

Određivanje apsorpcije energije aluminijske pjene

Krapinec, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2010

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:235:115152>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zvonimir Krapinec

Zagreb, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ODREĐIVANJE APSORPCIJE ENERGIJE
ALUMINIJSKE PJENE**

Mentor

Doc.dr.sc. Krešimir Grilec

Zvonimir Krapinec

Zagreb, 2010.

SAŽETAK

Tema ovog rada je odrediti apsorpciju energije aluminijske pjene s obzirom na brzinu djelovanja nametnutog napreznja. Metalne pjene su relativno nova vrsta materijala, koje svojom ćelijastom građom oponašaju strukture koje često nalazimo u prirodi. Na početku rada se definira što je to porozni materijal i zašto je inženjerima posebno zanimljiv. Nabrajaju se poznate tehnologije proizvodnje metalnih pjena sa izlaznim vrijednostima: porozitet, promjer ćelije i dimenzije proizvoda. U daljnjem tekstu opisana su svojstva metalnih pjena, a posebno su obrađena mehanička svojstva metalnih pjena s naglaskom na tlačnu čvrstoću i sposobnost apsorpcije energije udara. Upravo to svojstvo, pored male mase, jedno je od najznačajnijih u inženjerskoj praksi.

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

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| POPIS SLIKA..... | II |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA..... | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. PROCES PJENJENJA..... | 3 |
| 3. NAČINI PROIZVODNJE..... | 4 |
| 3.1. Pjenjenje taline ubrizgavanjem plina (Hydro/Alcan)..... | 5 |
| 3.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini (Alporas)..... | 6 |
| 3.3. Eutektičko skrućivanje metal-plin (Gasar)..... | 7 |
| 3.4. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi (Foaminal/Alulight) .. | 8 |
| 3.5. Pjenjenje ingota koji sadrži ekspandirajući agens (Formgrip/Foamcast)..... | 9 |
| 4. OSOBINE I PRIMJENA..... | 11 |
| 4.1 Aluminijske metalne pjene..... | 13 |
| 5. MEHANIČKA SVOJSTVA METALNIH PJENA..... | 18 |
| 5.1. Tlačna čvrstoća..... | 20 |
| 5.2. Apsorpcija energije udara..... | 24 |
| 5.3. Krutost..... | 32 |
| 5.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju - umor..... | 33 |
| 5.5. Ponašanje pri puzanju..... | 34 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO..... | 37 |
| 6.1. Idejni projekt..... | 37 |
| 6.2. Izrada ispitnih uzoraka..... | 37 |
| 6.3. Ispitivanje uzoraka..... | 43 |
| 6.4. Teorijsko određivanje energije apsorpcije..... | 46 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 57 |
| 8. LITERATURA..... | 59 |
| 9. PRILOG..... | 60 |

POPIS SLIKA

| | | |
|------------|---|----|
| Slika 1.1. | Prirodni ćelijasti materijali..... | 3 |
| Slika 2.1. | Faze pjenjenja..... | 4 |
| Slika 3.1. | Postupci dobivanja metalnih pjena..... | 5 |
| Slika 3.2. | Postupak lijevanja pjene u Cymat kompaniji sastoji se od peći za topljenje(1), posude za čuvanje taline(2), posude za pjenjenje(3) i opreme za pjenjenje(4), te beskonačno duge trake(5)..... | 6 |
| Slika 3.3. | Proces nastajanja metalne pjene ALPORAS metodom..... | 7 |
| Slika 3.4. | Proces metalurgije praha za proizvodnju pjenastih metala..... | 9 |
| Slika 4.1. | Prikaz iznosa koeficijenta apsorpcije zvuka..... | 15 |
| Slika 4.2. | Prikaz mehanizma apsorpcije zvuka..... | 15 |
| Slika 4.3. | Prikaz zvučno-izolacijskog objekta (a) i dijagrama zvučnog pritiska u ovisnosti o udaljenosti od izvora i zida (b)..... | 16 |
| Slika 4.4. | Dijagramski prikaz učinkovitosti zaštite (os ordinata) o frekvencijskom rasponu (os apscisa)..... | 17 |
| Slika 4.5. | Dijagrami karakterističnih mehaničkih svojstava: (a) vlačno naprezanje - deformacija, (b) tlačno naprezanje – deformacija, (c) savojno naprezanje – deformacija..... | 18 |
| Slika 5.1. | Krivulja deformiranja za uzorke gustoće od 0,19 do 0,20 (a – 30mm, b – 60mm)..... | 21 |
| Slika 5.2. | Poprečni presjek uzoraka od metalne pjene gustoće oko 0,19 (a – 30mm, b – 60mm)..... | 21 |
| Slika 5.3. | Dijagram naprezanje – deformacija za pjene različitih veličina pora..... | 22 |
| Slika 5.4. | Prikaz tlačnog loma prilikom tlačenja nakon 2, 5 i 15s uzorka visine 60mm..... | 23 |
| Slika 5.5. | Raspored gustoće po poprečnim presjecima (60mm uzorak)..... | 23 |
| Slika 5.6. | Ovisnost srednje tlačne čvrstoće o gustoći za uzorke različitih visina: 30mm i 60 mm..... | 23 |
| Slika 5.7. | Ovisnost tlačne čvrstoće – σ_c o gustoći za uzorke različitih gustoća: a) 30mm, b) 60mm..... | 24 |
| Slika 5.8. | Rasipanje vrijednosti tlačne čvrstoće – $\Delta\sigma_c$ za visine: 30mm i 60mm..... | 24 |
| Slika 5.9. | (a) Izdvojeni tetrekaidekahedron i (b) idealni matematički tetrekaidekahedron..... | 26 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Slika 5.10. | 2-D ilustracija deformacije i efekta apsorpcije energije kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama..... | 27 |
| Slika 5.11. | Shematski dijagram naprezanje-deformacija idealnih metalnih pjena..... | 28 |
| Slika 5.12. | Linija naprezanje-deformacija za 7% nominalnu gustoću DUOCEL® pjene..... | 28 |
| Slika 5.13. | Dijagram naprezanje-deformacija otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) metalnih pjena..... | 29 |
| Slika 5.14. | Apsorpcija energije po jedinici volumena pri 25% deformaciji za dostupne komercijalne metalne pjene..... | 30 |
| Slika 5.15. | Prikaz vrijednosti tlačne čvrstoće u ovisnosti o gustoći za komercijalne metalne pjene..... | 30 |
| Slika 5.16. | Prikaz specifične krutosti u ovisnosti o specifičnoj čvrstoći za komercijalno dostupne metalne pjene..... | 31 |
| Slika 5.17. | Simulacija deformacije aluminijskih pjena različitih veličina sekundarnih ćelija..... | 33 |
| Slika 5.18. | Prikaz ovisnosti umora pri maksimalnom broju ciklusa o relativnoj gustoći nekih Al-pjena..... | 35 |
| Slika 5.19. | Prikaz dužinske deformacija pri puzanju u ovisnosti o vremenu za Al-pjene otvorenih ćelija kod (a) vlačnog i (b) tlačnog opterećenja..... | 36 |
| Slika 5.20. | a) Lom Al-pjene otvorenih ćelija uzrokovan vlačnim opterećenjem b) Pojasno zadebljanje zbog tlačnog opterećenja c) Pojasno zadebljanje zbog tlačnog opterećenja (uvećani prikaz)..... | 37 |
| Slika 6.1. | Izgled korištene elektrotoporne peći..... | 39 |
| Slika 6.2. | Tehničke karakteristike peći..... | 39 |
| Slika 6.3. | Oblik cijevi kvadratnog presjeka materijala Č.0631 korištene za kalup..... | 39 |
| Slika 6.4. | Prikaz rezanja prekursora škarama za metal..... | 40 |
| Slika 6.5. | Vaganje prekursora na definiranu masu uzoraka..... | 40 |
| Slika 6.6. | Prikaz zabrtvljenog kalupa ispunjenog prekursorima..... | 41 |
| Slika 6.7. | Nadziranje procesa pjenjenja u peći gdje se prati pojava izlaska kapljice tekućeg aluminija kroz otvor na gornjem dijelu kalupa..... | 41 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Slika 6.8. | Izgled kalupa neposredno prije vađenja iz peći..... | 42 |
| Slika 6.9. | Prikaz gašenja kalupa u vodi..... | 42 |
| Slika 6.10. | Uzorak u kalupu..... | 42 |
| Slika 6.11. | Izvađeni uzorak iz kalupa..... | 42 |
| Slika 6.12. | Prikaz izrađenih uzoraka s prikazanom masom u gramima (vrijednosti u zagradama zanemariti): | |
| | • 6 uzoraka mase 1200g, (prvi red uzoraka) | |
| | • 6 uzoraka mase 1430g, (drugi red uzoraka)..... | 43 |
| Slika 6.13. | Kidalica za statičko tlačno ispitivanje..... | 44 |
| Slika 6.14. | Prikaz uzorka na početku ispitivanja..... | 45 |
| Slika 6.15. | Nastanak pukotine pri naprezanju uvijek započinje u sloju najmanje gustoće..... | 45 |
| Slika 6.16. | Urušavanje ćelija pod utjecajem tlačne sile rezultira kontrakcijom visine uzorka..... | 45 |
| Slika 6.17. | Završetak ispitivanja je točka kod koje dolazi do potpunog sabijanja gdje sila počinje eksponencijalno rasti..... | 45 |
| Slika 6.18. | Prikaz aproksimiranog dijagrama statičkog tlačnog pokusa za 6 uzoraka dvaju različitih masa (1200g i 1430g) i brzine testiranja $v_6 = 6\text{mm/min}$ | 46 |
| Slika 6.19. | Prikaz aproksimiranog dijagrama statičkog tlačnog pokusa za 6 uzoraka dvaju različitih masa (1200g i 1430g) i brzine testiranja $v_{60} = 60\text{mm/min}$ | 46 |
| Slika 6.20. | Apsorbirana energija prikazana kao površina ispod krivulje: | |
| | a) u dijagramu SILA – SKRAĆENJE | |
| | b) u dijagramu NAPREZANJE – DEFORMACIJA..... | 47 |
| Slika 6.21. | Grafički prikaz aproksimacije gdje funkciju $f(x)$ (plava) aproksimiramo uz pomoć kvadratne funkcije $P(x)$ (crvena)..... | 48 |
| Slika 6.22. | Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1200MAT i brzinu ispitivanja $v_6 = 6\text{mm/min}$ | 51 |
| Slika 6.23. | Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1430MAT i brzinu ispitivanja $v_6 = 6\text{mm/min}$ | 52 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Slika 6.24. | Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1200MAT i brzinu ispitivanja $v_{60} = 60\text{mm/min}$ | 53 |
| Slika 6.25. | Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1430MAT i brzinu ispitivanja $v_{60} = 60\text{mm/min}$ | 54 |
| Slika 6.26. | Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za srednje krivulje svih skupina uzoraka..... | 56 |
| Slika 6.27. | Dijagram NAPREZANJE – DEFORMACIJA za srednje krivulje svih skupina uzoraka..... | 56 |
| Slika 6.28. | Histogramski prikaz srednje količine apsorbirane energije pri zadanim silama svih uzoraka..... | 57 |

POPIS TABLICA

| | | |
|--------------|---|----|
| Tablica 4.1. | Karakteristična svojstva, primjena i oblik proizvoda metalnih pjena..... | 13 |
| Tablica 5.1. | Mehanička svojstva metalnih pjena..... | 20 |
| Tablica 5.2. | Odnosi mehaničkih svojstava otvorenih i zatvorenih metalnih pjena. Vrijednosti s indeksom s odnose se na materijale pune gustoće..... | 32 |
| Tablica 6.1. | Uzorci aluminijskih pjena kvadratnog oblika..... | 43 |
| Tablica 6.2. | Raspored ispitivanja uzoraka različitim brzinama ispitivanja statičkog tlačnog pokusa..... | 44 |
| Tablica 6.3. | Analitički prikaz podataka vezan za prvu skupnu ispitnih uzoraka..... | 50 |
| Tablica 6.4. | Analitički prikaz podataka vezan za drugu skupnu ispitnih uzoraka..... | 51 |
| Tablica 6.5. | Analitički prikaz podataka vezan za treću skupnu ispitnih uzoraka..... | 52 |
| Tablica 6.6. | Analitički prikaz podataka vezan za četvrtu skupnu ispitnih uzoraka..... | 53 |
| Tablica 6.7. | Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti svih uzoraka..... | 55 |

POPIS OZNAKA

| | |
|-----------------|---|
| a | početna točka intervala |
| b | završna točka intervala |
| E | modul elastičnosti, GPa |
| E_f | modul savitljivosti, GPa |
| E_s | greška u promatranom intervalu |
| $f(x)$ | opća funkcija |
| F | sila, N |
| F_{a1} | sila početka značajne apsorpcije energije, N |
| F_{a2} | sila završetka značajne apsorpcije energije, N |
| G | modul smičnosti, GPa |
| H | tvrdoća |
| K_{IC} | lomna žilavost, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ |
| m | eksponent |
| m_1 | masa lakših uzoraka, g |
| m_2 | masa težih uzoraka, g |
| n | eksponent |
| $P(x)$ | funkcija polinoma 2. stupnja |
| Q | energija aktivacije za kinetičke procese |
| R | konstanta idealnog plina |
| R_d | dinamička izdržljivost, MPa |
| R_e | granica razvlačenja materijala, MPa |
| R_{et} | granica stlačivanja, MPa |
| R_m | tlačna čvrstoća, MPa |
| R_{mt} | vlačna čvrstoća, MPa |
| T | temperatura, K |
| T_m | temperatura taljenja, K |
| W | apsorbirana energija udara po jedinici volumena, MJ/mm^3 ili N/mm^2 |
| W_{100} | apsorbirana energija pri tlačnoj sili od 100kN |
| W_{150} | apsorbirana energija pri tlačnoj sili od 150kN |
| W_{200} | apsorbirana energija pri tlačnoj sili od 200kN |
| \bar{W}_{100} | srednja apsorbirana energija udara pri tlačnoj sili od 100kN |

| | |
|----------------------|--|
| \overline{W}_{150} | srednja apsorbirana energija udara pri tlačnoj sili od 150kN |
| \overline{W}_{200} | srednja apsorbirana energija udara pri tlačnoj sili od 200kN |
| v_1 | manja brzina ispitivanja, mm/min |
| v_2 | veća brzina ispitivanja, mm/min |

GRČKE OZNAKE

| | |
|--------------------------|--|
| δ | skraćenje, mm |
| ε | deformacija (%) |
| ε_0 | relativno skraćenje, mm/mm |
| ε_D | deformacija pri sabijanju, mm/mm |
| ε_f | vlačna duktilnost |
| η^c | faktor gubitka, % |
| ν | Poissonov faktor |
| ρ_1 | relativna gustoća lakših ispitnih uzoraka |
| ρ_2 | relativna gustoća težih ispitnih uzoraka |
| σ | naprezanje (N/mm ²) |
| σ_0 | referentno naprezanje |
| σ_c | tlačno naprezanje, MPa |
| $\Delta\sigma_c$ | razlika između najviše i najniže vrijednosti σ_c kod određene gustoće |
| σ_e | granica izdržljivosti, MPa |
| σ_{pl} | granica apsorpcijskog naprezanja, MPa |
| σ_t | tlačno naprezanje, MPa |
| σ_{tD} | donja granica apsorpcijskog naprezanja, MPa |
| $\overline{\sigma}_{tD}$ | donje srednje apsorpcijsko naprezanje, MPa |
| σ_{tG} | gornja granica apsorpcijskog naprezanja, MPa |
| $\overline{\sigma}_{tG}$ | gornje srednje apsorpcijsko naprezanje, MPa |

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.

Također, 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 kod ispitivanja uzoraka.

Na kraju koristim priliku da se zahvalim svim ostalim profesorima i kolegama koje sam imao čast upoznati tijekom studiranja na stručnoj pomoći, potpori i razumijevanju, a osobito na strpljenju.

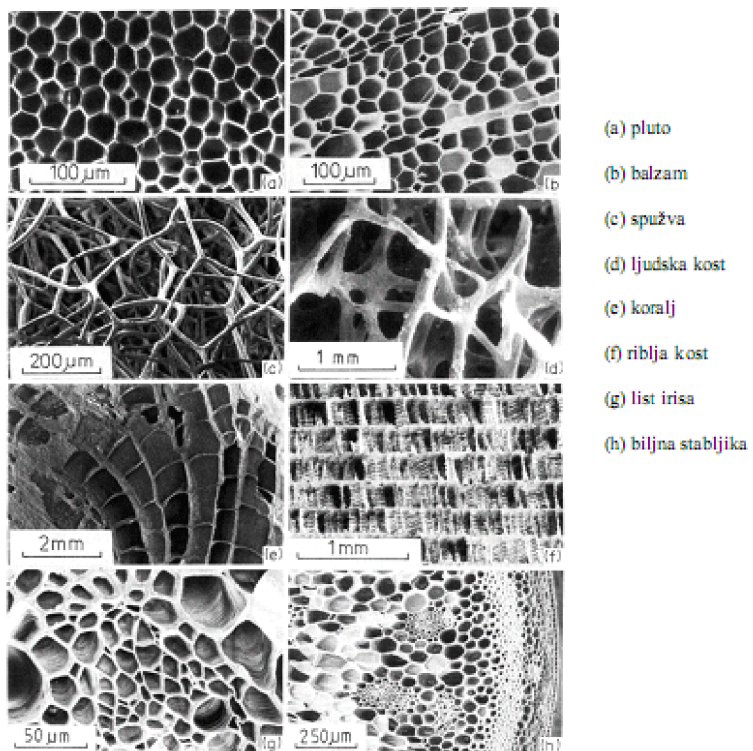
ZVONIMIR KRAPINEC

1. UVOD

Danas u svakodnevnom životu je široko rasprostranjena upotreba ćelijastih materijala i oni se koriste za, izolaciju, konstruiranje, za filtriranje i mnoge druge aplikacije. Za visoko porozne materijale je poznato da imaju visoku krutost kombiniranu s veoma niskom specifičnom težinom. To je razlog što se često materijali koji se nalaze u prirodi (npr. drvo i kosti) koriste kao konstrukcijski materijali. [1]

Činjenica da se čak i metali i metalne legure mogu proizvoditi kao čvrste ćelije ili metalne pjene nije tako dobro poznata kao mogućnost pjenjenja tradicionalnijih konstrukcijskih materijala kao što su polimeri, keramike ili staklo. Metalne pjene nude interesantnu perspektivu zbog kombinacije osobina koje su povezane s osobinama metala s jedne strane i poroznom strukturom s druge strane. U posljednjih 40 godina izvode se brojni pokušaji pjenjenja metala ili proizvodnje porozne metalne strukture, ali metode su trpjele zbog relativno visoke cijene i proizvodnje pjenastog materijala loše kvalitete. [2]

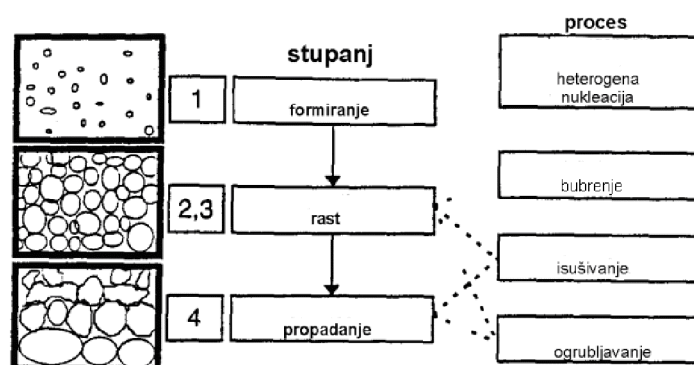
Zadnjih deset godina postoje poboljšanja tako da su danas na raspolaganju različite metode za proizvodnju metalnih pjena. Ne postoji jasna i općenito prihvaćena definicija za izraz "pjena". Prvo treba postaviti razliku između tekućih i čvrstih pjena. Tekuća pjena je fina disperzija plinskih mjehurića u tekućini. Hlađenjem tekuće pjene ispod točke taljenja osnovnog materijala dobije se tekuća pjena koja je potom, jasno, čvrsta pjena. U kontekstu metalnih pjena se općenito misli na čvrste metalne pjene. Upotreba riječi "čvrsta pjena" može se ograničiti na materijale koji su primarno bili u tekućem stanju. Međutim, uobičajeno je da se druge porozne strukture, kao što je sinterirani metalni prah, često također zovu "pjene", iako nikad nisu bile u tekućem stanju. Dakle često se proširuje upotreba riječi "pjena" na porozne metalne strukture koje u stvari nisu pjene, ali slične pjenama uzimajući u obzir njihovu visoku poroznost, unutarnju strukturu čvrstog materijala i njihovu nepravilnu strukturu. [3]



Slika 1.1. Prirodni ćelijasti materijali [2]

2. PROCES PJENJENJA

Proces pjenjenja je prilično kompliciran zato što u toku pjenjenja nema vremena za dostizanje termodinamičke ravnoteže. Pjena koja se širi je kompleksna smjesa plinova, tekuće i čvrste faze. Različiti stupnjevi evolucije pjene pokazani su na slici 2.1. Prvi stupanj je formiranje pora: iznad temperature rastvaranja agensa koji se ubacuje, plin koji se širi akumulira se u malim šupljinama u polaznom materijalu, pore se formiraju kako se polazni materijal širi. Ako se čvrsti polazni materijal pravi od kompaktiranog praha, uvijek će postojati dovoljan broj ostataka pora ili oksida koji mogu djelovati kao centri nukleacije. [4]



Slika 2.1 Faze pjenjenja [4]

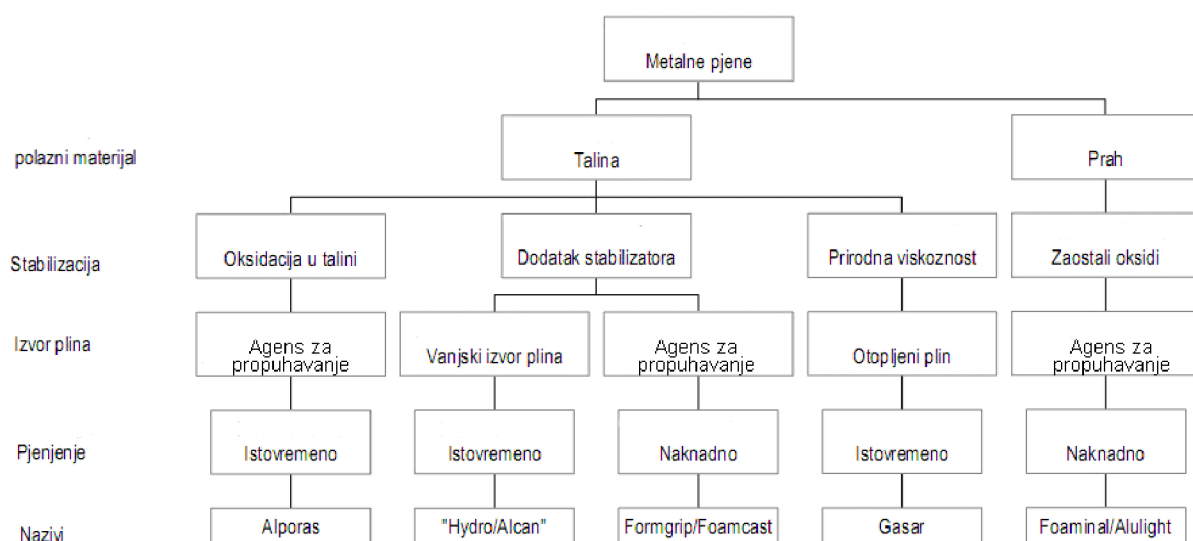
Daljnje povećanje temperature povećava pritisak plina i smanjuje čvrstoću metala, koja praktično nestaje na točki taljenja: rast pore počinje i pore se propagiraju plinom koji se širi. Rast možda nije izotropan zato što je tekstura u krutini nastala na osnovi prirode polaznog materijala. Tekuća pjena je nestabilna tako da proces pjenjenja završava s kolapsom i djelomičnim propadanjem strukture.

