F.G. Rammerstorfer : Metallic Foams versus Human Bones, Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000.
- [4] [www.foodfordesign.blogspot.com](http://www.foodfordesign.blogspot.com)
- [5] [www.cymat.com](http://www.cymat.com)
- [6] T. Filetin, I. Kramer, G Marić: Metalne Pjene, Hrvatsko Društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [7] František Simančík : Aluminium Foam potential for ultra-lightweight structures , Institute of Materials & Machine Mechanics Slovak Academy of Sciences, Bratislava, January, 2004.
- [8] John Banhart : Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, Progress in Material Science 46 (2001) 559 – 632 , Pergamon.
- [9] [http://www.npl.co.uk/materials/metal\\_foams/applications.html](http://www.npl.co.uk/materials/metal_foams/applications.html)
- [10] D. Weaire, S. J. Cox, J. Banhart : Methods and models of metallic foam fabrication, Ann. Int. Conf. Composites Eng., 2001.
- [11] <http://www.spp-metallschaeume.uni-erlangen.de>
- [12] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley : Metal foams - a design guide, Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.
- [13] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- [14] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson : Compressive and tensile behaviour of aluminium foams, Materials Science and Engineering, 1999.
- [15] L.J. Gibson, M. F. Ashby : Cellular solids – structure and properties , Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

- [16] T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. G. Nieh, H. Higashi :  
Experimental study of energy absorption in a close – celled aluminium foam  
under dynamic loading, Scripta materialia, Vol.40, No. 8, p.921 – 927, 1999.
- [17] F. Simančik, H. P. Degischer, H. Worz : «Foamed aluminium – light structural and  
insulation material», Euromat 1995., Venice / Padua, Italy, 25. – 28. 09. 1995.
- [18] F. Simančik, W. Rajner, R. Laag : Reinforced alulight for structural use,  
Proceeding of the conference (TMS Annual Meeting), Seattle, 2002.
- [19] N. Sedliakova, F. Simančik, J. Kovačik, P. Minar : Joining of aluminium foams ,  
Proceeding of Symposium Metallschaume, Bremen, 1997.
- [20] F. Simančik, R. Florek : Reinforced aluminium foams – promising solution for  
lightweight load – bearing parts, Metfoam, 2005.
- [21] [www.spp-metallschaeume.uni-erlangen.de/Projects/Project CF4/project cf4.html](http://www.spp-metallschaeume.uni-erlangen.de/Projects/Project CF4/project cf4.html)
- [22] F. Simančik, J. Kovačik, N. Minarikova : Bending properties of foamed aluminium  
panels and sandwiches, MRS Symposium Proceedings, Warrendale,  
Pennsylvania, 1998.
- [23] [http://www.mat-net.hr/Metalne\\_pjene/primjena\\_metalnih\\_pjena.htm](http://www.mat-net.hr/Metalne_pjene/primjena_metalnih_pjena.htm)
- [24] F. Simančik : Metallic foams – ultra light materials for structural applications,  
Inżynieria materialowa, Nr.5 / 2001, 823 – 828
- [25] <http://people.bath.ac.uk/ab2jep/Jonny/Metal%20Foams/foamworkshop2c.pdf>
- [26] F. Simančik, F. Schoerghuber : Complex foamed aluminium parts as permanent  
cores in aluminium castings, MRS Symposium Proceedings, Warrendale,  
Pennsylvania, 1998.
- [27] <http://www.fibernide.com/foam.html>
- [28] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber : Aluminium foams for transport industry,  
Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research, PowderTechnology, Lesumer  
Heerstraße 36, 28717 Bremen, 1997 Germany.
- [29] [http://www.cymat.com/pdf/automotive\\_applications.pdf](http://www.cymat.com/pdf/automotive_applications.pdf)
- [30] [http://www.ies.org.sg/journal/past/v44i1/v44i1\\_9.pdf](http://www.ies.org.sg/journal/past/v44i1/v44i1_9.pdf)

- [31] I. W. Hall, M. Guden, C.J. Yu: Crushing of Aluminum closed cell Foams: Density and strain rate effects, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, USA, 2000.
- [32] F. Simančík, J. Kovačík, N. Minarikova: Deformation and Fracture Mechanism of Aluminium Foams, Institute of Materials and Machine Mechanics, Slovak Academy of Science, Slovakia.
- [33] [http://powerlab.fsb.hr/inm/numericko\\_integriranje.htm](http://powerlab.fsb.hr/inm/numericko_integriranje.htm)

## **9. PRILOG**

### **9.1. Dijagrami tlačna sila – skraćenje dobiveni statičkim tlačnim pokusom**