3. NAČINI PROIZVODNJE

Danas je poznato devet načina proizvodnje metalnih pjena od kojih je pet u komercijalnoj uporabi. Svi ti postupci se dijele u četiri osnovna:

- pjena se formira iz parne faze
- pjena se formira elektrotaloženjem iz tekuće otopine
- pjena se formira u rastaljenoj fazi
- pjena se formira u čvrstoj fazi. [3]

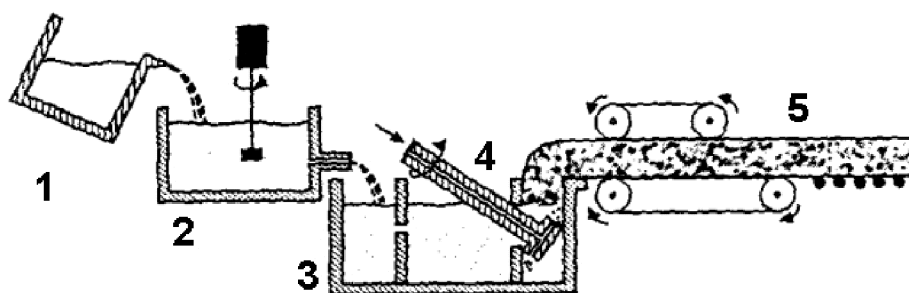
Svaka proizvodna metoda pokriva karakteristična područja gustoće, veličine ćelija i rasporeda ćelija. Postoje metode adekvatne za proizvodnju velikih ploča i blokova. Druge metode su pogodnije za proizvodnju pjenastih dijelova složenijeg oblika. Prikaz nekih metoda dobivanja metalnih pjena pokazuje slika 3.1. Između svih metoda postoje bar neke koje su jeftinije. Ovo je pogotovo istina za pjene koje su dobivene iz talina ili praha. Usprkos različitim metodama proizvodnje postoje samo dva različita načina da se oblikuje porozitet: samo-formiranjem ili predoblikovanjem. U prvom slučaju, poroznost se postiže spontanim procesom koji uključuje fizikalne principe. Metode gdje se poroznost ostvaruje pomoću mjehurića plina je samo-formiranje. U slučaju predoblikovanja, struktura koja se dobije je određena kalupom za oblikovanje ćelija. [4]



Slika 3.1. Postupci dobivanja metalnih pjena [4]

3.1. Pjenjenje taline ubrizgavanjem plina (Hydro/Alcan)

Prva metoda pjenjenja aluminija i legura aluminija primjenjuje se u Hydro Aluminium u Norveškoj i Cymat Aluminium Corporation u Kanadi. U skladu s ovim procesom, shematski opisanim na slici 3.2., čestice silicij-karbida, aluminij-oksida, ili magnezij-oksida se koriste da bi se povećao viskozitet taline. Stoga, prvi korak uključuje pripremanje taline aluminija koja sadrži jednu od ovih supstanci, čineći je kompozitom s metalnim matricom (MMC). Ovaj korak navodno zahtijeva složeniju tehniku miješanja da bi se osigurala jednolika distribucija čestica. Mogu se koristiti različite legure aluminija. Talina se pjeni u drugom koraku pri uvođenju plina (zraka, dušika, argona) unutar taline pomoću specijalno dizajniranih rotirajućih propelera ili vibrirajućih ubrizgivala. Oni stvaraju veoma fine mjehuriće plina u talini i distribuiraju ih jednoliko. [4]



Slika 3.2. Postupak lijevanja pjene u Cymat kompaniji sastoji se od peći za topljenje(1), posude za čuvanje taline(2), posude za pjenjenje(3) i opreme za pjenjenje(4), te beskonačno duge trake(5). [4]

Tako stvorena pjena izlazi na površinu pomoću konvejskih remena. Na taj se način dobivaju aluminijske pjene gustoće od 69 kg/m³ do 540 kg/m³, s porama promjera od 3 mm do 25 mm i debljinama stijenki 50 μm do 85 μm. Na veličinu ćelija se može utjecati protokom plina, brzinom ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača te ostalim parametrima. [3]

Zbog keramičkih čestica u talini, pjena je relativno stabilna. Ona se može skidati s površine (tj. beskrajnom trakom) i potom se hladi i skrućuje. Čvrsta pjena koja se dobije je, u principu, željene dužine, širine koliko to dozvoljava posuda koja sadrži rastaljeni metal, i obično debljine 10 cm. Dio čestica za ojačavanje se obično kreće od 10% do 20% gdje je srednja veličina čestice od 5mm do 20mm. Izbor

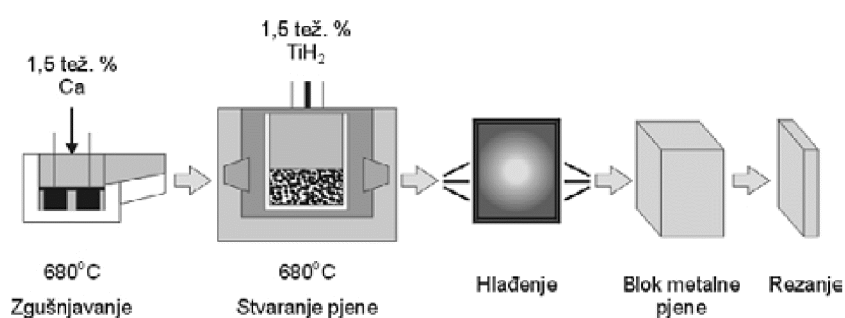
veličine čestice i sadržaj određuje se empirijski. Gustoća aluminijskih pjena proizvedenih na ovaj način iznosi od $0,069\text{g/cm}^3$ do $0,54\text{g/cm}^3$, srednja veličina čestice iznosi od 25mm do 3mm, i debljinom stijenke od $50\mu\text{m}$ do $85\mu\text{m}$.

Srednja veličina ćelije je obrnuto proporcionalna i sa srednjom debljinom zida ćelije i s gustoćom i može se regulirati protokom plina, brzinom propelera, frekvencijom vibriranja ubrizgavalica, i drugim parametrima.

Prednosti procesa direktnog pjenjenja su sposobnost kontinuirane proizvodnje velike količine pjene i postizanje niske gustoće. MMC pjene su, međutim, jeftinije od drugih ćelijskih metalnih materijala. Mogući nedostatak procesa direktnog pjenjenja je konačna potreba za rezanjem pjene, čime se otvaraju ćelije.

3.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini (Alporas)

Drugi način za direktno pjenjenje taline je dodavanje agensa koji se raspada u talini umjesto uvođenja plina. Toplina prouzrokuje razlaganje agensa koji se razlaže i oslobađanje plina, koji potom pokreće proces pjenjenja (slika 3.3.). [4]



Slika 3.3. Proces nastajanja metalne pjene ALPORAS metodom [4]

Shinko Wire Company, Amagasaki, Japan proizvodi pjene na ovaj način od 1986 godine sa s proizvodnjom od 1.000 kg na dan. U prvom koraku, oko 1,5 mase% kalcij metala se dodaje u talinu aluminija na 680°C . Talina se miješa nekoliko minuta, u toku kojih se njena viskoznost kontinuirano povećava do faktora pet zbog formiranja kalcij oksida (CaO), kalcij aluminij oksida (CaAl_2O_4), ili čak intermetalne faze Al_4Ca , koji zgušnjavaju tekući metal. Nakon što je viskoznost dostigla željenu

vrijednost dodaje se titan-hidrid (TiH_4), obično oko 1,6mase%, koji služi kao agens i koji treba osloboditi vodik u vreloj viskoznoj litini. Talina se potom počinje polako širiti i postepeno ispunjava posudu. Pjenjenje se odvija na konstantnom pritisku. Nakon hlađenja posude ispod točke topljenja legure, tekuća pjena prelazi u čvrstu aluminijsku pjenu i može se izvaditi iz kalupa za dalju obradu. Proces pjenjenja može trajati najmanje 15 minuta za tipičnu kupku ($2,050\text{ mm} \times 650\text{ mm} \times 450\text{ mm}^3$). Pjena dobivena na ovaj način pod imenom Alporas je izgledom najhomogenija aluminijska pjena koja se trenutno može dobiti. Empirijski odnos postoji ne samo između srednjeg promjera ćelije i viskoznosti taline nego i između konačne gustoće pjene i viskoznosti. Tipične gustoće nakon obrezivanja stranica lijevanog pjenastog bloka su između $0,18\text{ g/cm}^3$ i $0,24\text{ g/cm}^3$, sa srednjom veličinom pora koja se kreće od 2mm do 10mm. [3]

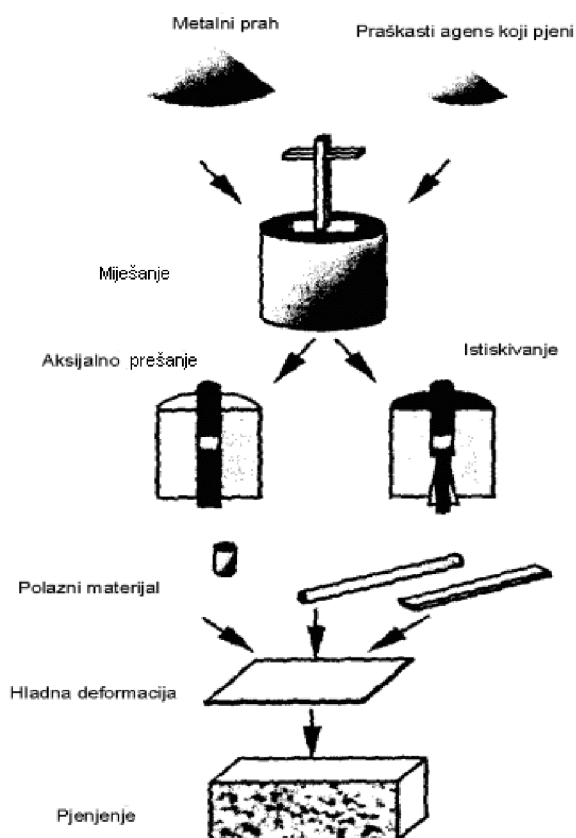
3.3. Eutektičko skrućivanje metal-plin (Gasar)

Metoda razvijena prije deset godina koristi činjenicu da neki tekući metali tvore eutektički sistem s vodikom. Ako se jedan od ovih metala topi u atmosferi vodika pod pritiskom (do 50 atmosfera), rezultat je homogena talina ispunjena vodikom.

Ako se temperatura snižava, talina će naposljetku doživjeti eutektičku pretvorbu do heterogenog dvofaznog sistema (metal+plin). Ako je sastav sistema dovoljno blizu eutektičke koncentracije, na određenoj temperaturi će se javiti reakcija segregacije. Kako talina skrućuje, pore plina precipitiraju i ostaju u metalu. Rezultirajuća morfologija pora je određena: sadržajem vodika, pritiskom preko taline, pravcem i brzinom odvođenja topline, te kemijskim sastavom taline. Općenito, formiraju se izdužene pore orijentirane u pravcu skrućivanja. Promjeri ćelija iznose od $10\mu\text{m}$ do 10mm , dužina pore od $100\mu\text{m}$ do 300mm , i porozitet od 5% do 75%. Raspodjela veličine pora nije jednolika zbog istovremenog rasta malih i velikih pora i sjedinjavanja. Pore mogu biti koničnog oblika ili čak valovite. Riječ „gasar“ se koristi zato jer upućuje na porozni materijal dobiven eutektičkim skrućivanjem metal-plin. Ona je ruski akronim koji znači „ojačan-plinom“. [4]

3.4. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi (Foaminal/Alulight)

Pjenasti metal također se može pripremiti iz metalnog praha. Proces proizvodnje počinje s miješanjem metalnih prahova, elementarnih metalnih prahova, legiranih metalnih prahova, ili mješavine metalnog praha s agensom koji uzrokuje pjenjenje, nakon čega se smjesa kompaktira do željene gustoće, polufinalnog proizvoda (slika 3.4). Kompaktiranje se postiže korištenjem bilo koje tehnike u kojoj se agens koji uzrokuje pjenjenje uvodi u metalnu matricu bez ikakvih zabilježenih ostataka otvorene poroznosti. Primjeri ovakvih metoda za kompakciju su jedno-osno ili izostatičko sabijanje, istiskivanje ili valjanje praha. Polazni materijal mora biti proizveden veoma pažljivo zbog ostataka poroznosti ili drugih defekata što će dovesti do slabijih rezultata u budućoj obradi. [4]



Slika 3.4. Proces metalurgije praha za proizvodnju pjenastih metala [4]

Slijedeći korak je termička obrada na temperaturama blizu točke taljenja osnovnog materijala. Agens koji se širi, koji je homogeno raspoređen unutar guste metalne matrice, razlaže se i oslobađa plin koji primorava polazni materijal da se širi, oblikujući visoko poroznu strukturu. Vrijeme potrebno za potpuno širenje zavisi od temperature i veličine polaznog materijala i kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Metoda nije ograničena na aluminij i njegove legure; kositar, cink, mjed, olovo, zlato i neki drugi metali i legure mogu se također pjeniti s odgovarajućim agensom i parametrima procesa.

Ako se komad polaznog materijala pjeni u peći, rezultat će biti komad metalne pjene s nedefiniranim oblikom bez ograničenja širenja. Dijelovi kompliciranog oblika mogu se proizvoditi uvođenjem pjene koja je u fazi širenja iz rezervoara unutar odgovarajućeg kalupa. Ovo je učinjeno smještanjem polaznog materijala unutar šupljeg kalupa i njegovim širenjem uslijed zagrijavanja, oblikuju se near-net shape komadi sa zatvorenom vanjskom površinom i jezgrom koje je visoko porozna. Metoda taljenja praškastog kompakta je u maloj mjeri komercijalna u njemačkim kompanijama Schunk (Giessen) i Honsel (Meschede) i Austrijskim kompanijama Alulight (Ranshofen) i Neuman Alufoam (Markt). Imena «Foam-in-Al» i «Alulight» su uzeta za ove pjene kao komercijalni nazivi. [3]

3.5. Pjenjenje ingota koji sadrži ekspandirajući agens (Formgrip/Foamcast)

Proces topljenja kompaktiranog praha je nedavno modificiran uvođenjem čestica titan hidrida unutar taline aluminija umjesto praha da bi se pripremio polazni materijal koji se može pjeniti. Da bi se izbjeglo prerano širenje vodika talina se mora ili brzo hladiti ispod njene točke tališta nakon miješanja ili se agens koji se širi mora pasivizirati da bi se onemogućila njegova ekspanzija prije skrućivanja. Prva tehnika, nazvana „Foamcast“ se izvodila na stroju za lijevanje u kokile, gdje se praškasti hidrid ubacivao unutar kalupa zajedno s talinom. [4]

Koristile su se obične legure za lijevanje kao što je A356 (AlSi₇Mg) bez keramičkih dodataka. Lijevani komad koji se dobiva ima punu gustoću i može se

peniti pretapanjem analogno metodi na bazi praha koja je prethodno opisana. Međutim, izaziva se homogena raspodjela TiH_2 praha u kalupu. Drugi spomenuti način zahtijeva da se TiH_2 prah podvrgava termičkom tretmanu tako tvoreći oksidnu površinu na svakoj čestici i odlaže razlaganje. Prah se potom dodaje u talinu i nakon miješanja može se hladiti relativno malim brzinama. Koriste se taline koje sadrže silicij karbide da bi se postigla stabilnost pjena. Na proces pjenjenja se može utjecati mijenjanjem brzina zagrijavanja i konačnim temperaturama pjenjenja, tako dozvoljavajući proizvodnju struktura s različitim porama. Proces se zove „Formgrip“, što je akronim za pjenjenje ojačanog metala uslijed oslobađanja plina u polaznom materijalu.

4. OSOBINE I PRIMJENA

Mehaničke i fizikalne osobine metalnih pjena su blisko povezane s njihovom ćelijastom strukturom (otvorenom ili zatvorenom) i relativnom gustoćom. I jedno i drugo jako zavise od postupka proizvodnje i proizvodnih parametara. Važno je napomenuti da specifične mehaničke i fizikalne osobine ćelijastih, tj. poroznih metala su uvijek lošije u usporedbi s osobinama njima pripadajućih materijala pune gustoće. To vrijedi za module elastičnosti, čvrstoću i sposobnost apsorpcije energije. Zbog toga upotreba ćelijastih materijala može biti jedino efikasna ako se koriste određene konstrukcijske osobine. Najočiglednija osobina koja je rezultat ćelijaste strukture je mala masa. [3]

Slijedeći efekt ćelija je povećanje momenta inercije zbog odvojenih masa. Kao rezultat ćelijaste strukture vidi se visoka specifična krutost vezivanja i čvrstoća koje se mogu dalje poboljšati konstrukcijom sendviča gdje su dvije guste površine odvojene pjenastim jezgrom. Suprotno materijalima pune gustoće, ćelijasti materijali mijenjaju svoju gustoću kad se deformiraju. Što je deformacija duže elastična to je homogenije raspoređena. Režim plastičnosti se opisuje uzastopnim propadanjem ćelija koje se nalaze vezane u nizu. Dokle god postoje preostale primarne ćelije naprezanje ostaje na niskom ili približno konstantnom nivou. [4]

Ovo ponašanje dozvoljava apsorpciju energije na niskom nivou opterećenja. Ćelijaste strukture mogu također pomoći apsorpciji energije zvuka. Jedan važan mehanizam rasipanja za generiranu energiju u zvučnom valu su gubici trenja kad plin prolazi od jedne do druge ćelije. Odnosno, da bi bili dobri za apsorpciju zvuka, ćelije moraju biti povezane jedna s drugom. Ćelijaste strukture također se mogu koristiti za toplinsku regulaciju. S jedne strane ćelijasta konstrukcija vodi veoma niskoj termičkoj vodljivosti koja se može iskoristiti za toplinsku izolaciju. S druge strane visoka termička vodljivost materijala ćelijastog zida u kombinaciji s velikom unutrašnjom površinom je idealna za izmjenjivače topline. Karakteristične osobine, primjena a i konačni oblik proizvoda prikazani su u Tablici 4.1.

Važno je naglasiti da najveći potencijal ćelijastih metala leži u njihovoj izvanrednoj kombinaciji svojstava, tj., skoro uvijek postoje bolja rješenja ako se misli samo na jednu osobinu. Ako mora biti zadovoljeno više od jedne osobine, apsorpcija zvuka i toplinska postojanost, ističe se prednost metalnih pjena.

Tablica 4.1. Karakteristična svojstva, primjena i oblik proizvoda metalnih pjena [4]

| Osobine | Primjena | Oblik proizvoda |
|---|--|--|
| -Visoka specifična krutost vezivanja i čvrstoća | -Krute i super lagane ploče za transport i arhitekturu | - Oblikovani dijelovi - Sendvič ploče -3D-oblikovane (sendvič) ploče |
| -Izotropna apsorpcija udarne energije na skoro konstantno niskom nivou naprezanja | -Apsorpcija udarne energije u automobilskim dijelovima - Pakirna ambalaža - Zaštita od eksplozivnog udara | -Oblikovani dijelovi -Velike ploče |
| -Dobra apsorpcija zvuka, elektromagnetska zaštita i prigušivanje vibracija | -Samopodržavajuće zidne ploče -Kućišta za elektronske uređaje -Obloge uređaja za apsorpciju zvuka -Zvučne izolacije duž željeznica i putova | -Velike ploče -Ploče u obliku sendviča |
| -Visoka toplinska stabilnost i niska toplinska provodnost | -Toplotne zaštite | -Velike ploče |
| -Dekorativne, ne zapaljive, otporne na vanjske utjecaje | -Namještaj -Zidne ploče | -Velike ploče -Oblikovani dijelovi |
| -Mala masa | -Zamjena za pješčane jezgre -Konstrukcije koje plove | -Dijelovi kompleksnog oblika s gustim površinskim dijelom |
| -Velika unutrašnja površina | -Kompaktni izmjenjivači topline -Katalizatori -Kriogenska primjena | -Dijelovi kompleksnog oblika s otvorenim porama |

Ćelijasti materijali nude veliki potencijal za industrijsku primjenu. Pored toga, osim cijene postoje brojna tehnička poboljšanja neophodna da bi se dobila šira upotreba. Jedna važna točka je homogenost. Ako je pjena nehomogena rasipanje mehaničkih svojstava je jako visoko. Posebno važan efekt nehomogenosti je drastičan pad sposobnosti apsorpcije energije.

Homogenost nije jednak problem za sve načine proizvodnje. Posebne metode bazirane na statističkom procesu samo-formiranja često podliježu lošoj homogenosti. Općenit izazov je činjenica da mehaničke osobine metalnih pjena veoma često ostaju daleko iza njihovih teoretskih mogućnosti. Mnogi defekti odgovorni za inferiorno izvođenje su već identificirani i poznat je način njihovog izbjegavanja. Mnoge aplikacije zahtijevaju da je ćelijasta struktura okružena gustim površinskim slojem da bi je učinilo pogodnom za visoko opterećene konstrukcijske komponente. [4]

4.1 Aluminijske metalne pjene

- **ŠTO JE ALPORAS?**

ALPORAS je trgovački naziv za metalnu pjenu na bazi aluminijske koja posjeduje veoma malu masu čija porozna struktura sadrži zatvorene ćelije tankih stjenki. Kyushu Industrial Science and Technology Laboratories rade na toj vrsti materijala već mnogo godina te su u današnje vrijeme uspješniji u praktičnoj proizvodnji. Osim što ALPORAS posjeduje malu masu, pokazuje i ostala zanimljiva svojstva.

- **SVOJSTVA ALPORASA**

ALPORAS je zapravo nakupina ćelija koje su međusobno odvojene tankim aluminijskim membranama. Svaka ćelija ima oblik polihedrona, što je struktura koja osigurava najbolju trodimenzijsku stabilnost. [5]

1. NISKA MASA

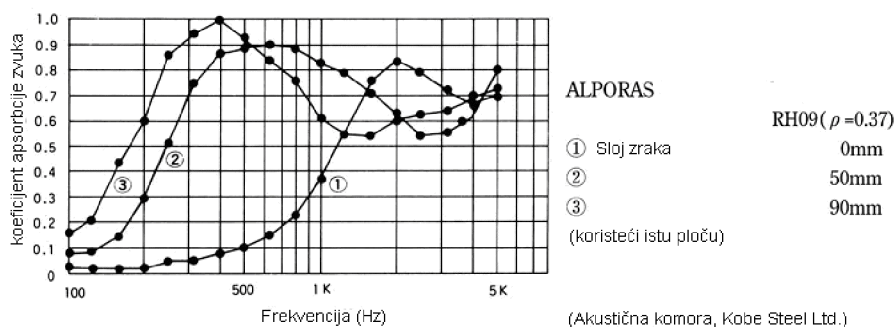
Specifična težina ALPORAS metalne pjene iznosi 1/10 težine aluminijske, 1/20 titana, 1/30 željeza, 1/5 polimera i 1/3 drveta.

2. IZVRSNA ZVUČNA IZOLACIJA

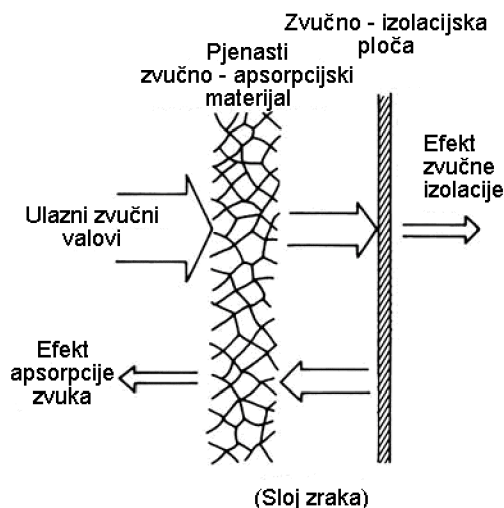
a) Svojstvo apsorpcije zvuka

Specijalnim procesima ALPORAS se može izvesti kao tijelo koje ima izvanredna apsorbirajuća svojstva. Energija zvuka, u sudaru s takvim tijelom, pretvara se u toplinsku energiju preko trenja s membranama ćelija. U usporedbi s drugim materijalima to svojstvo dolazi do izražaja pri niskim frekvencijama, a mijenjanje

debljine zračnog sloja daje izvrsne apsorpcijske performanse u širokom frekvencijskom spektru, što pokazuju slika 4.1. i slika 4.2.



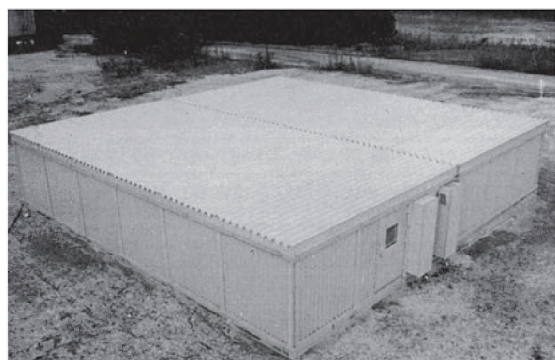
Slika 4.1. Prikaz iznosa koeficijenta apsorpcije zvuka. [5]



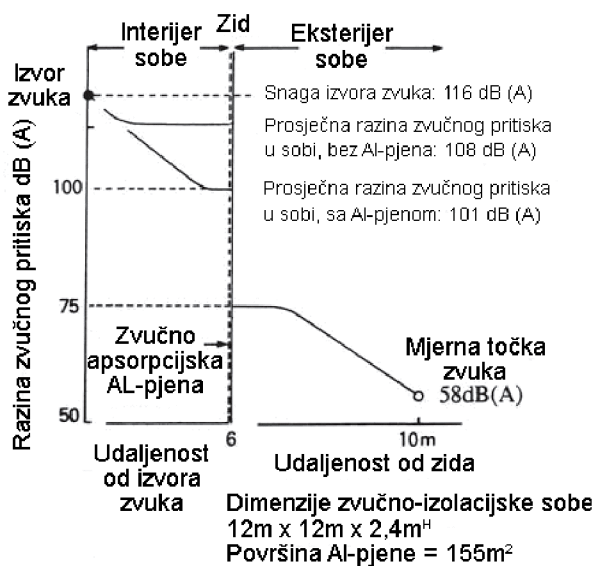
Slika 4.2. Prikaz mehanizma apsorpcije zvuka. [5]

b) Zvučno-izolacijska svojstva

Kada se materijal ALPORAS sa zvučno-apsorpcijskim svojstvima pričvrsti iza (na stranu gdje je izvor zvuka) metalne ploče ili drugog zvučno-izolacijskog materijala, u skladu s odgovarajućim zračnim slojem, smanjuje zvučni pritisak u sobi i pojačava učinkovitost zvučno-izolacijskog materijala, slika 4.3.



(a)



(b)

Slika 4.3. Prikaz zvučno-izolacijskog objekta (a) i dijagrama zvučnog pritiska u ovisnosti o udaljenosti od izvora i zida (b). [5]

c) Usporedba s ostalim zvučno-izolacijskim materijalima

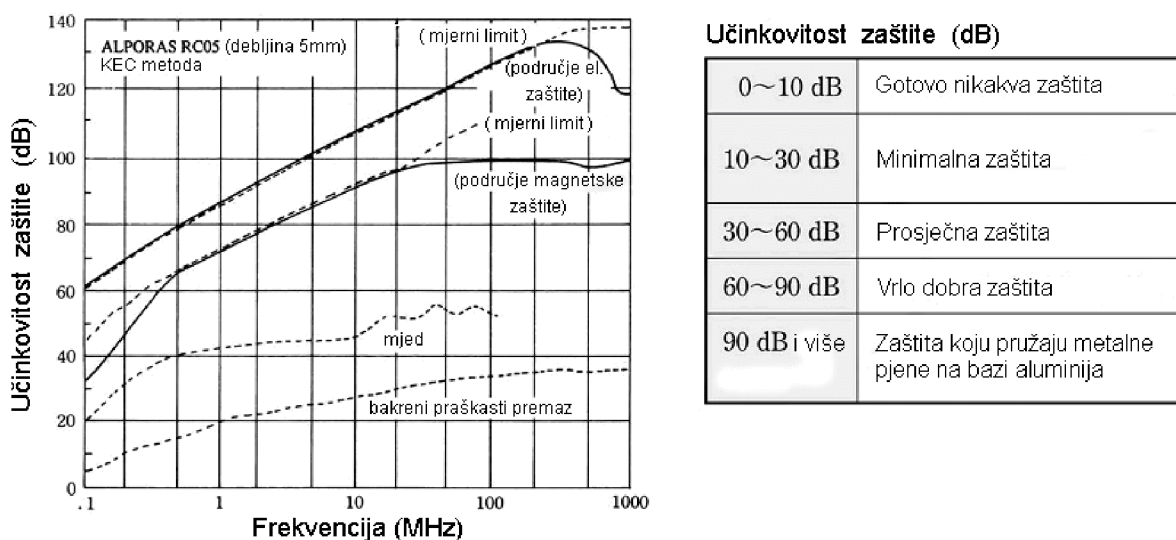
- Staklena vuna se naširoko koristi no pošto je načinjena od vlakana nije samostojeća i stoga zahtjeva upotrebu potpornih elemenata kao što su perforirane metalne ploče, a upravo je to prednost metalnih pjena jer one to ne zahtijevaju zbog svoje krutosti.
- Vlakna staklene vune mogu biti razbacana pod utjecajem vibracija ili naleta vjetra, a pri povišenim temperaturama postoji mogućnost da će se vezivo zapaliti, oslobađajući otrovne plinove.
- Zbog svoje vlaknaste strukture, staklena vuna brzo upija vlagu te u kombinaciji s prašinom više ne može biti vraćena u prvotno stanje, za razliku od metalne pjene.
- Metalne pjene je lako montirati zahvaljujući maloj masi.

3. TERMIČKA OTPORNOST

Pri temperaturama od 780°C ALPORAS metalne pjene neće izgubiti svoj oblik ukoliko nisu pod utjecajem nekog vanjskog naprezanja. Za razliku od polimera, ne ispuštaju otrovne plinove i dokazano su nezapaljive.

4. ZAŠTITA OD ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

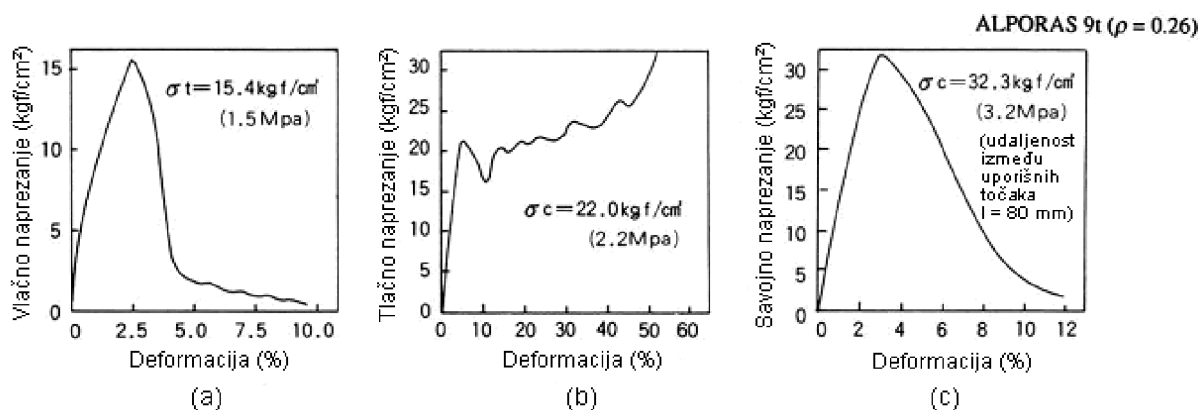
Postoje mnogi načini zaštite materijala od EM zračenja kao što su: prevlačenje cinkom, galvanizacija, punila koja imaju ulogu vodiča, itd. Na metalne pjene nije potrebno primijeniti takve zaštitne zahvate. Raspon zaštite od elektromagnetskog zračenja pokazuje slika 4.4.



Slika 4.4. Dijagramski prikaz učinkovitosti zaštite (os ordinata) o frekvencijskom rasponu (os apscisa). [5]

5. EFEKT PRIGUŠENJA ENERGIJE UDARA

Kada se metalne pjene podvrgnu tlačnom opterećenju i dođe do granice popuštanja, slojevi membrana ćelija se lome po redu počevši od gornjeg. Taj proces stvara ekstremno visoku sposobnost deformacije koja apsorbira iznenadna opterećenja. Mehanička svojstva metalnih pjena su veoma zanimljiva inženjerima, osobito svojstvo apsorpcije energije udara, slika 4.5. [5]



Slika 4.5. Dijagrami karakterističnih mehaničkih svojstava: (a) vlačno naprezanje - deformacija, (b) tlačno naprezanje – deformacija, (c) savojno naprezanje – deformacija. [5]

6. NISKA TERMIČKA VODLJIVOST

Pošto je metalna pjena građena od ćelija odvojenih aluminijskim membranama, termička vodljivost iznosi otprilike 1/60 aluminijske, niže nego bilo koji metal, a koeficijent termičke ekspanzije isti je kao i kod aluminijske.

7. JEDNOSTAVNA OBRADA

Metalne pjene ALPORAS lako je rezati, bušiti i zabijati čavle, savijati i deformirati te spajati kemijskim ljepilima.

8. BOJANJE

Metalne pjene se mogu bojati organskim i anorganskim bojama te to nema negativni utjecaj na postojeća svojstva.

9. SENDVIČ PANELI

Ako metalnu pjenu obložimo s dvije suprotne strane tankim ploham aluminijske, bakra, titana ili nekog drugog materijala dobivamo panel materijal male mase i zadovoljavajuće krutosti. Zahvaljujući njihovim toplinsko-izolacijskim svojstvima, postojanosti i obradivosti koriste se za razne primjene, od konstrukcijskih do strukturnih. [5]

5. MEHANIČKA SVOJSTVA METALNIH PJENA

Pri izboru materijala za neki proizvod konstruktoru su neophodni podaci o raznim svojstvima materijala. Na svojstva materijala utječu: građa (struktura), kemijski sastav te način izrade i obrade. Pripremanje uzorka za ispitivanje je vrlo bitno zbog dimenzija ispitnog uzorka i načina pripreme. Metalne pjene posjeduju vrlo nepravilnu tj. kaotičnu građu i zbog toga, prilikom istog načina ispitivanja, rezultati često variraju i za nekoliko desetaka postotnih iznosa što smanjuje kredibilitet metalne pjene u direktnoj primjeni. Zbog toga se ispitivanja metalnih pjena provode po mnogo strožim kriterijima nego kod materijala pune gustoće.

Mehanička svojstva osnovnog materijala i relativna gustoća ρ/ρ_s su dva ključna faktora kod opisivanja fizikalnih osobina metalne pjene, gdje je ρ gustoća pjene, a ρ_s gustoća materijala od kojeg je pjena napravljena. Raspon vrijednosti relativne gustoće kreće se od 0,005 (rijetke pjene) do 0,5 (guste pjene).

Najveća prednost metalnih pjena u odnosu na metale od kojih su dobivene je njihova vrlo mala masa što rezultira izradom izrazito lakih konstrukcija kojima se danas teži zato što se njima ostvaruju uštede u masi i druge prednosti. Svaka konstrukcija za vrijeme svog radnog vijeka je pod utjecajem statičkih i dinamičkih mehaničkih opterećenja, toplinskih opterećenja te ostalih naprezanja koja u krajnjem slučaju mogu dovesti do zatajenja konstrukcije ili čak i loma. Zbog toga je nužno što točnije odrediti mehanička svojstva metalnih pjena, kao što su, [3]:

- tlačna i vlačna čvrstoća
- modul elastičnosti i modul smičnosti
- dinamička izdržljivost
- tvrdoća
- otpornost na umor ili puzanje itd...

Građa metalne pjene je nepravilna, ćelije su često nepravilnog oblika, različite veličine, zidovi ćelija često su deformirani i/ili potrgani, porozitet veoma varira i sve to znatno umanjuje mehanička svojstva.

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

Tablica 5.1. Mehanička svojstva metalnih pjena. [3]

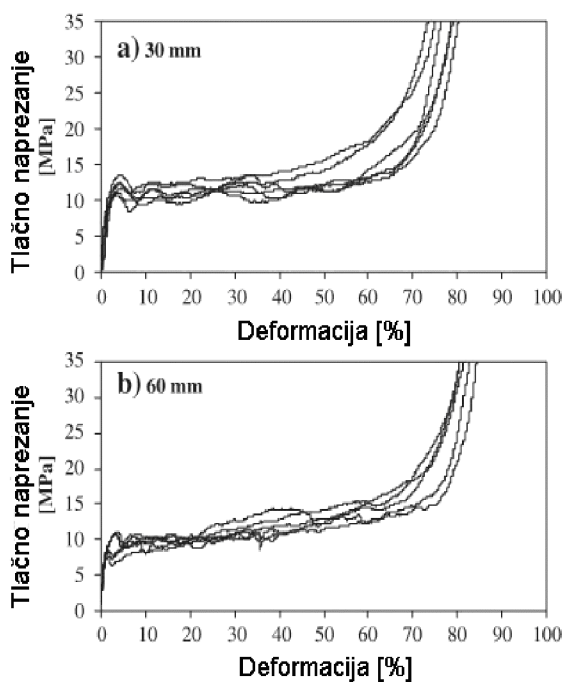
| SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA | MATERIJAL | | | | |
|---|------------------|----------------|---------------|-----------------|------------|
| | CYMAT Al-SiC | ALULIGHT Al | ALPORAS Al | ERG Al | INCO Ni |
| Relativna gustoća, ρ/ρ_s | 0,02-0,2 | 0,1-0,35 | 0,08-0,1 | 0,05-0,1 | 0,03-0,04 |
| Građa | Zatvorene ćelije | | | Otvorene ćelije | |
| Gustoća, ρ , kg/m ³ | 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_f , GPa | 0,03-3,3 | 1,7-12 | 0,9-1,2 | 0,06-0,3 | 0,4-1,0 |
| Poissonov faktor, ν | 0,31-0,34 | 0,31-0,34 | 0,31-0,34 | 0,31-0,34 | 0,31-0,34 |
| Tlačna čvrstoća, R_m , 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, ϵ_D | 0,6-0,9 | 0,4-0,8 | 0,7-0,82 | 0,8-0,9 | 0,9-0,94 |
| Vlačna duktilnost, ϵ_f | 0,01-0,02 | 0,002-0,04 | 0,01-0,06 | 0,1-0,2 | 0,03-0,1 |
| Faktor gubitka, η^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 ^{1/2} | 0,03-0,5 | 0,3-1,6 | 0,1-0,9 | 0,1-0,28 | 0,6-1,0 |

5.1. Tlačna čvrstoća

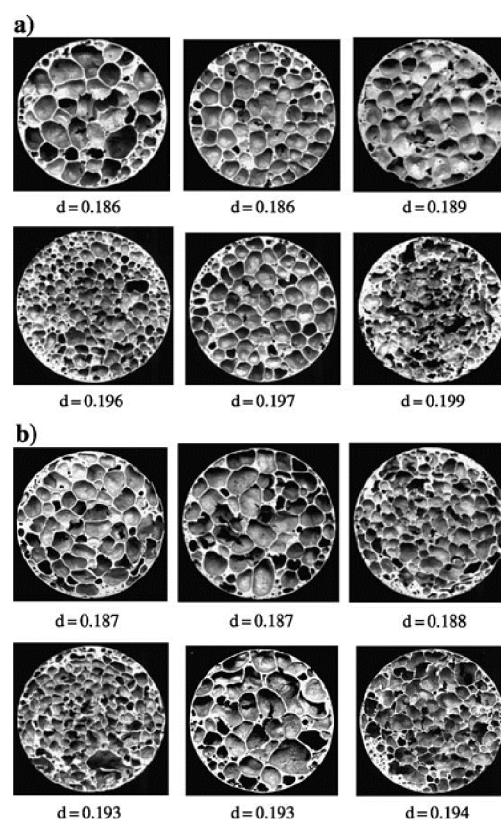
Ustanovljeno je da svojstva metalnih pjena (modul elastičnosti, termalna i električna vodljivost...) ovise o njihovoj relativnoj gustoći prema funkciji

$$K = K_0 \left(\frac{q}{q_0} \right)^m$$

gdje je K neko svojstvo i q je gustoća pjene, dok su K_0 i q_0 odgovarajuća svojstva neporoznog aluminijskog materijala uz kretanje iznosa eksponenta m od 1,5 – 1,7. Izgled krivulja tlačne deformacije za uzorke relativne gustoće oko 0,19 prikazan je na slici 5.1., a izgled presjeka metalne pjene nazivne gustoće prikazan je na slici 5.2. [6]



Slika 5.1. Krivulja deformiranja za uzorke gustoće od 0,19 do 0,20 (a – 30mm, b – 60mm). [6]



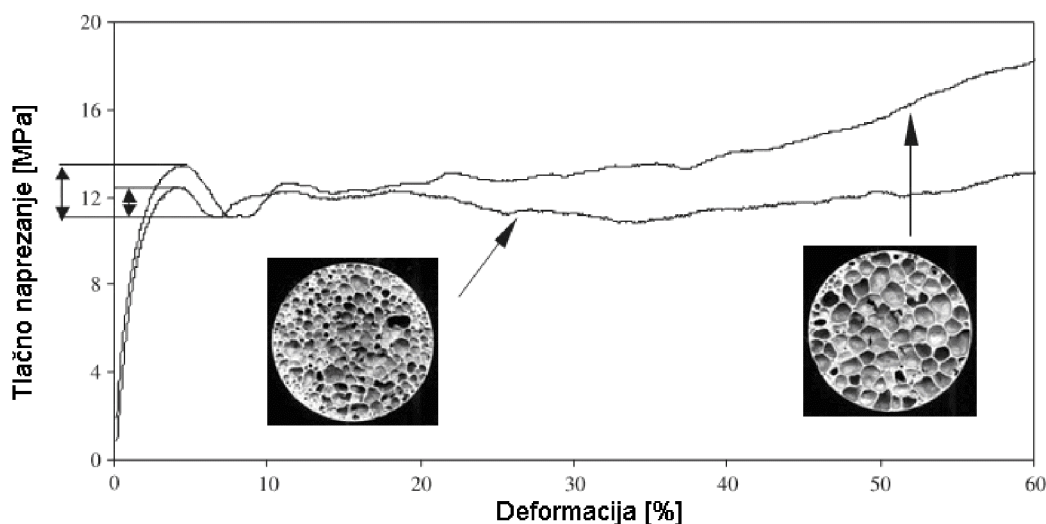
Slika 5.2. Poprečni presjek uzoraka od metalne pjene gustoće oko 0,19 (a – 30mm, b – 60mm). [6]

Oblik krivulje je karakterističan za metalne pjene koji se dijeli u tri dijela:

- I. elasto – plastični dio do otprilike 1% deformacije, gdje se odvija djelomično reverzibilno deformiranje stijenki ćelija

- II. apsorbirajući dio, gdje je iznos naprezanja približno konstantan dok deformacija progresivno raste do otprilike 70%-tne vrijednosti zbog savijanja i loma stijenki ćelija
- III. dio ubrzanog povećanja naprezanja jer prestaje apsorpcija energije zbog potpunog urušavanja ćelija, nestaje porozitet i materijal poprima svojstva kao da je pune gustoće

Drugi dio krivulje je posebno zanimljiv jer se tu odvija apsorpcija energije. Naprezanje, nakon što postigne prvi maksimum, značajno pada i u literaturi se ta razlika između gornje i donje granice tečenja objašnjava pojavom propadanja jednog poroznog sloja, gdje veličina pore, tj. ćelije odgovara iznosu promjene deformacije na dijagramskom prikazu, što pobliže prikazuje slika 5.3. [6]

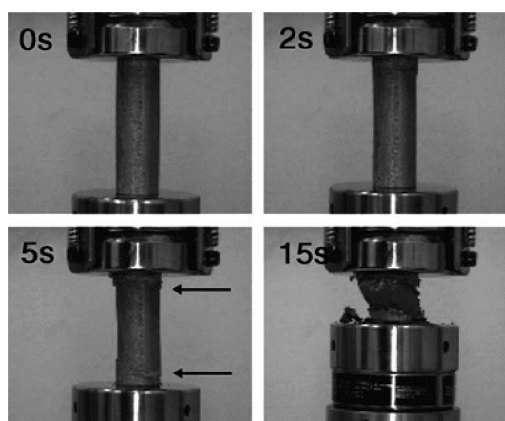


Slika 5.3. Dijagram naprezanje – deformacija za pjene različitih veličina pora. [6]

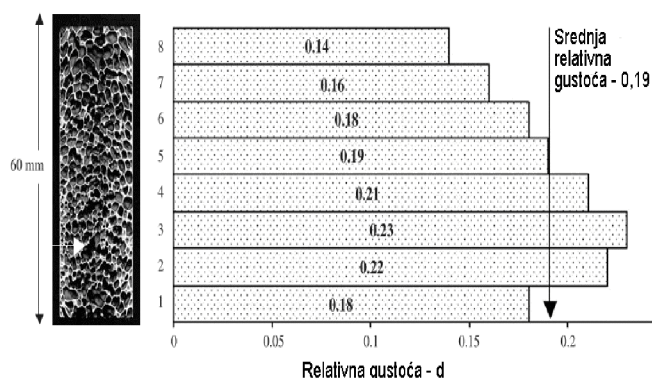
Odstupanje promjera ćelija za pjene sličnih gustoća može se primijetiti na slici 5.2. Režim deformacije, kao rezultat naglog i učestalog loma slojeva ćelija, daje neravan izgled krivulje naprezanje – deformacija. Kod uzoraka približne gustoće primjećuje se rasipanje vrijednosti tlačnog naprezanja – σ_c , što je posljedica same strukture pjene tj. njene nesavršenosti kao što su:

- područja snižene gustoće
- područja velikog poroziteta
- anizotropne strukture pora, itd...

Ipak, najvažniji utjecajni čimbenik tlačne čvrstoće je homogenost, točnije brojnost i veličina područja čija je gustoća manja od prosječne izmjerene vrijednosti za cijeli uzorak. Nejednolika raspodjela gustoće duž poprečnog presjeka uzorka prikazana je slikom 5.4., a primjer tlačnog loma uzorka prikazan je slikom 5.5. Za dotični uzorak zatajenje nastupa blizu gornje površine (najniža gustoća) i postepeno se razvija uzduž nastalih oštećenja, makar su razmještena unutar područja visoke gustoće. Na kraju deformacija zahvaća cijeli uzorak.

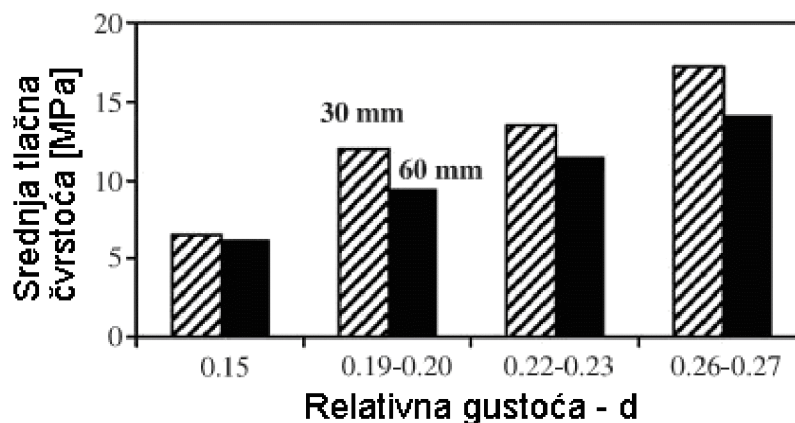


Slika 5.4. Prikaz tlačnog loma prilikom tlačenja nakon 2, 5 i 15s uzorka visine 60mm. [6]



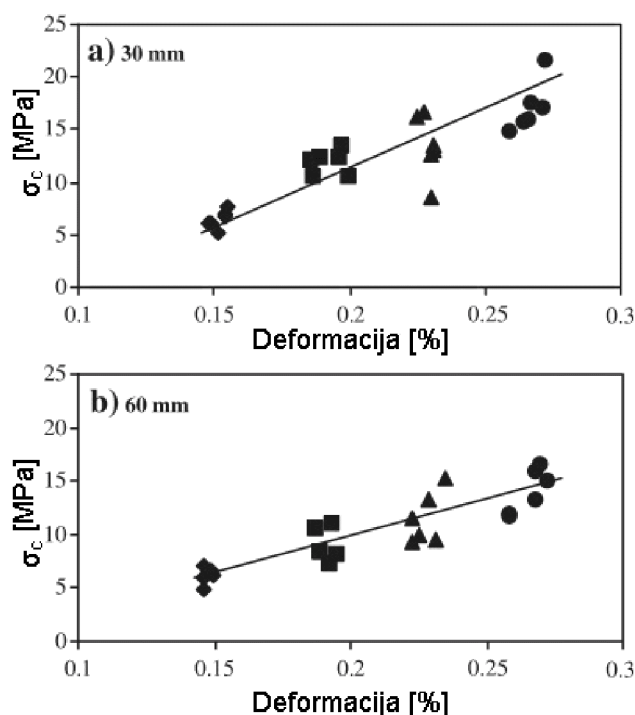
Slika 5.5. Raspored gustoće po poprečnim presjecima (60mm uzorak). [6]

Zanimljivo je promotriti utjecaj ponašanja deformacije s obzirom na veličinu uzorka jer je ustanovljeno da mehanička svojstva ovise o veličini uzorka, odnosno srednja vrijednost tlačne čvrstoće veća je kod kraćih uzoraka (slika 5.6).

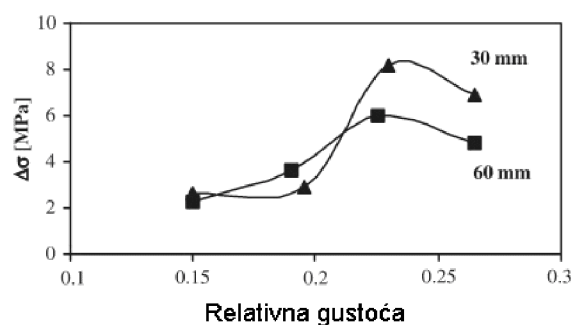


Slika 5.6. Ovisnost srednje tlačne čvrstoće o gustoći za uzorke različitih visina: 30mm i 60 mm. [6]

Smatra se da je to ponašanje povezano s povećanom vjerojatnosti pojave oslabljenih veza u dužim uzorcima (slika 5.5). Uzorci duljine 60mm pokazuju veći iznos deformacije, nego uzorci duljine 30mm, koji prelazi čak 70% (slika 5.1.) što je rezultat sklonosti dužih uzoraka izvijanju i u skladu s time manjim indeksom sabijanja pjene kod velikih deformacija, nego kod manjih uzoraka. Karakteristično za metalne pjene je to da je čvrstoća proporcionalna gustoći, no vrijednosti σ_c pokazuju određeno rasipanje koje se povećava kod viših iznosa gustoće i izraženije je kod kraćih uzoraka. Ovo je vidljivo na slici 5.8. gdje je $\Delta\sigma_c$ ($\Delta\sigma_c$ – razlika između najviše i najniže vrijednosti σ_c kod određene gustoće), a na slici 5.7. prikazana je ovisnost tlačne čvrstoće o gustoći.



Slika 5.7. Ovisnost tlačne čvrstoće – σ_c o gustoći za uzorke različitih gustoća: a) 30mm, b) 60mm. [6]



Slika 5.8. Rasipanje vrijednosti tlačne čvrstoće – $\Delta\sigma_c$ za visine: 30mm i 60mm. [6]

Kod kraćih uzoraka iznos $\Delta\sigma_c$ može dosezati čak i 8MPa za pojedinu gustoću, koje u nekim slučajevima dosiže 50% vrijednosti srednje tlačne čvrstoće. Objašnjenje te pojave leži u strukturnim nepravilnostima jer pucanje stijenki ćelija, a time i nastanak pukotine pri tlačnom naprezanju, uvijek započinje u predjelu najmanje gustoće ili gdje je najveći dio strukturnih nepravilnosti i ta se područja imenuju kao oslabljeni spojevi. Ta su područja nasumično razmještena unutar volumena pjene i

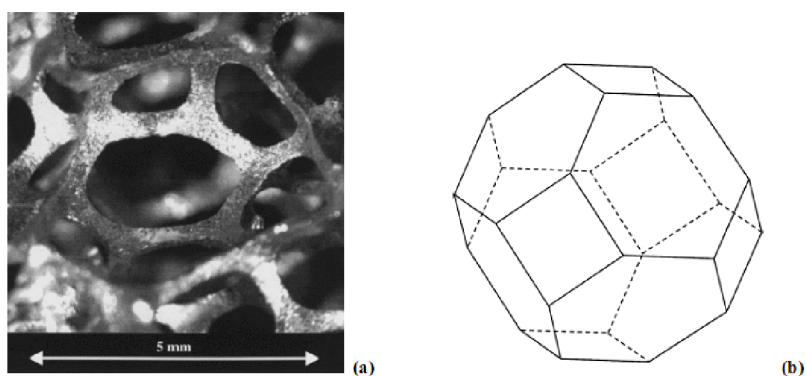
vjerojatnost njihovog pojavljivanja je veća u dužim uzorcima nego u kraćim. U skladu s tim može se slobodno pretpostaviti da će duži uzorci uvijek sadržavati neki oblik oslabljenog spoja koji će uzrokovati niski iznos naprezanja kod kojeg dolazi do urušavanja ćelija. Samim time srednja čvrstoća dužih uzoraka je manja i manje je rasipanje njene vrijednosti, dok s druge strane kraći uzorci mogu također sadržavati oslabljene spojeve ili ih uopće ne sadržavati.

Nizak iznos σ_c bit će kod dužih uzoraka, a kod kraćih uzoraka će biti visok što rezultira većim rasipanjem vrijednosti s time da vrijednost $\Delta\sigma_c$ ne ovisi samo o veličini uzorka, nego i o njegovoj gustoći te je značajno manja za niže gustoće. Nadalje, za gustoće niže od 0,21, $\Delta\sigma_c$ je sličan za obje veličine uzoraka, što se može objasniti zbog utjecaja vanjske metalne oplata koja ima važnu ulogu za pjene niskih gustoća te poništava efekt ostalih faktora. Drugi razlog je postojanje sloja minimalne gustoće, koji postoji kod uzoraka s najnižim iznosom gustoće i rijetko kod uzoraka visoke gustoće. Vjerojatnost njegovog stvaranja raste s dužinom uzorka. [6]

5.2. Apsorpcija energije udara

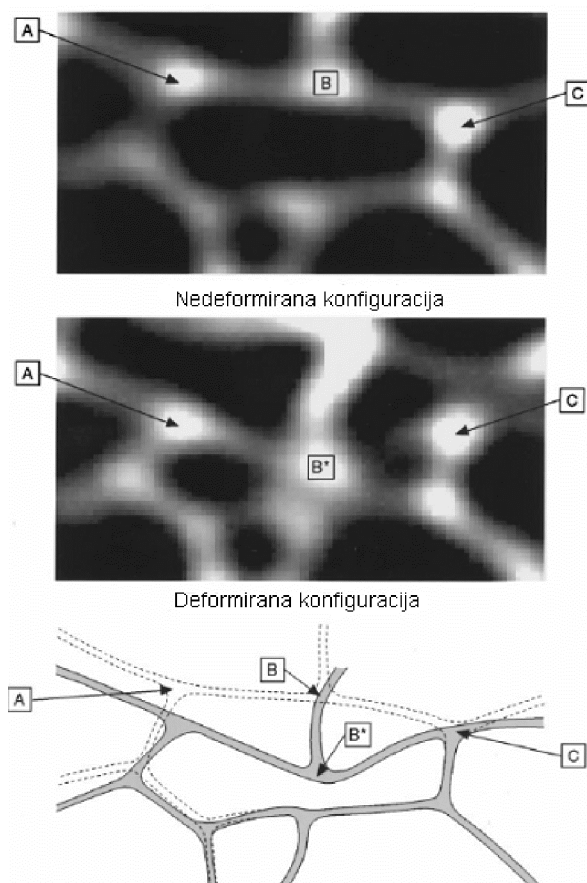
Način na koji su ćelije oblikovane u metalnim pjenama omogućava apsorpciju energije udara u svim smjerovima. Oblik ćelije približno je definiran matematičkim modelom poliedra tetrekaidekahedrona i to je čini neosjetljivom na smjer naprezanja, tj. izotropnom. Ta geometrija omogućava metalnim pjenama da apsorbiraju udarnu energiju iz bilo kojeg smjera i omogućava prijenos topline, toplinsku otpornost i protjecanje fluida također u svim smjerovima. Važno je naglasiti da se pjene s jednakom veličinom i periodičnom raspodjelom ćelija i porozitetom mogu idealizirano smatrati izotropnim; doduše prilikom obrade i proizvodnje, nepravilnosti se uvijek jave kod raspodjele ćelija te se ćelije same orijentiraju u određenom smjeru (obično je to smjer agensa za pjenjenje), povećava im se volumen i to rezultira nejednakim veličinama ćelija. [7]

Ćelija na slici 5.9.(a) izgleda izotropno, no pomnijim opažanjem vidi se da su ćelije malo posmaknute u određenom smjeru i nisu jednake veličine, stoga tvrditi da je ovaj uzorak izotropan bi bilo netočno. Taj mali posmak ćelije ne znači da se ovaj uzorak na makro-razini neće ponašati kao homogeno tijelo kad na njega djeluje mehaničko opterećenje.



Slika 5.9. (a) Izdvojeni tetreakaidekahedron i (b) idealni matematički tetreakaidekahedron. [7]

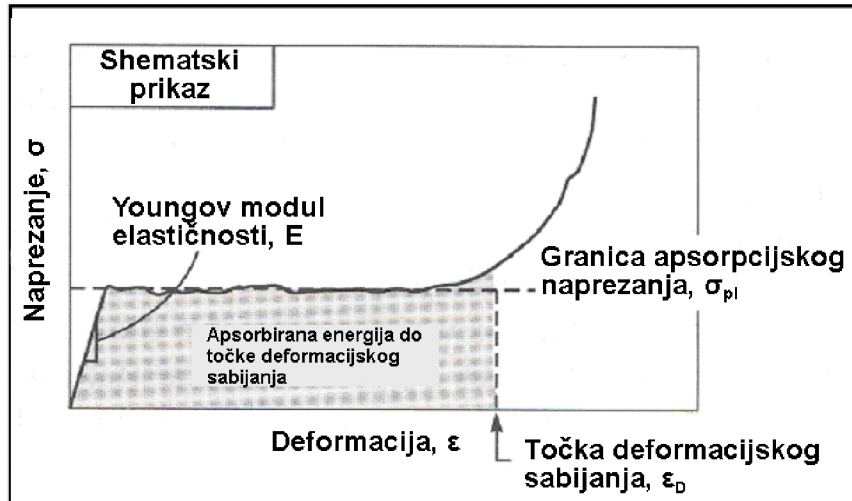
Aluminijske pjene su čvršće i kruće od polimernih pjena i mogu raditi na mnogo višim temperaturama. Za razliku od polimernih pjena, ne opadaju im svojstva tijekom vremena i ne ispuštaju štetne plinove tijekom raspada. Bolje razumijevanje kako metalne pjene apsorbiraju energiju prikazuje slika 5.10. gdje je i prikazana 2-D ilustracija kako se ćelije deformiraju pod opterećenjem. Ponašanje stjenke ćelije je slično ponašanju lisnate opruge pod opterećenjem. Kada je točka B pod opterećenjem, i ako je pjena u elastičnom području, točka B će se vratiti u početni položaj nakon apsorpcije energije opterećenja. Ako pjena ode u plastično područje to je isto ponašanje efekta apsorpcije energije, no dok točka B dođe u položaj B^* , ne samo da će se deformirati nego će i „upiti“ značajnu količinu energije. Treba imati na umu da prikaz na slici 7 je samo 2-D ilustracija, jer kako je prije spomenuto taj efekt apsorpcije se ostvaruje u svim smjerovima.



Slika 5.10. 2-D ilustracija deformacije i efekta apsorpcije energije kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama [7]

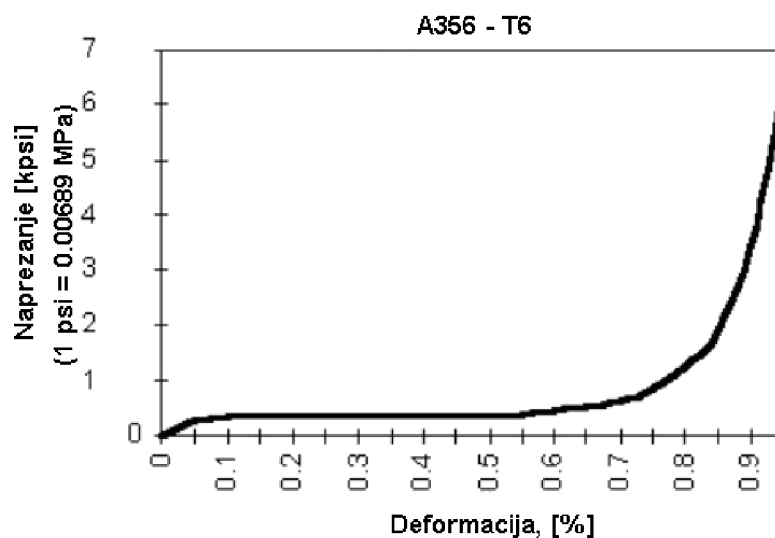
Relativna gustoća metalne pjene kao i njen porozitet su dva najvažnije faktora za apsorpciju energije. Relativna gustoća uvjetuje debljinu tzv. „ligamenta“ (spojnicu dvaju čvorova) ćelije jer što je on deblji to ćelija može apsorbirati veće količine energije i metalna pjena je čvršća. Pjene sa s većom gustoćom pora su otpornije na naprezanje, one sa s manjim veličinama pora sadrže više materijala i veću površinu zbog čega kad su izložene naprezanju ili sili apsorbiraju veće količine energije u usporedbi sa s pjenama koje imaju veće pore.

Slika 5.11. pokazuje shemu općeg ponašanja naprezanje - deformacija celularnog sustava. Prikazana točka deformacijskog sabijanja je granica nakon koje pjena prestaje apsorbirati energiju tj. to je točka gdje naprezanje prelazi granicu apsorpcijskog naprezanja, a površina ispod krivulje do točke deformacijskog sabijanja predstavlja apsorbiranu energiju. [7]



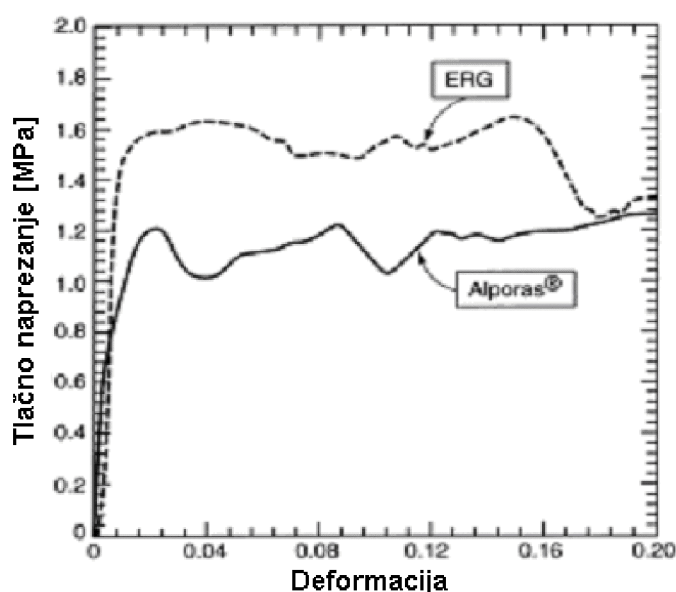
Slika 5.11. Shematski dijagram naprezanje-deformacija idealnih metalnih pjena. [7]

Ponašanje prikazano dijagramom može biti prilagođeno brojnim specifičnim zahtjevima primjene, mijenjanjem gustoće i legure pjene, dok njena izotropna svojstva pružaju jednak odgovor bez utjecaja na udarni kut. Visoki omjer čvrstoće i mase rezultira izvrsnim radnim osobinama i većoj smičnoj čvrstoći. Isti iznos naprezanja na krivulji naprezanje-deformacija proteže se na više od 50% deformacije i pjena može biti prethodno stlačena ukoliko se želi mijenjati točka popuštanja. Na slici 5.12. prikazana je krivulja naprezanje-istezanje za 7% nominalnu relativnu gustoću aluminijske legure A356-T6. Ispitni uzorak je prije testiranja tlačnim opterećenjem bio dimenzija 2,54cm x 2,54cm x 5,08cm (1"x1"x2").



Slika 5.12. Linija naprezanje-deformacija za 7% nominalnu gustoću DUOCEL® pjene. [7]

Za primjenu u konstrukcijama koriste se metalne pjene zatvorenih ćelija jer su kruće u usporedbi s pjenama otvorenih ćelija iste gustoće, ali ne treba nužno značiti da pjene zatvorenih ćelija apsorbiraju više energije pri većim iznosima opterećenja. Razlika između aluminijskih pjena s otvorenim ćelijama (ERG pjena) i zatvorenim ćelijama (ALPORAS® pjena) prikazana je na slici 5.13. Pošto površina ispod krivulje predstavlja količinu energije koju pjena apsorbira jasno se vidi da je pjena sa otvorenim ćelijama sposobna apsorbirati veće količine energije, ovo je nepromjenjivo do 20%-tne deformacije.

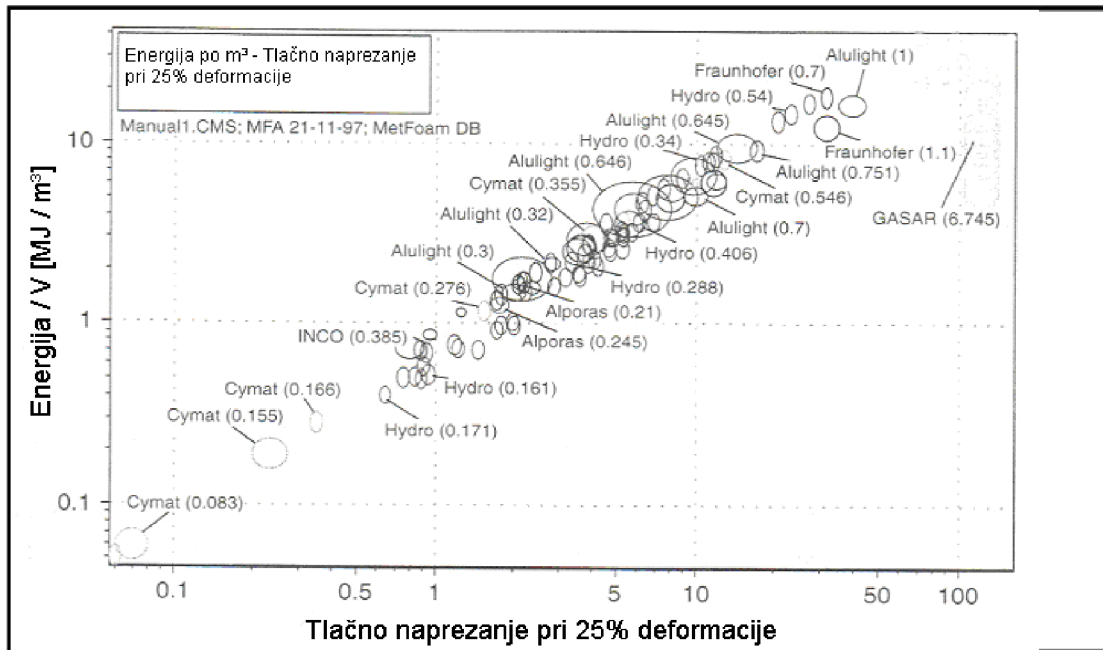


Slika 5.13. Dijagram naprezanje-deformacija otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) metalnih pjena. [7]

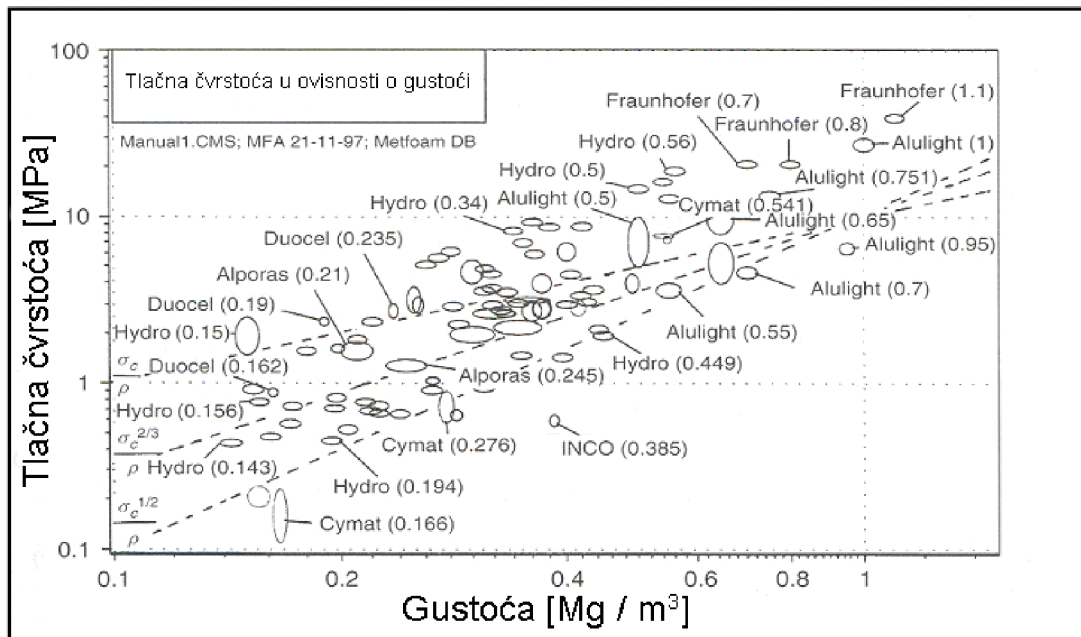
Promatrane oscilacije u obje krivulje predstavljaju lom stijenke ćelija, jer kako se one deformiraju i lome, tako apsorbiraju energiju što rezultira vertikalnim skokom krivulje. Razlog zbog kojeg nastupaju oscilacije je također povezano s pucanjem veza koje povezuju pjenu pod tlačnim opterećenjem, a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

To je velika prednost pjena otvorenih ćelija jer ih se može istovremeno koristiti i za nosive konstrukcije i za izmjenjivače topline. Objе vrste pjena obuhvaćaju široki spektar vrijednosti apsorpcije energije, krutosti i toplinske vodljivosti. Navedene

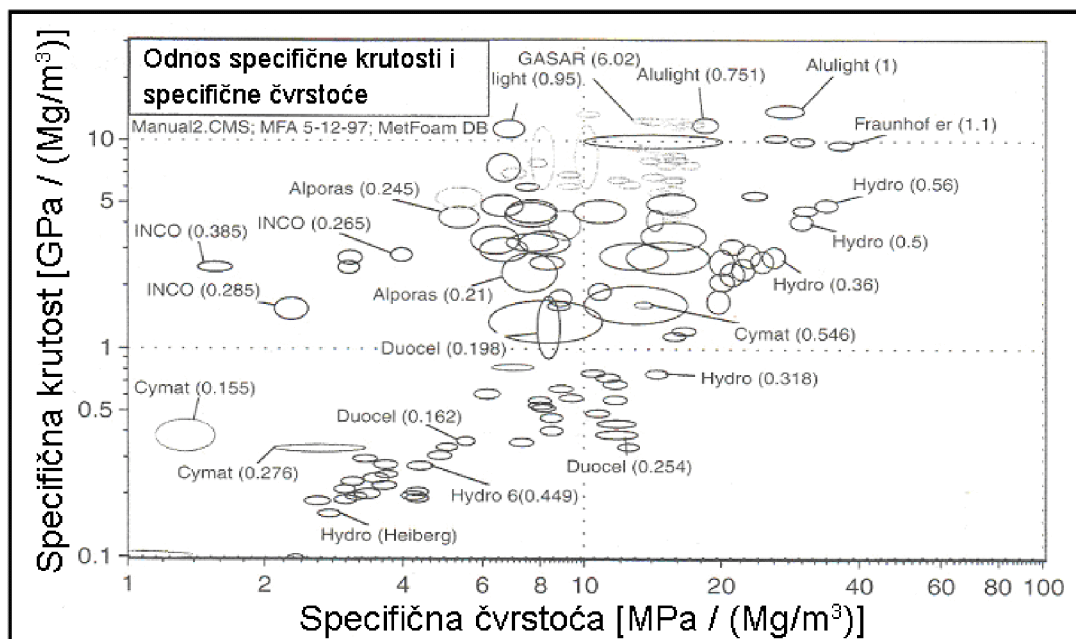
vrijednosti značajno variraju koristi li se jedna ili druga vrsta materijala pjene, gustoće ili oblika ćelija, bilo zatvorenih ili otvorenih. Za trenutno raspoložive metalne pjene slika 5.14., slika 5.15. i slika 5.16. prikazuju vrijednosti apsorpcije energije udara, tlačne čvrstoće-gustoće, specifične krutosti-specifične čvrstoće.



Slika 5.14. Apсорpcija energije po jedinici volumena pri 25% deformaciji za dostupne komercijalne metalne pjene [7]



Slika 5.15. Prikaz vrijednosti tlačne čvrstoće u ovisnosti o gustoći za komercijalne metalne pjene. [7]



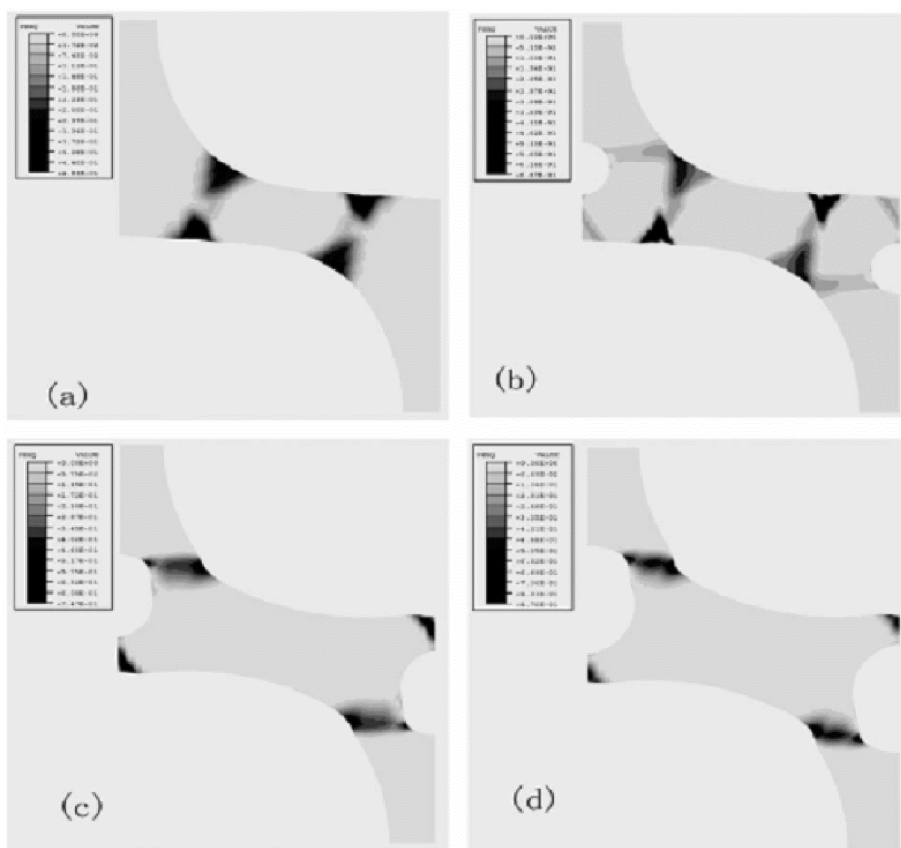
Slika 5.16. Prikaz specifične krutosti u ovisnosti o specifičnoj čvrstoći za komercijalno dostupne metalne pjene. [7]

Iz gornjih slika se jasno vidi usporedba pjena s otvorenim i zatvorenim ćelijama kao i njihov kapacitet apsorpcije energije, te njihova čvrstoća, što je vrlo korisno prilikom izbora adekvatne metalne pjene za određenu primjenu. Naravno, pri konstruiranju proizvoda, optimalna konstrukcija se postiže kada su poznati svi konstrukcijski parametri i konačna funkcija proizvoda te se na osnovu toga izabire najprikladniji materijal. Kod poroznih i čvrstih materijala postoje univerzalne matematičke formule pomoću kojih se dobivaju vrijednosti određenih mehaničkih svojstava kako je to prikazano u tablici 5.2. [7]

Tablica 5.2. Odnosi mehaničkih svojstava otvorenih i zatvorenih metalnih pjena. Vrijednosti s indeksom s odnose se na materijale pune gustoće. [7]

| Mehanička svojstva | Otvorene ćelije | Zatvorene ćelije |
|--|--|--|
| Youngov modul elastičnosti, E [GPa] | $E = (0.1-4)E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$ | $E = (0.1-1.0)E_s \times \left[0.5 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 + 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right]$ |
| Modul smičnosti, G [GPa] | $G \approx \frac{3}{8}E$ | $G \approx \frac{3}{8}E$ |
| Modul elastičnosti, K [GPa] | $K \approx 1.1E$ | $K \approx 1.1E$ |
| Modul savitljivosti, E_f [GPa] | $E_f \approx E$ | $E_f \approx E$ |
| Poissonov koeficijent | 0.32–0.34 | 0.32–0.34 |
| Tlačna čvrstoća, σ_c [MPa] | $\sigma_c = (0.1-1.0)\sigma_{c,s} \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2}$ | $\sigma_c = (0.1-1.0)\sigma_{c,s} \times \left[0.5 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{2/3} + 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right]$ |
| Vlačna čvrstoća, σ_t [MPa] | $\sigma_t \approx (1.1-1.4)\sigma_c$ | $\sigma_t \approx (1.1-1.4)\sigma_c$ |
| Granica izdržljivosti, σ_e [MPa] | $\sigma_e \approx (0.5-0.75)\sigma_c$ | $\sigma_e \approx (0.5-0.75)\sigma_c$ |
| Deformacijsko sabijanje, ε_D | $\varepsilon_D = (0.9-1.0) \times \left(1 - 1.4 \frac{\rho}{\rho_s} + 0.4 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right)$ | $\varepsilon_D = (0.9-1.0) \times \left(1 - 1.4 \frac{\rho}{\rho_s} + 0.4 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right)$ |
| Koeficijent gubitka, η | $\eta \approx (0.95-1.05) \times \frac{\eta_s}{(\rho/\rho_s)}$ | $\eta \approx (0.95-1.05) \times \frac{\eta_s}{(\rho/\rho_s)}$ |
| Tvrdoća, H [MPa] | $H = \sigma_c \left(1 + 2 \frac{\rho}{\rho_s}\right)$ | $H = \sigma_c \left(1 + 2 \frac{\rho}{\rho_s}\right)$ |
| Početna žilavost, J_{IC} [J/m ²] | $J_{IC}^* \approx \beta \sigma_{y,s} \ell \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^p$ | $J_{IC}^* \approx \beta \sigma_{y,s} \ell \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^p$ |

Eksperimentima je ustanovljeno da se otvorene aluminijske ćelije mogu ojačati „umetanjem“ manjih ćelija u stijenke većih ćelija. Ta kombinacija primarnih (većih) i sekundarnih (manjih) ćelija rezultira relativno višom čvrstoćom kod granice popuštanja materijala, a povećanje radijusa sekundarnih ćelija pozitivno utječe na porast modula elastičnosti. Tu naravno postoji granični volumni udio sekundarnih ćelija koji se ne smije premašiti jer u protivnom dolazi do degradacije mehaničkih svojstava. Simulacija predstavljene teorije upućuje na to da ojačanje metalne pjene proizlazi iz promjena u rasporedu opterećenja i načinu deformacije, što je prikazano na Slici 5.17.



Slika 5.17. Simulacija deformacije aluminijskih pjena različitih veličina sekundarnih ćelija. [7]

5.3. Krutost

Uobičajeno je da čvrstoća i krutost ćelijastih (poroznih) materijala u značajnoj mjeri ovise o njihovoj gustoći. Teorijske pretpostavke, koje se postavili Gibson i Ashby o mehaničkim svojstvima ćelijastih materijala, zasnivaju se na vezi između morfologije ćelija i svojstava stijenki ćelija. Kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama takve pretpostavke odgovaraju podacima utvrđenim ispitivanjem, dok kod pjena sa zatvorenim ćelijama to nije slučaj. [3]

Aluminijske pjene pokazuju različit modul elastičnosti pri vlačnom i tlačnom opterećenju. Bit ove pojave otežava činjenica da početna krutost uzoraka pri neosnom tlačnom opterećenju ne karakterizira ponašanje samog materijala, već ponajprije ispitivanje uzorka iznosi 20% vrijednosti modula elastičnosti koji se dobiva

na osnovi krivulja opterećivanje/rasterećivanje uzorka nakon dosezanja granice stlačivanja (R_{et}).

Krutost materijala ovisi o njegovoj gustoći i većina izmjerenih vrijednosti pjena sa zatvorenim ćelijama manja je od očekivanih teorijskih proračuna Gibsona i Ashbyja. Pjene sa zatvorenim ćelijama niske gustoće pokazuju vrijednosti krutosti koje su približno jednake vrijednostima predviđanja za pjene s otvorenim ćelijama. Objašnjenje za niže vrijednosti krutosti u odnosu na predviđene nalazi se u mikrostrukтури materijala. [3]

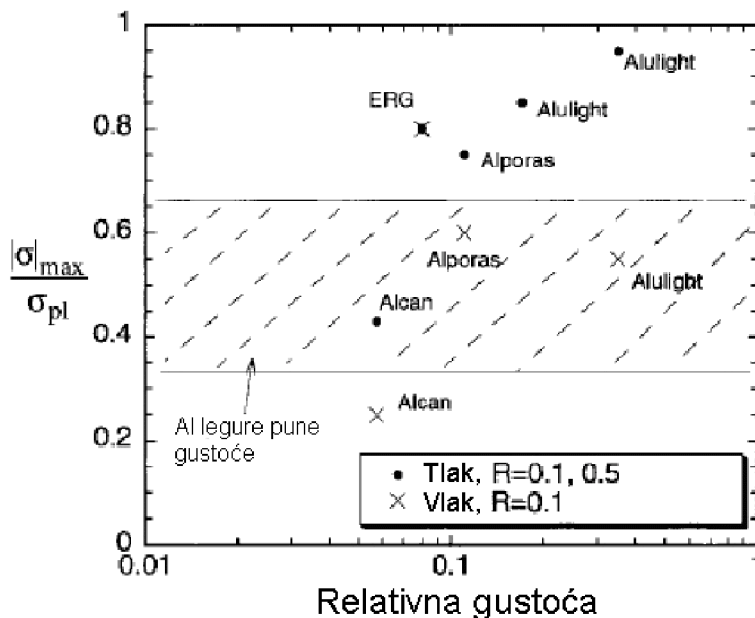
Može se konstatirati da s povećanjem pravilnosti mezostrukture raste krutost Al pjena. Krutost također snizuju i nepravilnosti poput zavojitih stijenki ćelija, nehomogenosti kao što su nejednolika veličina čvorova i velike napukline. Teorijska predviđanja koja su dali Gibson i Ashby zasnivaju se na pretpostavci pravilne strukture metalnih pjena. Tako nisu uzete u obzir lokalne pojave nestabilnosti, kao što je npr. lokalno izvijanje. Aluminijske pjene proizvedene postupcima metalurgije praha pokazuju vrlo malen stupanj anizotropije.

5.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju - umor

Još jedan važan faktor koji se uzima u obzir kod metalnih pjena je umor materijala. Metalne pjene pokazuju veoma duktilno ponašanje kod umora pri tlačnom opterećenju, što je rezultat savijanja stijenke ćelija, dok se kod umora pri vlačnom načinu opterećenja očituje progresivno izravnavanje stijenke ćelija sve do trenutka kada nastupa krhki lom.

Zbog eventualne pojave pukotine unutar strukture, negativni učinak na čvrstoću metalne pjene je zanemariv. Kod umora, pjene formiraju povezana područja koja se skraćuju ili produljuju te je pokazano da se Al-metalne pjene ponašaju kao i njeni dvojnici pune gustoće te ne postoji jasna veza prijelomne čvrstoće i relativne gustoće. [7]

Nadalje, što se tiče umora, pjene otvorenih ćelija pokazuju za nijansu bolje ponašanje nego pjene zatvorenih ćelija. Slika 5.18. prikazuje vrijednosti umora materijala u odnosu prema relativnoj gustoći metalne pjene.



Slika 5.18. Prikaz ovisnosti umora pri maksimalnom broju ciklusa o relativnoj gustoći nekih Al-pjena. [7]

5.5. Ponašanje pri puzanju

Puzanje je još jedan važan faktor za razmatranje osobito kada je radna okolina metalnih pjena na povišenoj temperaturi, tj. kada je radna temperatura blizu 1/3 temperature tališta. Puzanje metalnih pjena ovisi direktno o njihovoj relativnoj gustoći i vrijednostima puzanja za pune materijale od kojih su izrađene. Glavni mehanizam puzanja je kombinacija naprezanja i temperature, kod malih naprezanja i visokih temperatura ($T/T_m > 0.8$) tijekom difuzije atoma duž granica zrna ili unutar zrna može postati dominantni mehanizam, dok pri višim naprezanjima i nižim temperaturama ($0.3 < T/T_m < 0.8$) dominantni mehanizam je gibanje dislokacija. Brzina puzanja u drugom stadiju je dana jednadžbom:

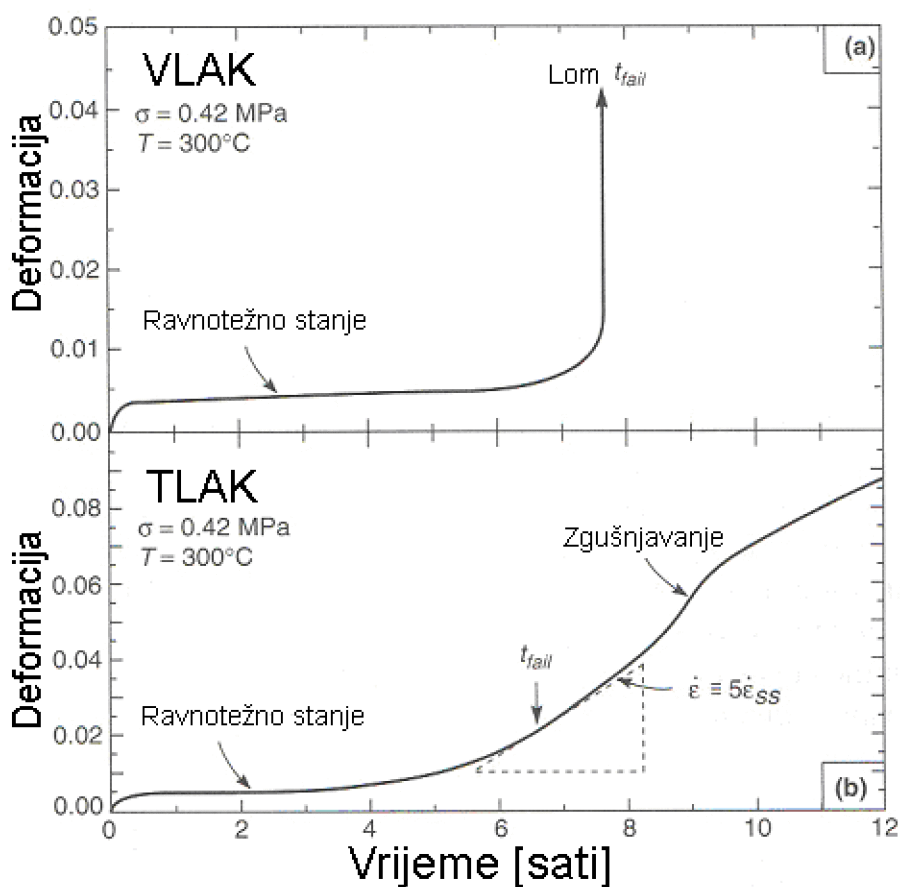
$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

Gdje je:

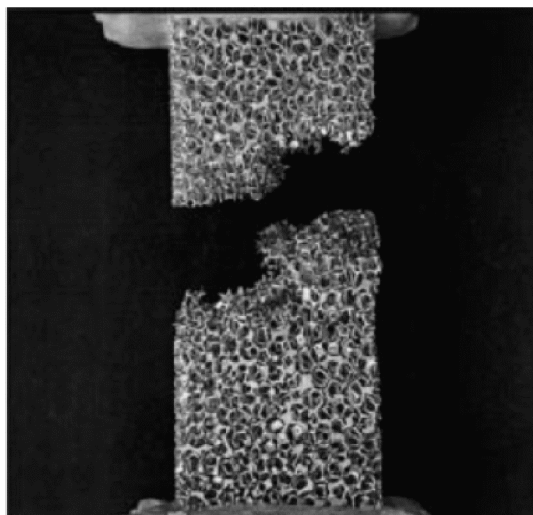
$$\dot{\epsilon}_0 = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

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

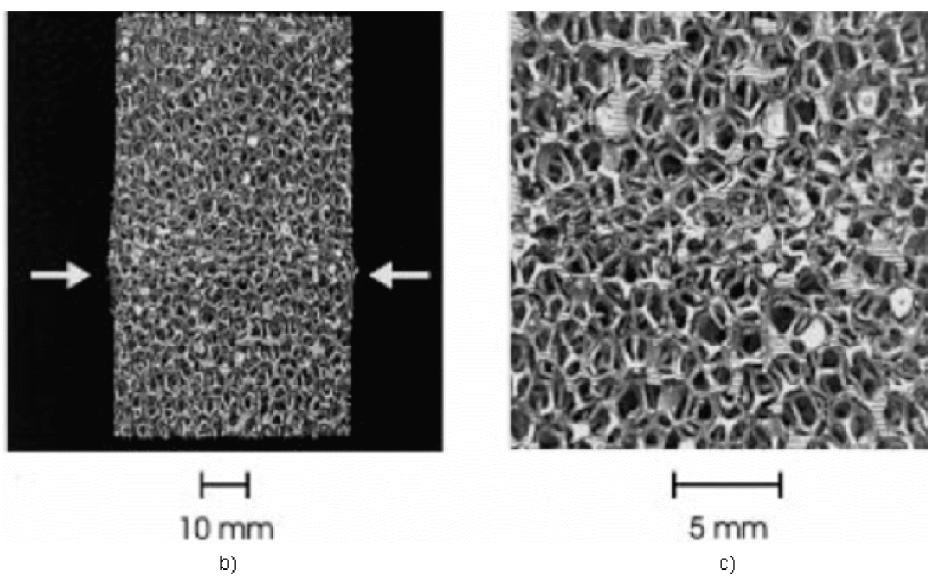
Na sljedećim slikama prikazan je način testiranja, pojava pukotine kod Al-pjene pri vlačnom opterećenju te pojava pukotine kod tlačnog naprezanja pri temperaturi od 275°C i 0.88 MPa.



Slika 5.19. Prikaz dužinske deformacija pri puzanju u ovisnosti o vremenu za Al-pjene otvorenih ćelija kod (a) vlačnog i (b) tlačnog opterećenja. [7]



a)



Slika 5.20. d) Lom Al-pjene otvorenih ćelija uzrokovan vlačnim opterećenjem
e) Pojasno zadebljanje zbog tlačnog opterećenja
f) Pojasno zadebljanje zbog tlačnog opterećenja (uvećani prikaz)[7]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Izrađeni su uzorci aluminijskih pjena različitih gustoća, koji su bili podvrgnuti tlačnom ispitivanju s ciljem određivanja energije udara, te su analizirani dobiveni podaci.

6.1. Idejni projekt

Eksperimentalni dio je podijeljen u dva dijela. U prvom je dijelu bilo potrebno izraditi ispitne uzorke iz aluminijskih prekursora dviju različitih gustoća. Nakon toga se u drugom dijelu na uzorcima provodi tlačni test do točke sabijanja s ciljem dobivanja dijagrama SILA – SKRAĆENJE, na osnovu kojeg se izrađuje dijagram NAPREZANJE – DEFORMACIJA i tablica vrijednosti pojedinih svojstava. U ovom radu naglasak je na analizi svojstva energije apsorpcije aluminijske pjene i njene zavisnosti o brzini izvođenja statičkog tlačnog pokusa za različite relativne gustoće. Površina ispod krivulje u dijagramu SILA – SKRAĆENJE jednaka je apsorbiranoj energiji, a izračunava se primjenom Simpsonove metode pomoću software-skog alata Graph.

6.2. Izrada ispitnih uzoraka

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



Slika 6.1. Izgled korištene elektrootporne peći

REKONSTRUIRANA LABORATORIJSKA PEĆ

Tip: Zvonasta peć sa zračnom atmosferom- ZPZ

TEHNIČKE KARAKTERISTIKE:

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

NAMJENA PEĆI:

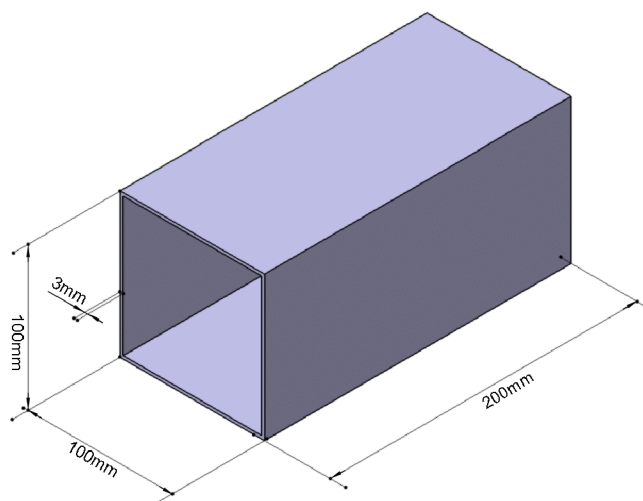
Zagrijavanje metalnih kalupa za ekspanziranje metalnih pjena od lakih metala do temperature 1000 °C.

TEHNIČKI OPIS:

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

Slika 6.2. Tehničke karakteristike peći.

Za kalup je korištena kvadratna cijev (100 x 100 x 3,0) visine 200mm izrađena od materijala Č.0361 prema HRN normi, slika 6.3. Unutarnja zapremina kvadratnog kalupa iznosi 1767200mm³ i pošto je konstantna, da bi se dobila različita gustoća aluminijske pjene potrebno je mijenjati masu prekursora. Pokazalo se da oblik poprečnog presjeka uzorka nema značajan utjecaj na apsorpciju energije. Rađeno je sa tako velikim uzorcima jer je pretpostavka da bi se oni mogli koristiti kao odbojnici.



Slika 6.3. Oblik cijevi kvadratnog presjeka materijala Č.0631 korištene za kalup.

Prekursor je poluproizvod koji se proizvodi na način da se prah metalne legure, pomiješan s agansom koji omogućava pjenjenje, ekstrudira u profile pravokutnog presjeka. Materijal od kojeg je prekursor izrađen sastoji se od praha AlMgSi 0,6 pomiješan sa 0,4% TiH₂. Slijedi prikaz proračuna zahtijevane mase uzorka (m_1 , m_2) za zadane relativne gustoće (ρ_1 , ρ_2):

ZADANO: Gustoća aluminija: $\rho_{Al} = 2700\text{kg/m}^3 = 2,7\text{g/cm}^3$

Zadane relativne gustoće: $\rho_1 = 0,25$, $\rho_2 = 0,3$

Zahtijevane mase uzoraka: $m_1, m_2 = ?$

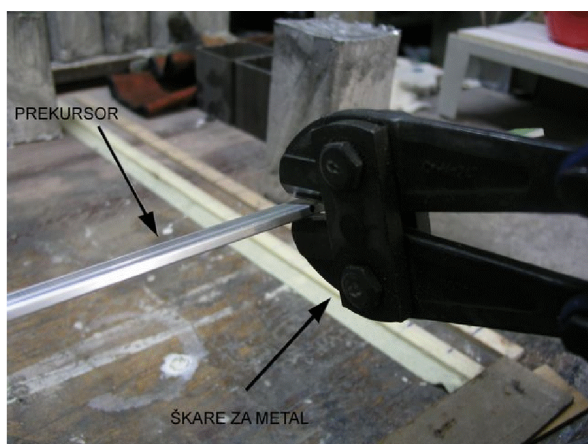
Volumen kalupa: $V_k = 94 \times 94 \times 200 = 1767200\text{mm}^3 = 1767,2\text{cm}^3$

Masa punog aluminija: $m_{Al} = V_k \cdot \rho_{Al} = 1767,2 \cdot 2,7 = 4771,44\text{g}$

Iznos mase uzoraka: $m_1 = m_{Al} \cdot \rho_1 = 4771,44 \cdot 0,25 \approx 1200\text{g}$

$m_2 = m_{Al} \cdot \rho_2 = 4771,44 \cdot 0,30 \approx 1430\text{g}$

Dosadašnja ispitivanja koja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pokazala su da što je manja gustoća pjene to je bolja apsorpcija energije. Slika 6.4. prikazuje rezanje prekursora na duljinu manju od 200mm škarama za metal, a slika 6.5. prikazuje mjerenje mase (m_1 , m_2) pomoću digitalne vage.

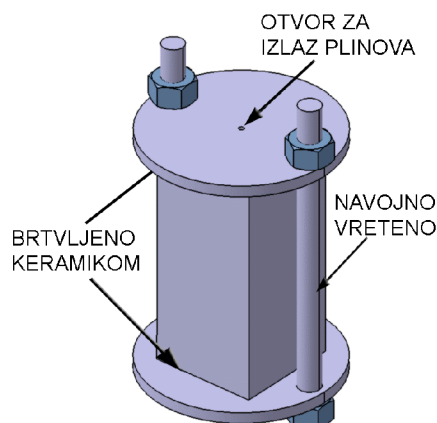


Slika 6.4. Prikaz rezanja prekursora škarama za metal.



Slika 6.5. Vaganje prekursora na definiranu masu uzoraka.

Nakon što su prekursori izrezani i izvagani na definirane mase (m_1 , m_2), stavljaju se u pripremljeni kalup koji se potom brtvi keramičkom smjesom. Kalup se prije punjenja prekursorima priprema tako da se unutrašnjost naštrca keramičkom otopinom radi lakšeg vađenja gotovog uzorka iz kalupa. Nakon toga se pripremljeni kalup, prikazan slikom 6.6., stavlja u peć prethodno ugrijanu na 850°C.



Slika 6.6. Prikaz zabrtvljenog kalupa ispunjenog prekursorima.

Još uvijek ne postoji matematički model po kojem bi se izračunalo vrijeme koje mora kalup provesti u peći, što predstavlja problem, jer se za svaki oblik kalupa i određenog materijala prekursora vrijeme mora odrediti ispitivanjem. Za izradu ovih uzoraka bilo je potrebno kalup držati u peći na temperaturi 850°C između 15 – 20 minuta, s time da se svakih 4 – 5 minuta nadziralo ponašanje kalupa u peći kroz malo okno (slika 6.7.).



Slika 6.7. Nadziranje procesa pjenjenja u peći gdje se prati pojava izlaska kapljice tekućeg aluminija kroz otvor na gornjem dijelu kalupa.

Kad bi se opazilo da na otvor za izlaz plinova počinje izlaziti aluminij kalup bi se maknuo iz peći (slika 6.8.) i naglo gasio u vodi (slika 6.9.).



Slika 6.8. Izgled kalupa neposredno prije vađenja iz peći.

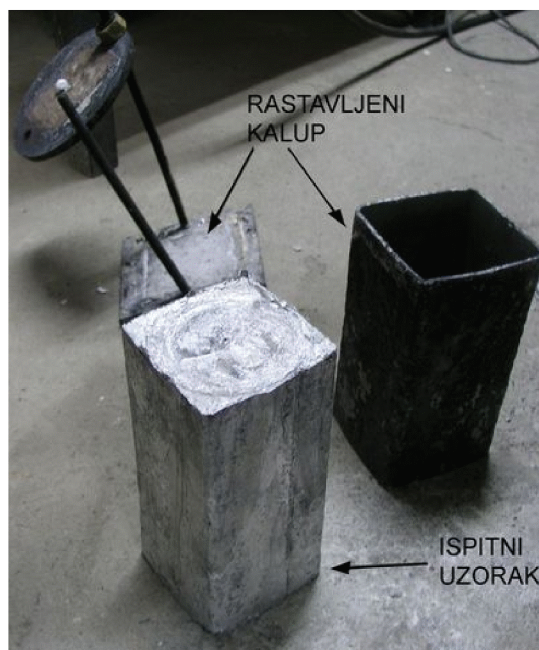


Slika 6.9. Prikaz gašenja kalupa u vodi.

Prilikom gašenja kalupa u vodi potrebno je paziti da se kalup skroz ne ohladi jer bi u tom slučaju bilo nemoguće izvaditi pjenu iz kalupa. Neposredno nakon intenzivnog hlađenja slijedi vađenje uzorka iz kalupa (slika 6.10., slika 6.11.).



Slika 6.10. Uzorak u kalupu.



Slika 6.11. Izvađeni uzorak iz kalupa.

Izrađeno je 12 ispitnih uzoraka aluminijske pjene kvadratnog oblika (slika 6.12.), a detaljnije karakteristike prikazuje tablica 6.1.



Slika 6.12. Prikaz izrađenih uzoraka s prikazanom masom u gramima (vrijednosti u zagradama zanemariti):

- 6 uzoraka mase 1200g, (prvi red uzoraka)
- 6 uzoraka mase 1430g, (drugi red uzoraka)

Tablica 6.1. Uzorci aluminijskih pjena **kvadratnog oblika**

| | | | | | | |
|--------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Naziv | 1200MAT1m | 1200MAT2m | 1200MAT3m | 1200MAT1v | 1200MAT2v | 1200MAT3v |
| Tip pjene | Zatvorene ćelije | | | | | |
| Dimenzije [mm] | 94 x 94 x 200 | | | | | |
| Materijal | ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH ₂ – 0,4 | | | | | |
| Masa [g] | 1200 | | | | | |
| Relativna gustoća | 0,25 | | | | | |
| Naziv | 1430MAT1m | 1430MAT2m | 1430MAT3m | 1430MAT1v | 1430MAT2v | 1430MAT3v |
| Tip pjene | Zatvorene ćelije | | | | | |
| Dimenzije [mm] | 94 x 94 x 200 | | | | | |
| Materijal | ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH ₂ – 0,4 | | | | | |
| Masa [g] | 1430 | | | | | |
| Relativna gustoća | 0,3 | | | | | |

6.3. Ispitivanje uzoraka

Tlačni pokus izvršen je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, pomoću kidalice marke WPM, model EU 40 mod (slika 6.13.). Najveći iznos tlačne sile koju kidalica može ostvariti je 400kN, a brzine tlačenja bile su $v_1 = 6\text{mm/min}$ i $v_2 = 60\text{mm/min}$. Kidalica je spojena na računalo pomoću kojeg se namještaju parametri ispitivanja, te se vrši upravljanje, a isto tako računalo tijekom ispitivanja iscrtava dijagram SILA – SKRAĆENJE, koji je predmet daljnje analize.



Slika 6.13. Kidalica za statičko tlačno ispitivanje.

Raspored ispitivanja je prikazan tablicom 6.2.

Tablica 6.2. Raspored ispitivanja uzoraka različitim brzinama ispitivanja statičkog tlačnog pokusa.

| | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Naziv uzorka | 1200MAT1m | 1200MAT2m | 1200MAT3m | 1430MAT1m | 1430MAT2m | 1430MAT3m |
| Brzina ispitivanja, v_1 | 6mm/min | | | | | |
| Naziv uzorka | 1200MAT1v | 1200MAT2v | 1200MAT3v | 1430MAT1v | 1430MAT2v | 1430MAT3v |
| Brzina ispitivanja, v_2 | 60mm/min | | | | | |

Nakon što se uzorak postavi u ispitne čeljusti (slika 6.14.) započinje ispitivanje (slika 6.15., slika 6.16., slika 6.17.).



Slika 6.14. Prikaz uzorka na početku ispitivanja.



Slika 6.15. Nastanak pukotine pri naprezanju uvijek započinje u sloju najmanje gustoće.

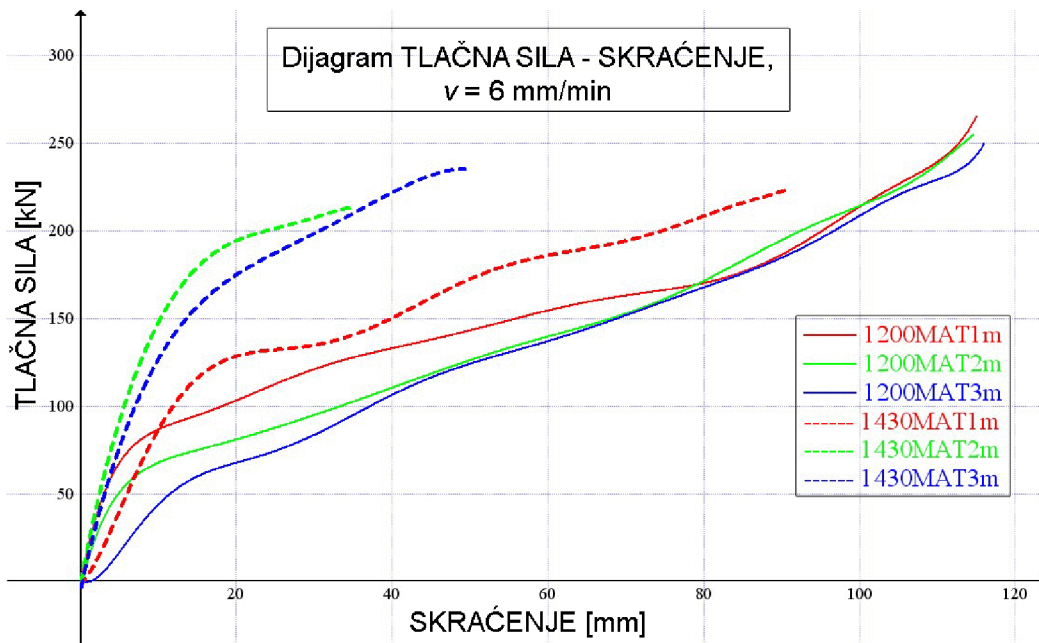


Slika 6.16. Urušavanje ćelija pod utjecajem tlačne sile rezultira kontrakcijom visine uzorka.

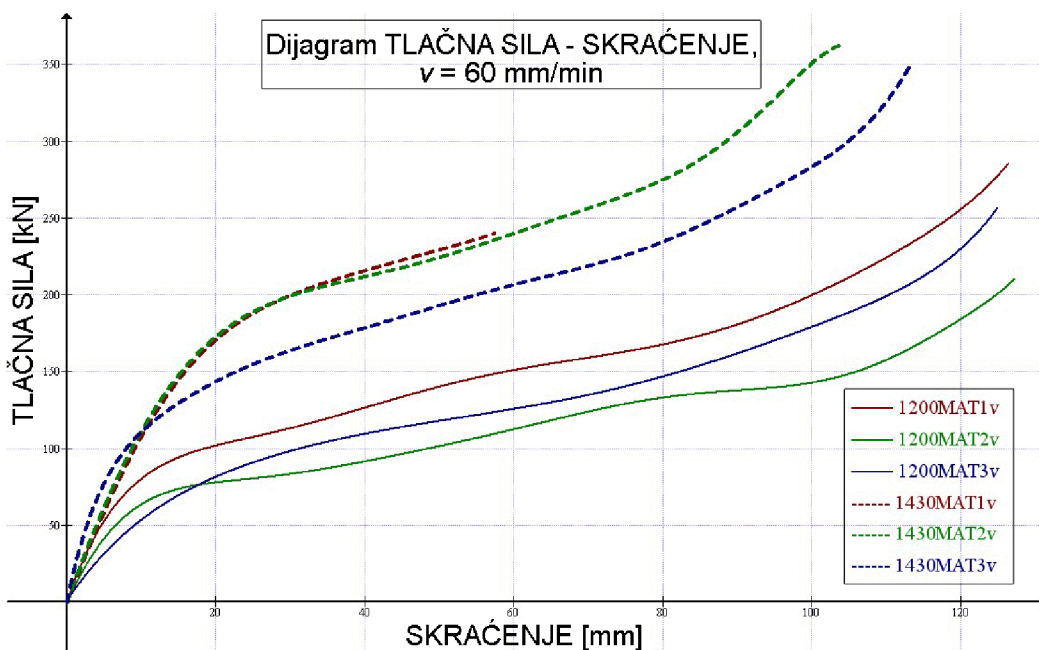


Slika 6.17. Završetak ispitivanja je točka kod koje dolazi do potpunog sabijanja gdje sila počinje eksponencijalno rasti.

Rezultati ispitivanja za pojedini uzorak priloženi su u prilogu 9.1. i 9.2., a slika 6.18. i slika 6.19. prikazuju zajedničke aproksimirane dijagrame TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za testirane uzorke.



Slika 6.18. Prikaz aproksimiranog dijagrama statičkog tlačnog pokusa za 6 uzoraka dvaju različitih masa (1200g i 1430g) i brzine testiranja $V_1 = 6 \text{ mm/min}$.

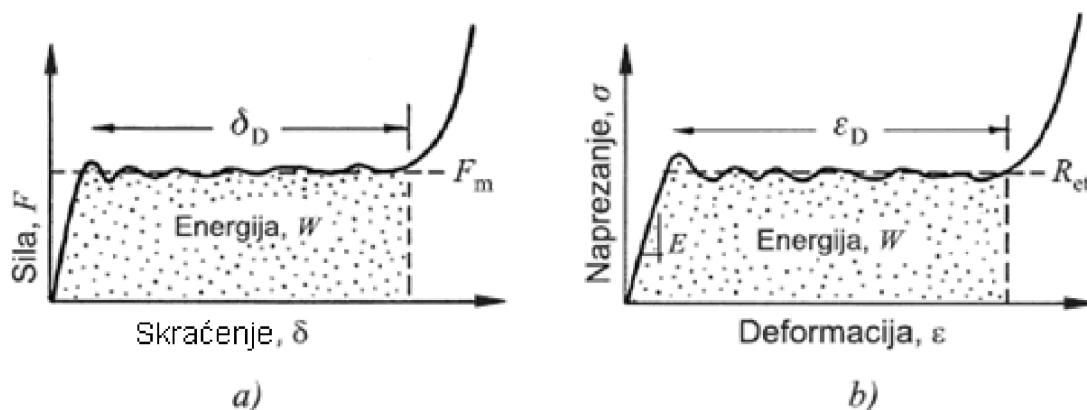


Slika 6.19. Prikaz aproksimiranog dijagrama statičkog tlačnog pokusa za 6 uzoraka dvaju različitih masa (1200g i 1430g) i brzine testiranja $v_2 = 60 \text{ mm/min}$.

Zanimljivo je primijetiti da dijagrami ne prikazuju naglašeno područje deformacije pri konstantnom tlačnom opterećenju gdje se i događa apsorpcija energije. Idealan apsorpcijski materijal se deformira tijekom cijelog procesa uz konstantni iznos naprezanja kako je i objašnjeno u poglavlju 5.1.

6.4. Teorijsko određivanje energije apsorpcije

Metalne pjene pod nametnutim opterećenjem vrše zapravo rad upijajući energiju udara i pretvarajući ju u mehaničku energiju deformiranja vlastite strukture. Čelijasti materijali urušavanjem svoje strukture kompenziraju nalet neke vanjske sile. Površina ispod krivulje u dijagramu NAPREZANJE – DEFORMACIJA i u dijagramu TLAČNA SILA - SKRAĆENJE određuje količinu apsorbirane energije (slika 6.20.), a poznato je da je određivanje površine ispod krivulje dosta složen postupak.



Slika 6.20. Apsorbirana energija prikazana kao površina ispod krivulje:
 c) u dijagramu SILA – SKRAĆENJE
 d) u dijagramu NAPREZANJE - DEFORMACIJA

Formule kojima se računa apsorbirana energija, tj. površina ispod krivulje glasi:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad \text{ili} \quad W = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta$$

W – apsorbirana energija udara po jedinici volumena (MJ/mm^3) ili (N/mm^2)
 σ – naprezanje (N/mm^2)
 ε – deformacija (%)

W – apsorbirana energija udara po jedinici volumena (MJ/mm^3) ili (N/mm^2)
 F – sila (kN)
 δ – skraćenje (mm)

Postoje razni software-ski alati koji olakšavaju taj postupak, a i u sklopu ovog rada korišten je jedan program za određivanje površine ispod krivulje. Radi se o besplatnom programu Graph koji je dostupan na internetu i koji služi za analizu funkcija. Program računa površinu ispod krivulje pomoću Simpsonovog pravila s 1000 iteracija.

Simpsonovo pravilo nazvano tako po Tomasu Simpsonu je metoda iz numeričke analize kojom približno izračunavamo određen integral neke funkcije $f(x)$, tj. zanima nas aproksimacija:

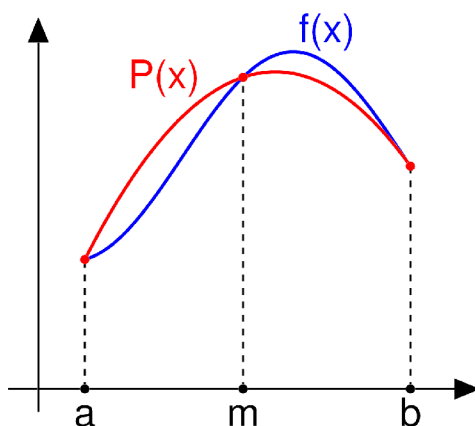
$$\int_a^b f(x) dx$$

Simpsonova formula (ili pravilo) je u stvari dio Newton-Knuta formula. Funkciju prvo aproksimiramo uz pomoć Lagranžovih polinoma drugog stupnja (slika 6.21.), a poslije umjesto da izračunamo integral funkcije $f(x)$, izračunavamo integral dobivenog polinoma:

$$f(x) \approx P(x) = \sum_{i=0}^{n=2} l_i(x) \cdot f(x_i)$$

pri tom

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$$



Slika 6.21. Grafički prikaz aproksimacije gdje funkciju $f(x)$ (plava) aproksimiramo uz pomoć kvadratne funkcije $P(x)$ (crvena).

Označi se početna točka integrala $a = x_0$, krajnju $b = x_2$, a točka u sredini $m = x_1$ i dobije se:

$$P(x) = f(a) \frac{(x-m)(x-b)}{(a-m)(a-b)} + f(m) \frac{(x-a)(x-b)}{(m-a)(m-b)} + f(b) \frac{(x-a)(x-m)}{(b-a)(b-m)} \approx f(x)$$

Ovom prilikom neće se prikazati kako se dolazi do konačne formule; račun nije težak i sastoji se od primjene jednostavnih pravila za integrale (na primjer, primjena integrala na sumu):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \int_a^b P(x) dx = \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right]$$

Kada se želi aproksimirati integral u intervalu od a do b očigledno je da će za to biti neophodne tri točke date funkcije.

Greška u danom intervalu je:

$$E_S = -\frac{(b-a)^5}{90} f^{(4)}(\xi),$$

gdje je $\xi \in [a, b]$.

Ukoliko se želi naći najveća moguća greška odnosno njena granica, dovoljno je maksimizirati četvrti izvod funkcije za ξ :

$$|E_S| \leq \frac{(b-a)^5}{90} \left| \max_{a \leq \xi \leq b} f^{(4)}(\xi) \right|$$

S obzirom da greška ovisi o razmaku između točaka kojima vrši se aproksimacija, a ako se označi taj razmak sa

$$h = \frac{b-a}{2},$$

može se reći, koristeći se O-notacijom da se greška nalazi

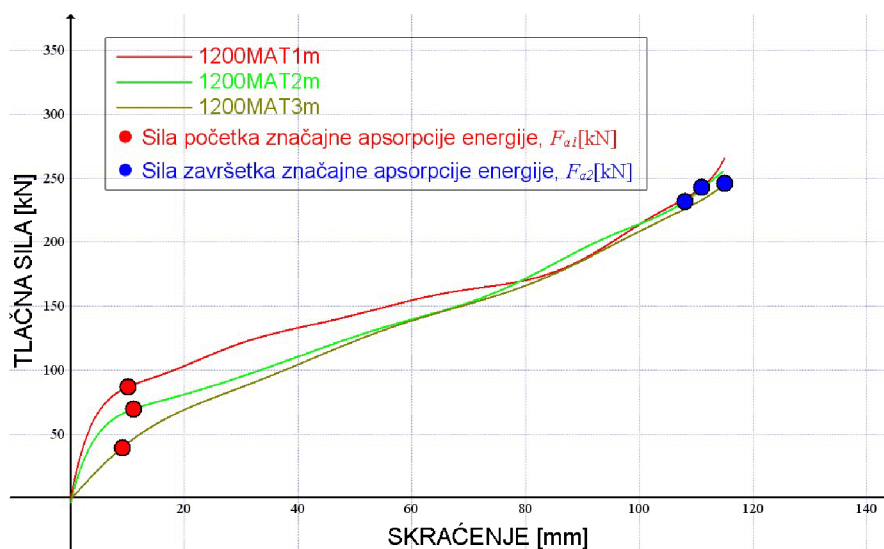
$$E_S = \mathcal{O}(h^5).$$

Pomoću programa za analizu funkcija Graph dobiveni su podaci za kvadratne ispitne uzorke te su prikazani tablicama 6.3., 6.4., 6.5., i 6.6. za svaku skupinu uzoraka, a slike 6.22., 6.23., 6.24., 6.25. prikazuju dijagrame TLAČNA SILA – SKRAĆENJE sa ucrtanim silama početka i završetka energije apsorpcije.

Ispitivanje je proizvoljno prekidano kada je sila dosegla vrijednosti iznad 200 kN jer su se kod težih uzoraka (1430MAT) na tim vrijednostima pojavile snažne vibracije uređaja za tlačno ispitivanje uslijed nedostatka snage za daljnju apsorpciju energije, stoga u tablicama težih uzorka (1430MAT) nema očitanih sila završetka apsorpcije (F_{a2}), pa tako ni gornje granice naprezanja (σ_{tG}).

Tablica 6.3. Analitički prikaz podataka vezan za prvu skupnu ispitnih uzoraka.

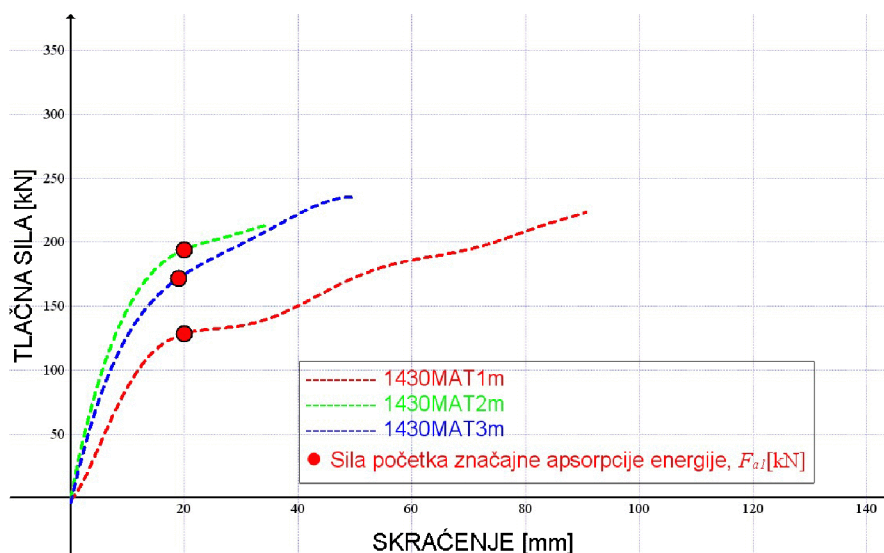
| NAZIV UZORKA | | 1200MAT1m | 1200MAT2m | 1200MAT3m |
|--|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| MASA, m [g] | | 1200 | | |
| GUSTOĆA, ρ | | 0,25 | | |
| BRZINA ISPITIVANJA, v_1 [mm/min] | | 6 | | |
| Sila početka značajne apsorpcije energije, F_{a1} [kN] | | 86.757 | 69.5361 | 39.3773 |
| Sila završetka značajne apsorpcije energije, F_{a2} [kN] | | 242.9129 | 231.814 | 245.8293 |
| Donja granica apsorpcijskog naprezanja, σ_{tD} [MPa] | | 9,82 | 7,87 | 4,46 |
| Gornja granica apsorpcijskog naprezanja, σ_{tG} [MPa] | | 27,49 | 26,24 | 27,82 |
| APSORBIRANA ENERGIJA W [J] PRI TLAČNOJ SILI OD 100kN, 150kN, 200kN | W_{100} | 1398,1321 | 2416,527 | 2257,8902 |
| | W_{150} | 6307,5723 | 6773,7321 | 6277,0576 |
| | W_{200} | $1,2907 \cdot 10^4$ | $1,1049 \cdot 10^4$ | $1,1053 \cdot 10^4$ |



Slika 6.22. Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1200MAT i brzinu ispitivanja $v_1 = 6\text{mm/min}$.

Tablica 6.4. Analitički prikaz podataka vezan za drugu skupnu ispitnih uzoraka.

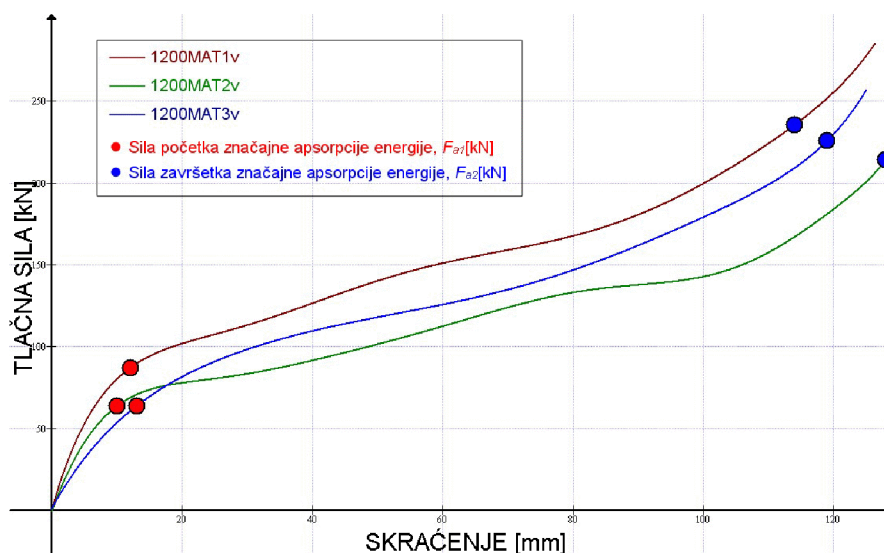
| NAZIV UZORKA | | 1430MAT1m | 1430MAT2m | 1430MAT3m |
|--|-----------|--------------------|-----------|-----------|
| MASA, m [g] | | 1430 | | |
| REL. GUSTOĆA, ρ | | 0,3 | | |
| BRZINA ISPITIVANJA, v_1 [mm/min] | | 6 | | |
| Sila početka značajne apsorpcije energije, F_{a1} [kN] | | 128,4523 | 194,3866 | 172,04 |
| Donja granica apsorpcijskog napreznja, σ_{ID} [MPa] | | 14,54 | 22,00 | 19,47 |
| APSORBIRANA ENERGIJA W [J] PRI TLAČNOJ SILI OD 100kN, 150kN, 200kN | W_{100} | 591,3605 | 309,2209 | 379,0456 |
| | W_{150} | 4278,2314 | 914,4719 | 1234,0218 |
| | W_{200} | $1,065 \cdot 10^4$ | 3422,1029 | 4346,0322 |



Slika 6.23. Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1430MAT i brzinu ispitivanja $v_1 = 6\text{mm/min}$.

Tablica 6.5. Analitički prikaz podataka vezan za treću skupnu ispitnih uzoraka.

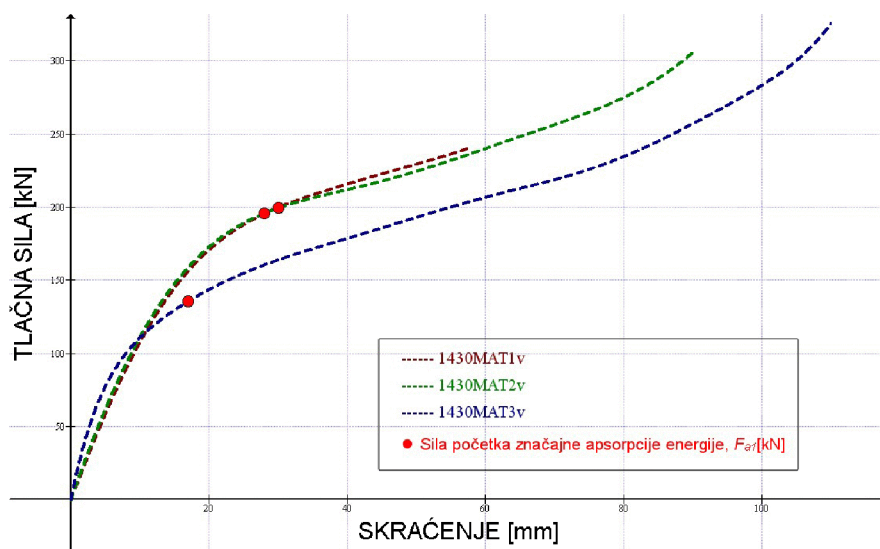
| NAZIV UZORKA | | 1200MAT1v | 1200MAT2v | 1200MAT3v |
|---|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|
| MASA, m [g] | | 1200 | | |
| GUSTOĆA, ρ | | 0,25 | | |
| BRZINA ISPITIVANJA, v_2 [mm/min] | | 60 | | |
| Sila početka značajne apsorpcije energije, F_{a1} [kN] | | 86.9567 | 63.6861 | 63.7844 |
| Sila završetka značajne apsorpcije energije, F_{a2} [kN] | | 235.4535 | 225.7145 | 214.0856 |
| Donja granica apsorpcijskog naprezanja, σ_{iD} [MPa] | | 9,84 | 7,21 | 7,22 |
| Gornja granica apsorpcijskog naprezanja, σ_{iG} [MPa] | | 26,65 | 25,54 | 24,23 |
| APSORBIRANA ENERGIJA W[J] PRI TLAČNOJ SILI OD 100kN, 150kN, 200kN | W_{100} | 1317,2113 | 3645,5495 | 2061,9079 |
| | W_{150} | 6479,3235 | $1,101 \cdot 10^4$ | 8443,3746 |
| | W_{200} | $1,329 \cdot 10^4$ | $1,4146 \cdot 10^4$ | $1,3257 \cdot 10^4$ |



Slika 6.24. Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1200MAT i brzinu ispitivanja $v_2 = 60\text{mm/min}$.

Tablica 6.6. Analitički prikaz podataka vezan za četvrtu skupnu ispitnih uzoraka.

| NAZIV UZORKA | | 1430MAT1v | 1430MAT2v | 1430MAT3v |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| MASA, m [g] | | 1430 | | |
| GUSTOĆA, ρ | | 0,3 | | |
| BRZINA ISPITIVANJA, v_2 [mm/min] | | 60 | | |
| Sila početka značajne apsorpcije energije, F_{a1} [kN] | | 199.5963 | 195.6089 | 135.4585 |
| Donja granica apsorpcijskog naprezanja, σ_{ID} [MPa] | | 22,59 | 22,14 | 15,33 |
| APSORBIRANA ENERGIJA W [J] PRI TLAČNOJ SILI OD 100kN, 150kN, 200kN | W_{100} | 487,1704 | 457,9008 | 525,6652 |
| | W_{150} | 1354,1701 | 1349,6908 | 2380,0383 |
| | W_{200} | 3917,8666 | 4066,0212 | 8084,2014 |



Slika 6.25. Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE s ucrtanim točkama početka i završetka apsorpcije energije za uzorke 1430MAT i brzinu ispitivanja $v_2 = 60\text{mm/min}$.

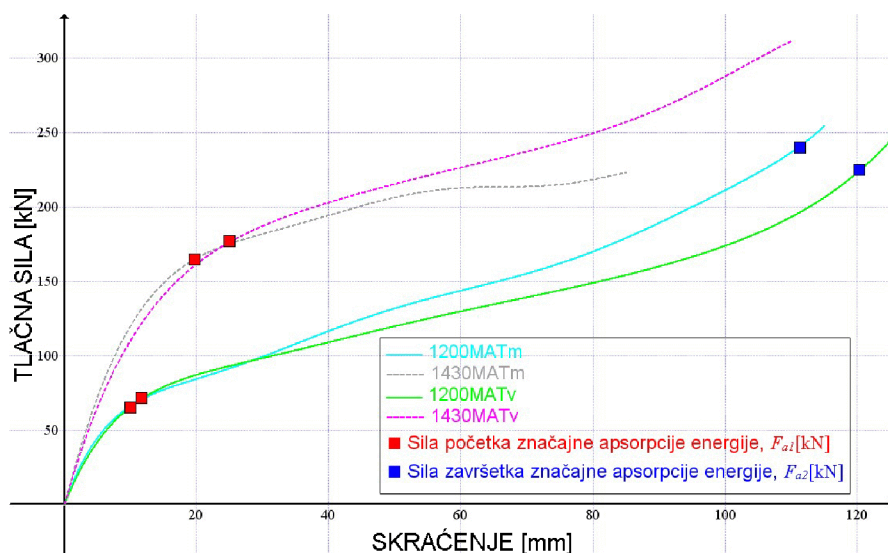
U tablici 6.7., dane su vrijednosti za srednje krivulje uzoraka, a slika 6.25. prikazuje dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za pripadne srednje krivulje sa označenim srednjim silama početka i završetka značajne apsorpcije energije (F_{a1} , F_{a2}).

Slikom 6.26. predočen je dijagram NAPREZANJE – DEFORMACIJA sa označenom donjom i gornjom granicom srednjeg apsorpcijskog naprezanja ($\overline{\sigma_{tD}}$, $\overline{\sigma_{tG}}$).

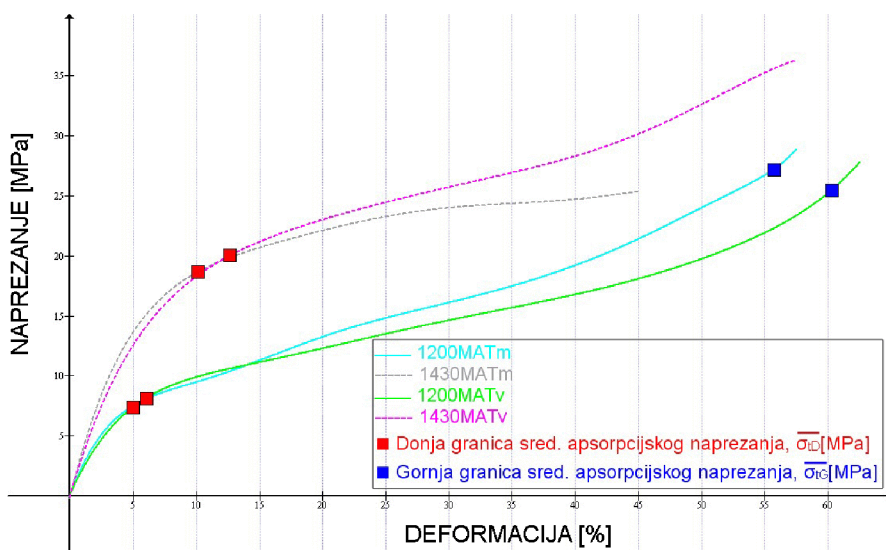
Histogramski prikaz na slici 6.27. slikovito prikazuje količinu apsorbirane energije kod promatranih sila iznosa 100kN, 150kN i 200kN.

Tablica 6.7. Analitički prikaz vrijednosti aproksimiranih vrijednosti svih uzoraka.

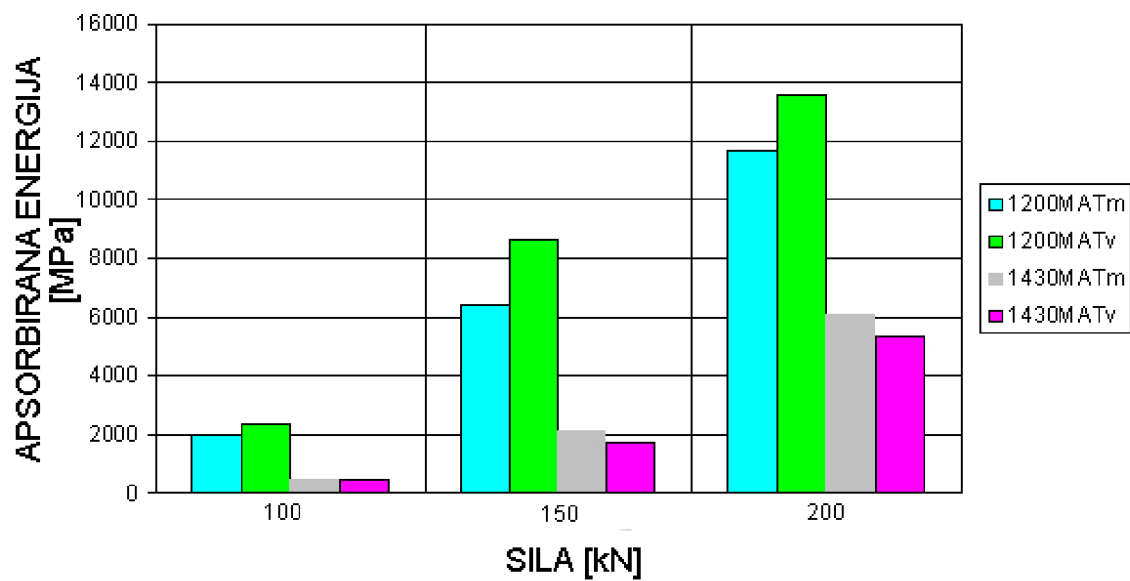
| NAZIV UZORAKA | | 1200MATm | 1200MATv | 1430MATm | 1430MATv |
|--|----------------------|---------------------|---------------------|----------|----------|
| MASA, m [g] | | 1200 | | 1430 | |
| GUSTOĆA, ρ | | 0,25 | | 0,3 | |
| BRZINA ISPITIVANJA, v_1, v_2 [mm/min] | | 6 | 60 | 6 | 60 |
| Sila početka značajne apsorpcije energije, \overline{F}_{a1} [kN] | | 71,4757 | 65,2234 | 164,9588 | 176,8879 |
| Sila završetka značajne apsorpcije energije, \overline{F}_{a2} [kN] | | 240,1854 | 225,0845 | / | / |
| Donja granica srednjeg apsorpcijskog naprezanja, $\overline{\sigma}_{tD}$ [MPa] | | 8,0891 | 7,3815 | 18,669 | 20,019 |
| Gornja granica srednjeg apsorpcijskog naprezanja, $\overline{\sigma}_{tG}$ [MPa] | | 27,1825 | 25,47349 | / | / |
| SREDNJA APSORBIRANA ENERGIJA UDARA \overline{W} [J] PRI TLAČNOJ SILI 100kN, 150kN, 200kN | \overline{W}_{100} | 2024,183 | 2341,556 | 426,5423 | 490,2455 |
| | \overline{W}_{150} | 6452,787 | 8644,233 | 2142,242 | 1694,633 |
| | \overline{W}_{200} | $1,1669 \cdot 10^4$ | $1,3564 \cdot 10^4$ | 6139,378 | 5356,03 |



Slika 6.26. Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za srednje krivulje svih skupina uzoraka.



Slika 6.27. Dijagram NAPREZANJE – DEFORMACIJA za srednje krivulje svih skupina uzoraka.



Slika 6.28. Histogramski prikaz srednje količine apsorbirane energije pri zadanim silama svih uzoraka.

7. ZAKLJUČAK

Svrha ovog rada nije bila potvrditi već poznate pretpostavke o dobroj sposobnosti apsorpcije energije udara aluminijskih pjena, nego i ispitati utjecaj brzine izvođenja tlačnog pokusa na različite gustoće ispitnih uzoraka. Pošto su dosadašnja ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pokazala da je apsorpcija energije bolja što je relativna gustoća uzorka manja, išlo se u smjeru da se proizvedu uzorci što je moguće niže relativne gustoće. Na prijašnjim pećima za proizvodnju uzoraka iskustveno je minimalna postiziva relativna gustoća iznosila otprilike 0,3, nabavkom kvalitetnije elektrootporne peći opisane u poglavlju 6.2. te zahvaljujući iskustvu i vještini službenog osoblja ostvarena je relativna gustoća od 0,25.

Određene su dvije brzine izvođenja tlačnog pokusa; prva je bila 6mm/min, a druga 60mm/min. Velika razlika među brzinama je namjerna da se što jasnije istakne utjecaj brzine na apsorpciju energije kod nekih karakterističnih iznosa sile (100kN, 150kN, 200kN).

Analizom rezultata i dijagrama uzoraka od materijala ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH₂ – 0,4 zaključuje se da je promatranje utjecaja brzine opravdano i to na zanimljiv način. Pokazalo se da je kod uzoraka manje relativne gustoće, mase i manje brzine (1200MATm) količina apsorbirane energije manja nego kod uzoraka koji imaju istu relativnu gustoću i masu, ali mnogo veću brzinu izvođenja pokusa (1200MATv). Drugim riječima, ako "rjeđe" pjene tlačimo većim brzinama one apsorbiraju veću količinu energije. Drugačiji se rezultati dobivaju kada se promatra ponašanje pjena relativne gustoće 0,3 (1430MATm i 1430MATv), gdje podaci za te uzorke prikazuju osjetno manju količinu apsorbirane energije kod karakterističnih sila (100kN, 150kN, 200kN). Što se brzine izvođenja tlačnog pokusa za spomenute uzorke tiče, opaža se da je manja brzina ($v_1 = 6\text{mm/min}$) pogodnija za apsorpciju energije udara nego veća brzina ($v_2 = 60\text{mm/min}$). Drugim riječima, ako "gušće" pjene tlačimo manjim brzinama one apsorbiraju nešto veće količine energije, nego kad ih podvrgnemo većim brzinama tlačnog pokusa.

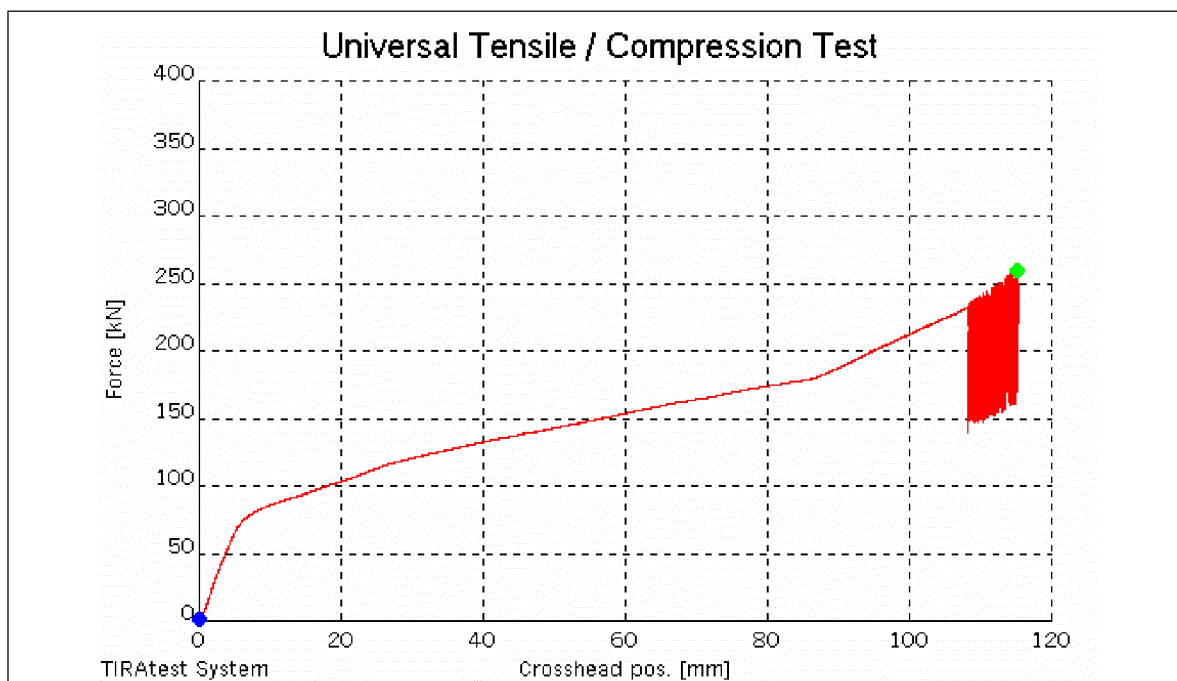
Istraživanje bi se trebalo nastaviti dalje u pravcu određivanja optimalne relativne gustoće za određenu namjenu. Samo ispitivanje metalnih pjena treba

provoditi pod strožim režimima jer je uočeno da rezultati veoma variraju, što je posljedica problema kod proizvodnje jer nije u moguće vladati ključnim parametrima procesa izrade. Zbog toga se dobivaju neujednačene i nepredvidive strukture što rezultira varijacijama svojstava. Čim se tehnologija proizvodnje usavrši do te mjere da se može proizvesti pravilan raspored ćelija kontroliranog promjera unutar proizvoda i ako se uspije multiplicirati takav proizvod, može se govoriti o metalnim pjenama kao značajnom otkriću na području znanosti o materijalima.

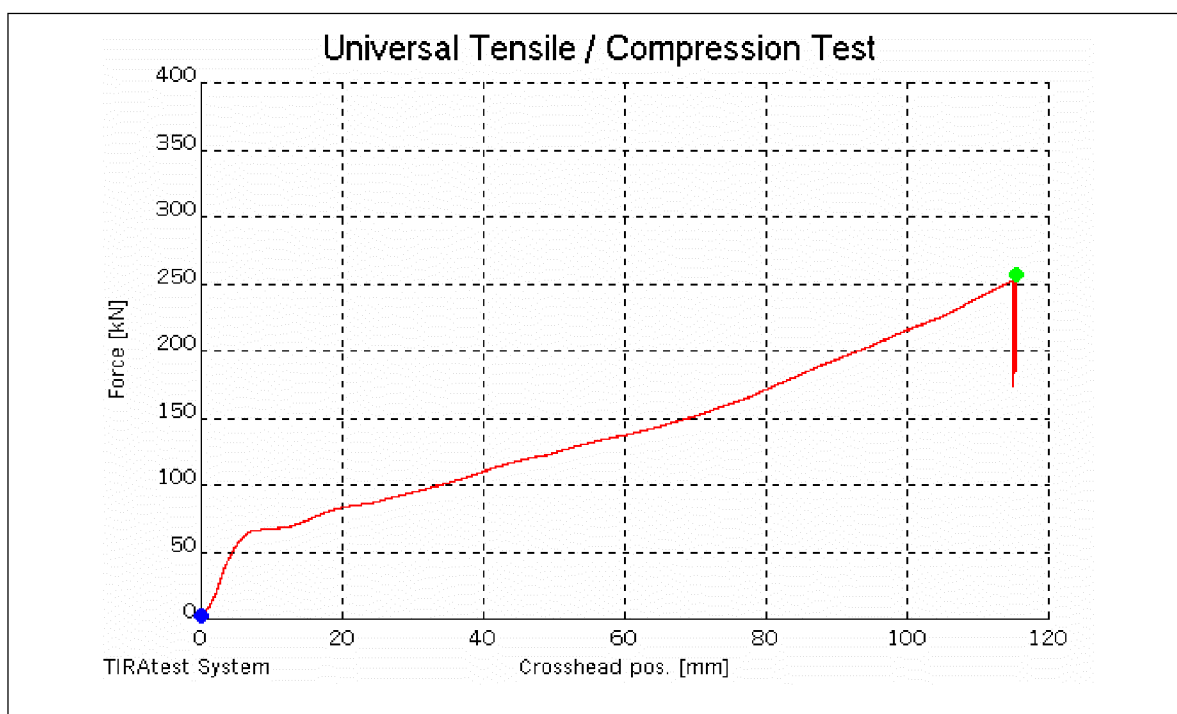
8. LITERATURA

- [1.] <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1838/5.full.pdf+html>
- [2.] Prusac, D, Otpornost na trošenje keramičkih prevlaka na aluminijskim pjenama, Zagreb, 2007.
- [3.] Filetin, T, Kramer, I, Marić, G: *Metalne Pjene*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [4.] <http://www.mf.unze.ba/casopis/Broj27/metalne%20pjene.pdf>
- [5.] <http://www.shinko-wire.co.jp/product/alporas-eng.pdf>
- [6.] <http://www.metalfoam.net/papers/koza04a.pdf>
- [7.] <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-11282004-014635/unrestricted/etd.pdf>
- [8.] <http://www.metalfoam.net/papers/kenesei04a.pdf>
- [9.] Filetin, T, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [10.] Skupina autora, IP4, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [11.] <http://www.metalfoam.net/papers/dannemann00.pdf>
- [12.] <http://www.google.hr/url?sa=t&source=web&ct=res&cd=2&ved=0CBAQFjAB&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.114.1672%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ei=RYafS9WJJ6TYmwPfkpTuDA&usg=AFQjCNF1VOZC0S-TFpuEObl8MpH3sMRgqxg>
- [13.] <http://zernike.eldoc.ub.rug.nl/FILES/root/2001/IntJMechSciOnck2/2001IntJMechSciOnck2.pdf>
- [14.] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- [15.] http://www.google.hr/url?sa=t&source=web&ct=res&cd=2&ved=0CAwQFjAB&url=http%3A%2F%2Fdspace.mit.edu%2Fbitstream%2Fhandle%2F1721.1%2F28244%2F50633978.pdf%3Fsequence%3D1&ei=jYefS-uANpSM_AbmvITyDQ&usg=AFQjCNER3OM7A2BHq3fltVvhVBO7LhB1OQ
- [16.] http://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/a063_lehmhus2002.pdf
- [17.] <http://www.metalfoam.net/papers/hanssen02.pdf>
- [18.] <http://www.mat.ensmp.fr/Pages/sf/publi/blazy04.pdf>

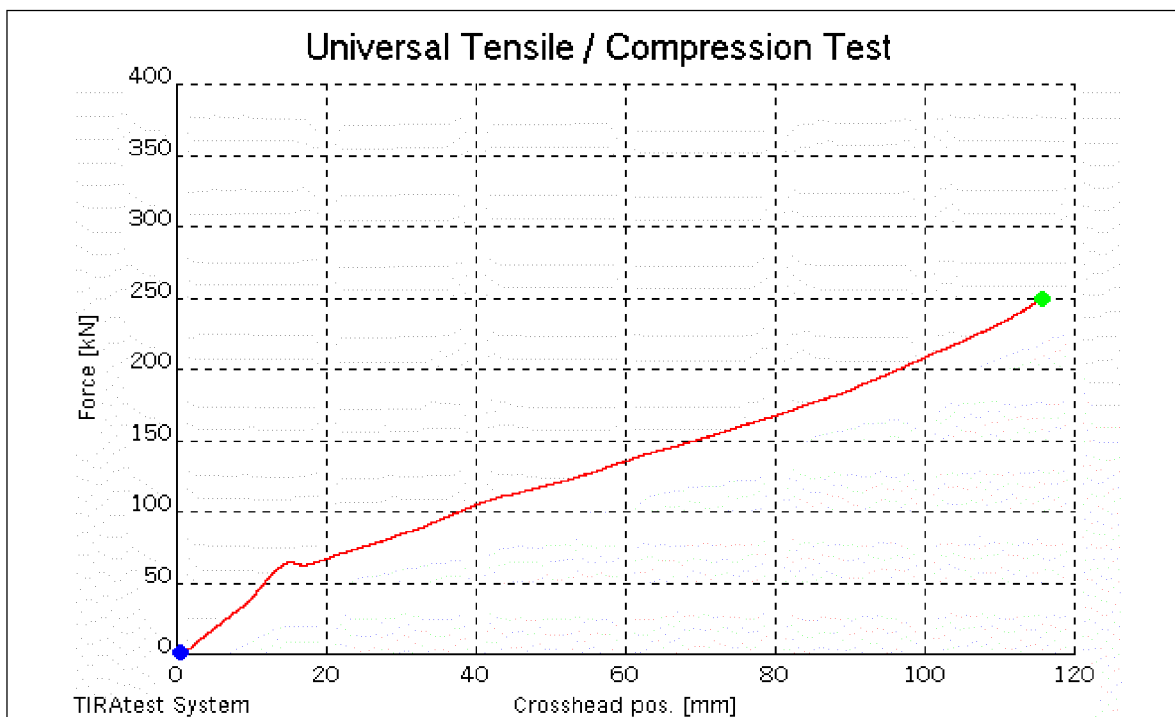
9. PRILOG



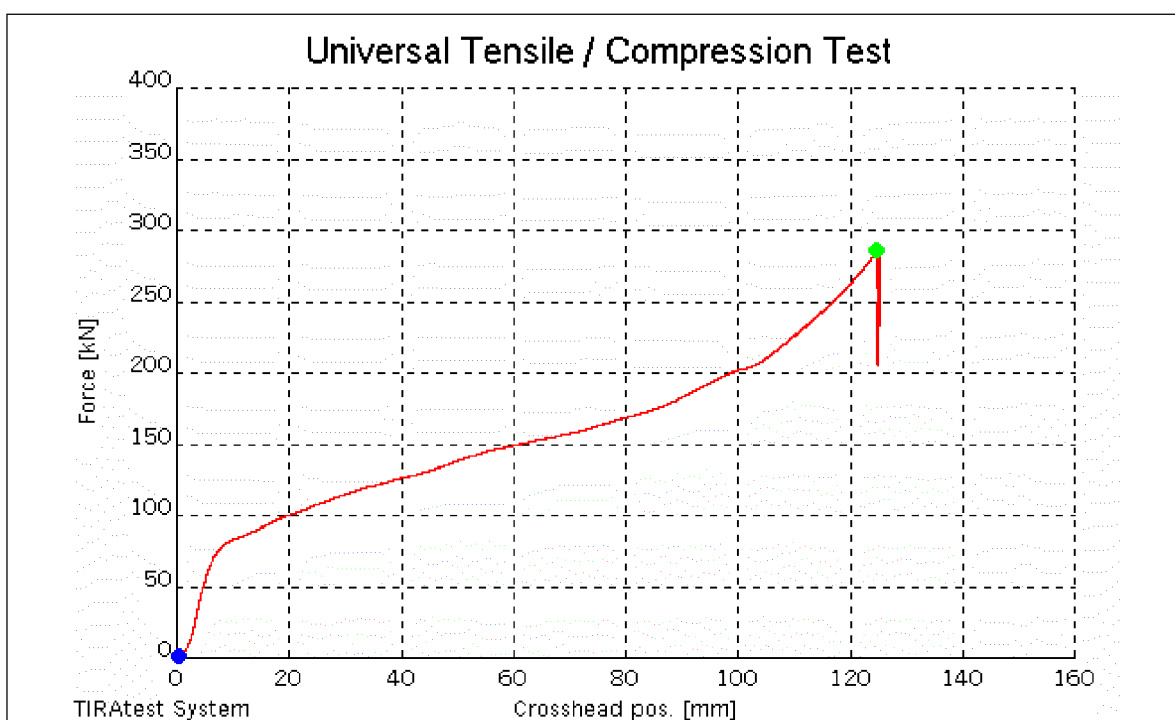
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1200MAT1m



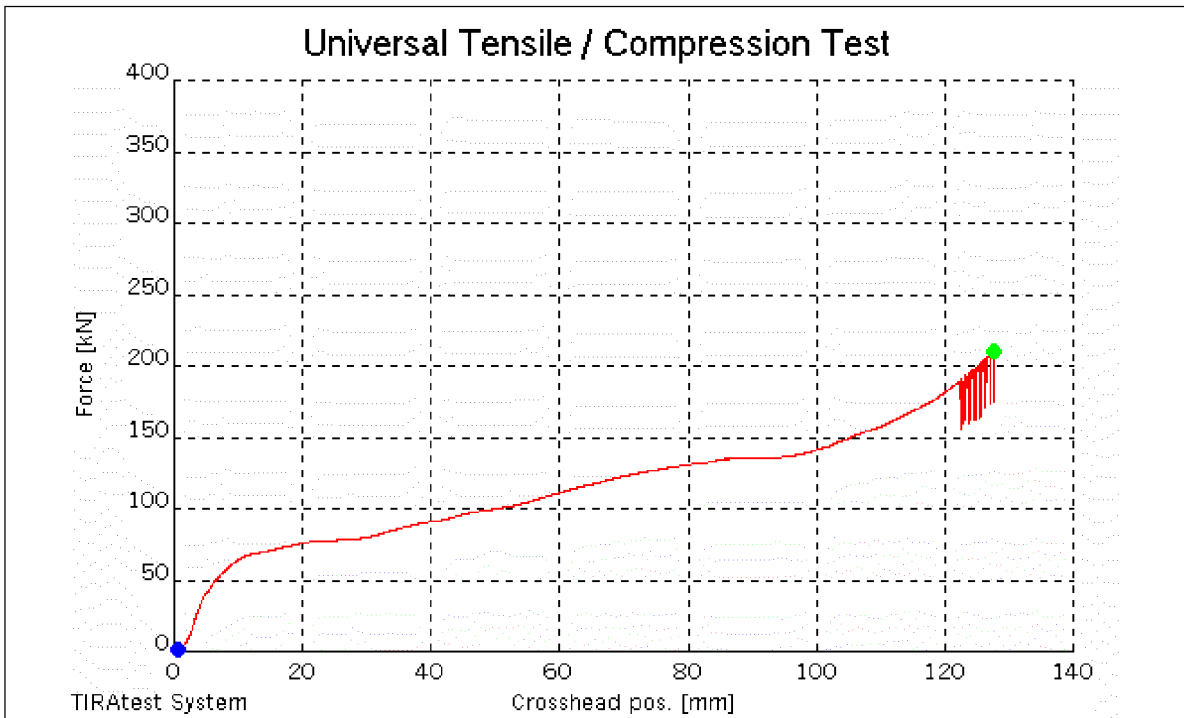
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1200MAT2m



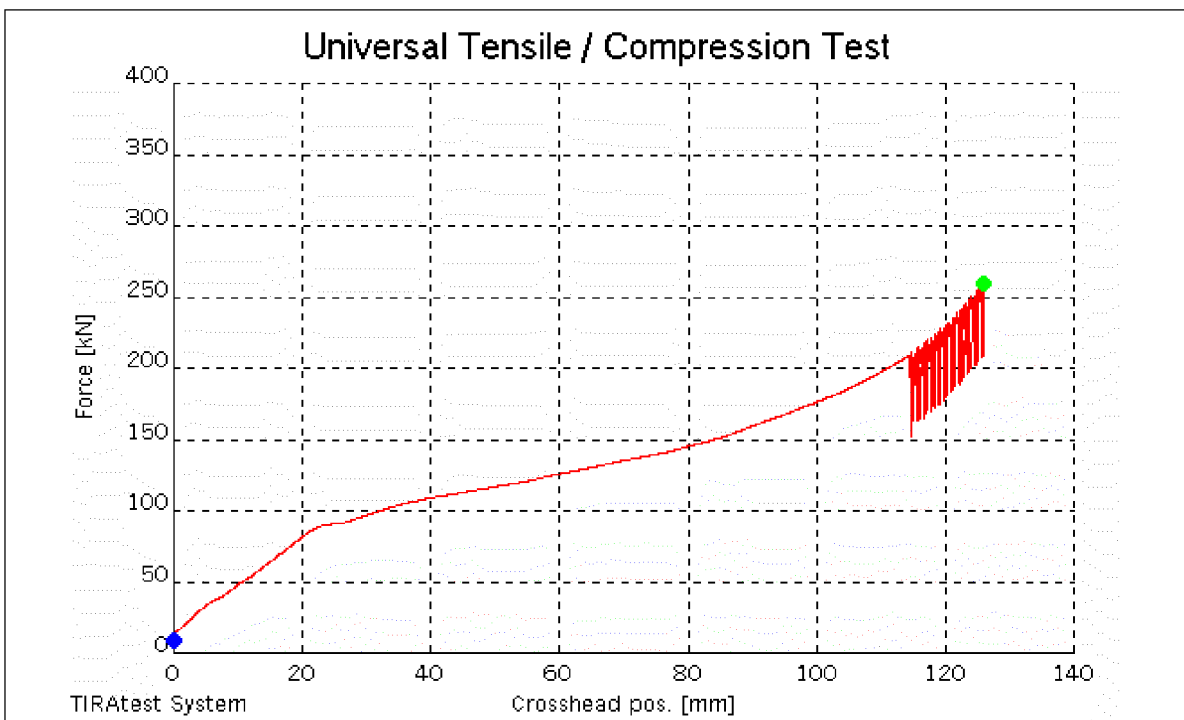
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1200MAT3m



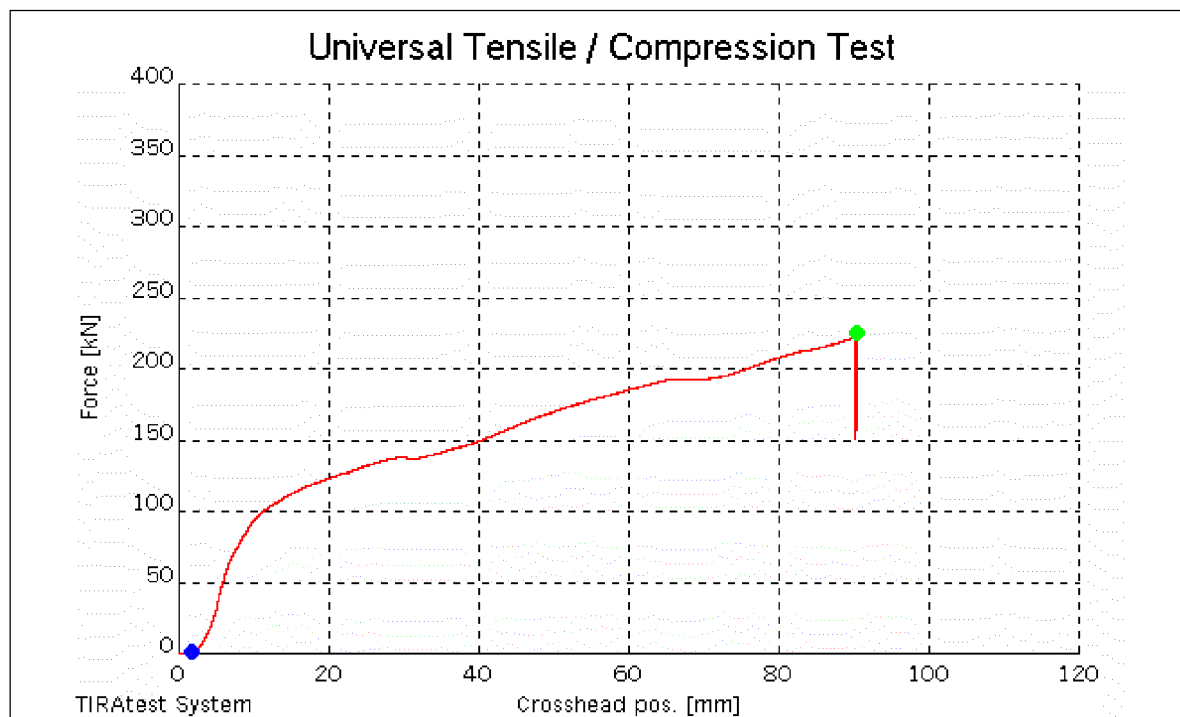
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1200MAT1v



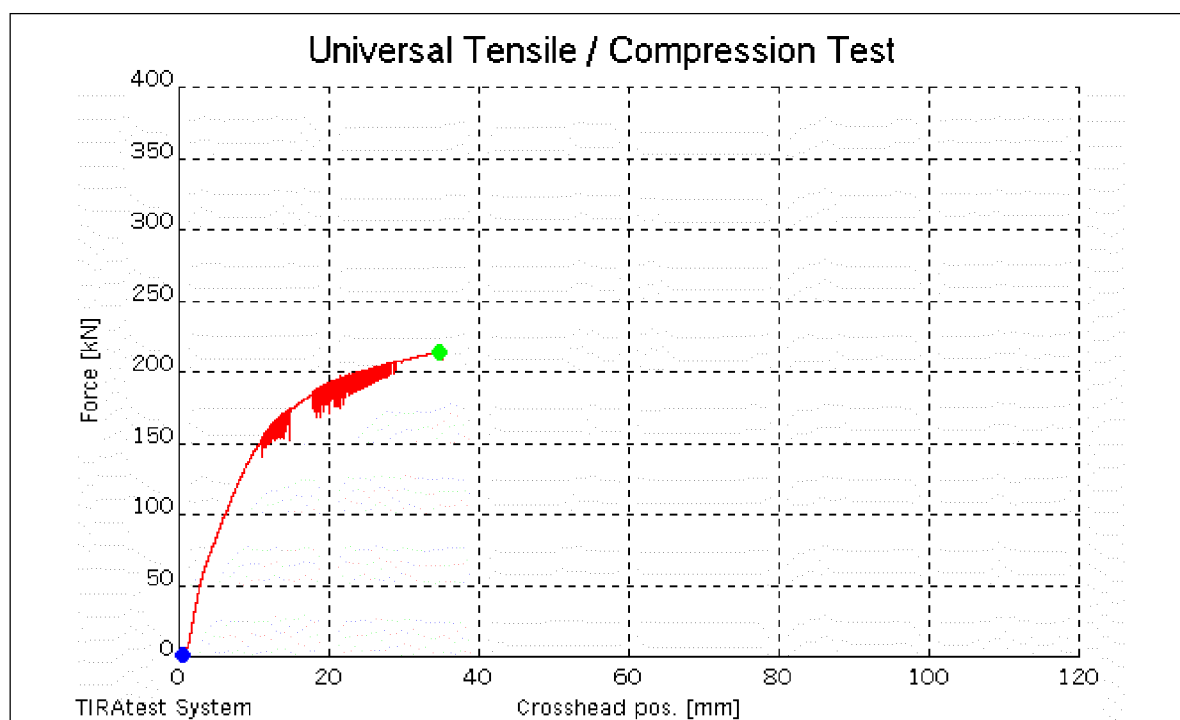
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1200MAT2v



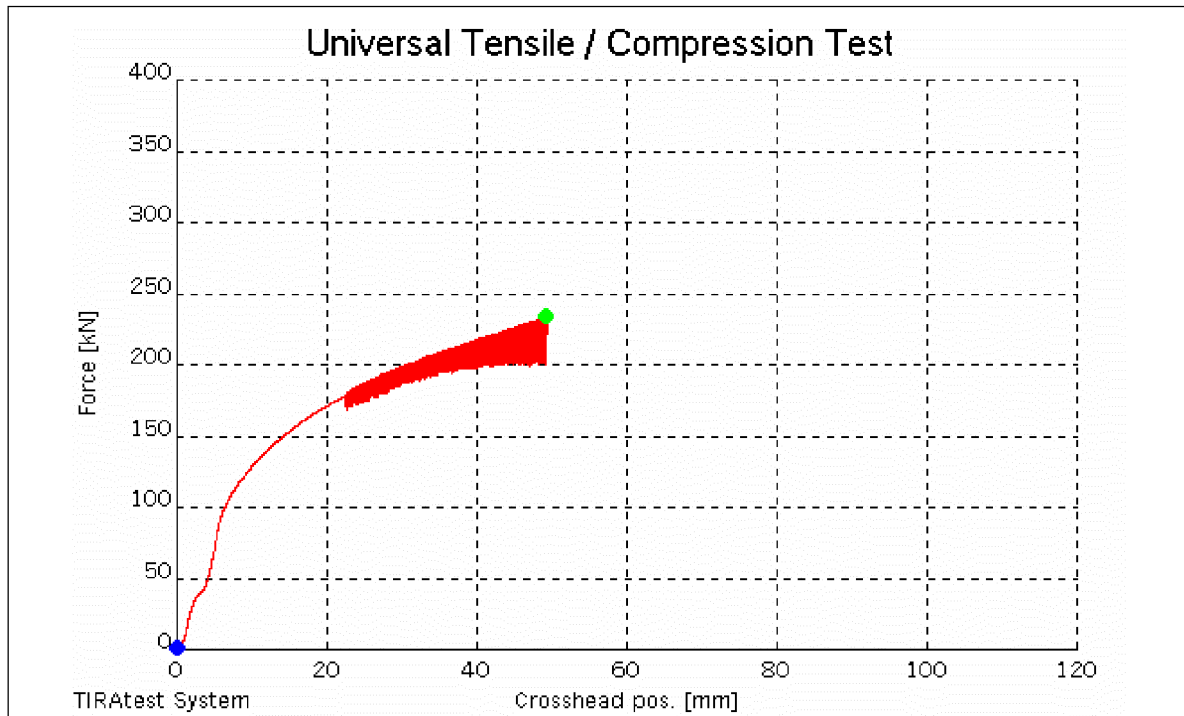
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1200MAT3v



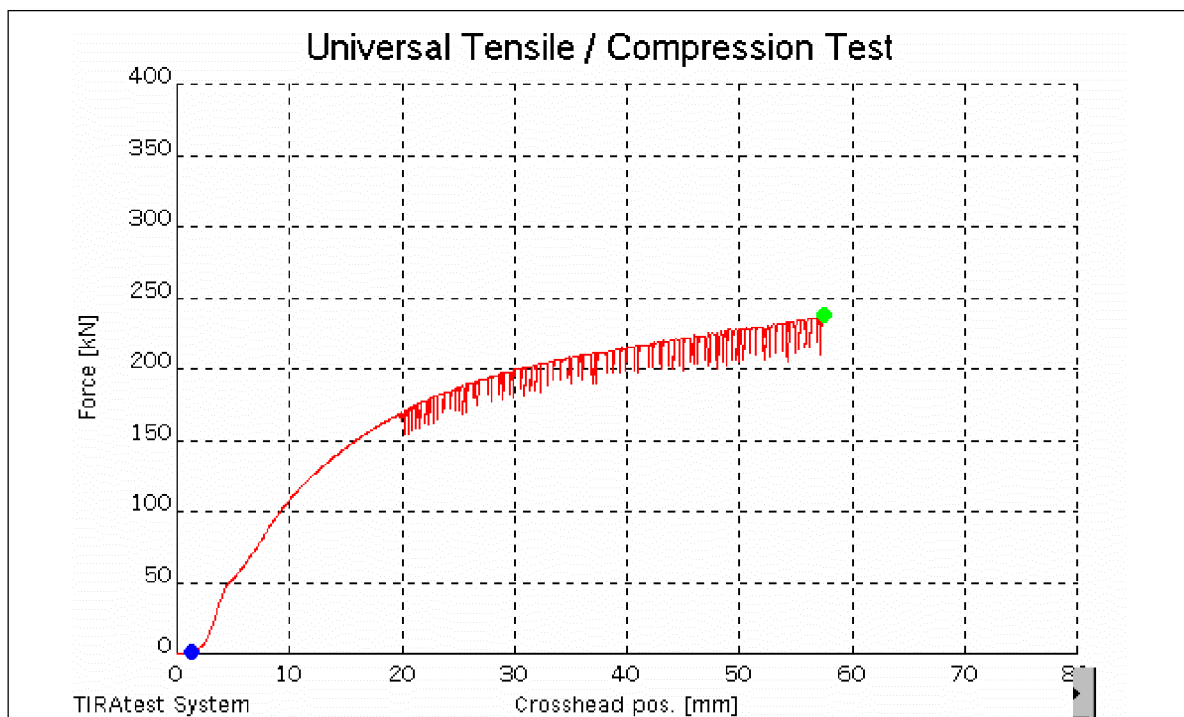
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1430MAT1m



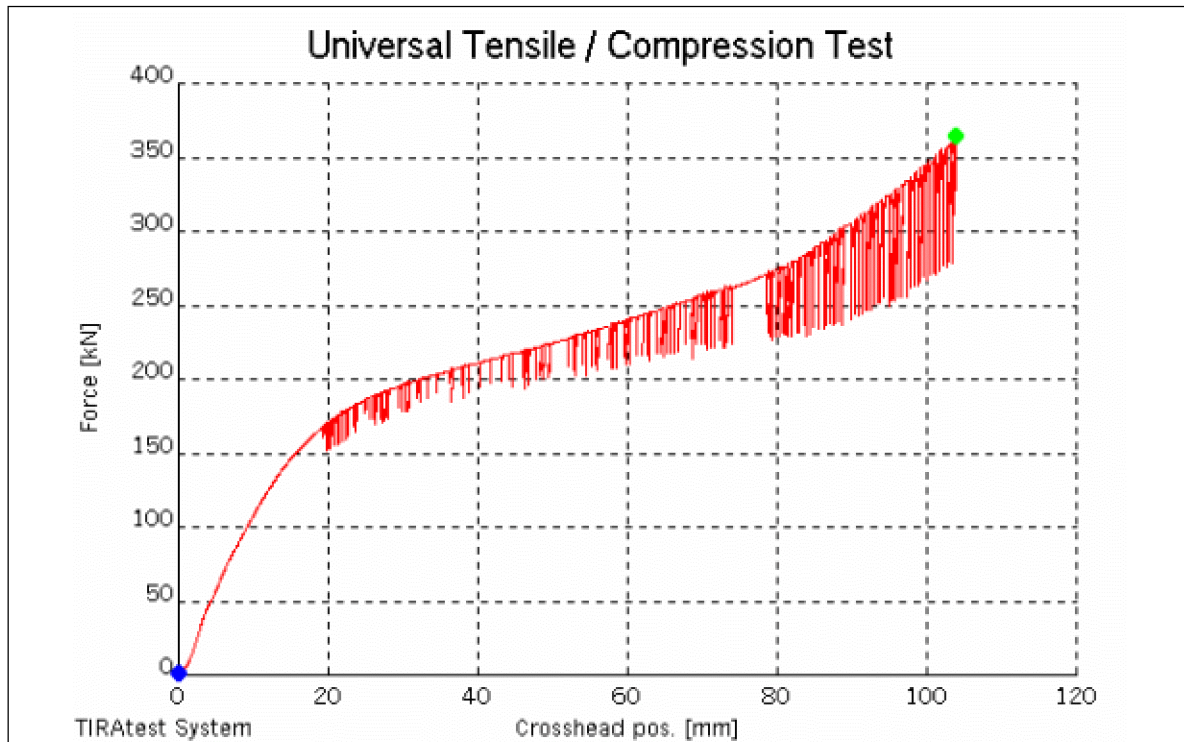
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1430MAT2m



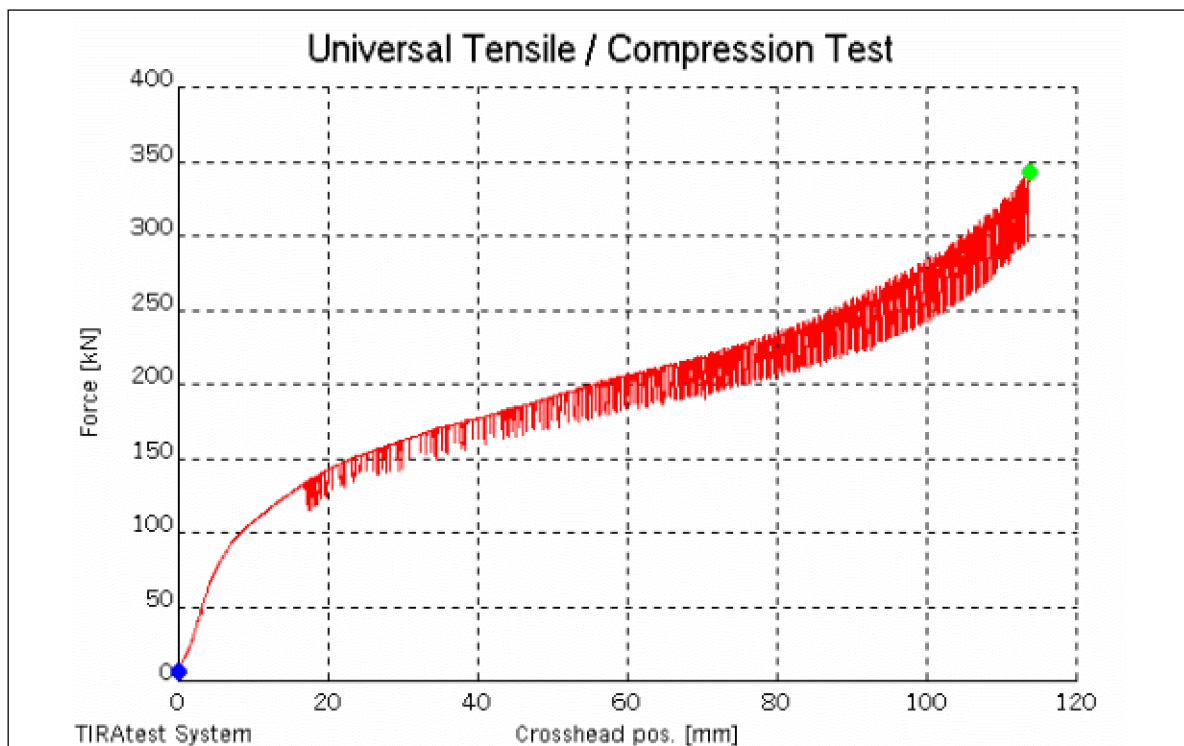
Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1430MAT3m



Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1430MAT1v



Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1430MAT2v



Dijagram TLAČNA SILA – SKRAĆENJE za uzorak od aluminijske pjene 1430MAT3v