

Mogućnosti ojačanja metalnih pjena

Lukač, Josip

Undergraduate thesis / Završni 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:235:950198>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Lukač

Zagreb, 2010

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

MOGUĆNOSTI OJAČANJA METALNIH PJENA

Voditelj rada:

Doc. Dr. sc. Gojko Marić

Student

Josip Lukač

Zagreb, 2010

Sažetak

Metalne pjene su novi i još u potpunosti neistraženi oblik materijala koji se tek treba dokazati u primjeni. Razvijaju se na osnovi oponašanja strukture prirodnih ćelijastih materijala. Problemi u proizvodnji i primjeni proizlaze iz još nepotpunog ovladavanja parametrima procesa izrade. Zato se dobivaju neujednačena i nepredvidljiva svojstva.

U eksploataciji metalnih pjene izrazito su nepovoljna vlačna naprezanja, zato su u ovom radu ispitivane mogućnosti ojačanja metalnih pjena koje preuzimaju vlačna naprezanja pri savojnom opterećenju. Kao ojačanja korištena su staklena i ugljična vlakna, te su svojstva ojačanih uzoraka uspoređena s svojstvima uzoraka bez ojačala.

Izjava

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

Ovom prilikom zahvaljujem se docentu dr. sc. Gojku Mariću na stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se laborantu Božidaru Bušetinčanu na pomoći tijekom izrade uzoraka, te laborantu Romanu Divjaku na pomoći pri ispitivanju uzoraka.

Josip Lukač

U Zagrebu, 28. lipnja 2010.

Sadržaj

Popis oznaka	I
Popis slika	III
Popis tablica	V
1. UVOD	1
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA	3
2.1 Ubrizgavanje plina u taljevinu	5
2.2 Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini	6
2.3 Plinom oslobođene čestice u polučvrstoj fazi	7
2.4 Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera	9
2.5 Taloženje materijala na ćelijaste praoblake	10
3. SVOJSTVA METALNIH PJENA	11
3.1 Krutost	13
3.2 Tlačna čvrstoća	15
3.3 Vlačna čvrstoća	19
3.4 Ojačane metalne pjene	21
3.5 Sendvič konstrukcije	25
3.6 Toplinska svojstva	26
3.7 Zvučna svojstva	27
3.8 Prigušenje vibracija	28
4. PRIMJENA METALNIH PJENA	29
5. EKSPERIMENTALNI DIO	32
5.1 Idejni projekt	32
5.2 Izrada uzoraka	33
5.3 Ispitivanje uzoraka na savijanje	39
5.4 Proračun savojne čvrstoće	45
6. ZAKLJUČAK	47
7. LITERATURA	48
8. PRILOZI	49

Popis oznaka

A ,	ploština, mm ²
C_p ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, J/kgK
d_0 ,	promjer ispitnog uzorka
E ,	modul elastičnosti, GPa
E_f ,	modul savitljivosti, GPa
f ,	frekvencija, Hz
F ,	sila, N
F_m ,	maksimalna sila, N
G ,	modul smičnosti, GPa
H ,	tvrdoća
K_{IC} ,	lomna žilavost, MPa·m ^{1/2}
L ,	latentna toplina taljenja, kJ/kg
L_s ,	razmak između oslonaca, mm
m ,	masa, kg
m ,	konstanta propagacije
M_{smax} ,	maksimalni moment savijanja, Nm
R_d ,	dinamička izdržljivost, MPa
R ,	električni otpor, Ω
R_e ,	granica razvlačenja, MPa
R_{et} ,	granica stlačivanja, MPa
R_m ,	vlačna čvrstoća, MPa
R_{mt} ,	tlačna čvrstoća, MPa
R_{ms} ,	savojna čvrstoća, MPa
S_0 ,	ploština poprečnog presjeka, mm ²
T ,	temperatura, K
T_m ,	talište, K
T_{max} ,	maksimalna radna temperatura, K
T_{min} ,	minimalna radna temperatura, K
v ,	brzina, m/s

V ,	volumen, mm ³
W	moment otpora, mm ³
α ,	koeficijent toplinske rastezljivosti, 1/K
α_1 ,	lokalni koeficijent prijelaza topline, W/m ² K
ε ,	istezanje, mm/mm
η ,	konstanta prigušenja
η^c ,	faktor gubitka, %
λ ,	koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK
ν ,	Poissonov faktor
ρ ,	gustoća metalne pjene, kg/m ³
ρ_s ,	gustoća neporoznog metala, kg/m ³
ρ/ρ_s ,	relativna gustoća
σ ,	naprezanje, MPa

Popis slika

Slika 1. Prikaz strukture kosti (A) i metalne pjene (B)	1
Slika 2. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene	2
Slika 3. Stablo metalnih pjena	3
Slika 4. Vrijednosti veličine ćelija i relativne gustoće koje se mogu dobiti određenim proizvodnim postupkom	4
Slika 5. Proces nastajanja metalne pjene ubrizgavanjem plina u taljevinu	5
Slika 6. Proces nastajanja metalne ALPORAS pjene	6
Slika 7. Proces nastajanja FOAMINAL – ALULIGHT metalne pjene	7
Slika 8. Sendvič konstrukcije s jezgrom od metalne pjene FOAMINAL-ALULIGHT	8
Slika 9. Proces preciznog lijevanja metalne pjene s otvorenim ćelijama - ERG DUOCEL metoda	9
Slika 10. Proces nastajanja Ni metalne pjene (INCO pjena)	10
Slika 11. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena; neosno opterećeno na tlak	13
Slika 12. Dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje komercijalnih Al pjena	15
Slika 13. Dijagrami "naprezanje – deformacija" pri tlačnom opterećenju Al pjena	17
Slika 14. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći	17
Slika 15. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja materijala ćelija (R_e) o relativnoj gustoći	18
Slika 16. Dijagram naprezanje – istezanje Al pjena	19
Slika 17. Krivulja naprezanje – istezanje s udjelom lomne površine ALPORAS pjene (uzorci bez ureza)	20
Slika 18. Odnos transverznog i longitudinalnog istezanja	20
Slika 19. Parametar S - omjer krutost/masa za različite materijale i opterećenja	21
Slika 20. Oblici mreža od nehrđajućeg čelika za ojačanje Al pjena	22
Slika 21. Utjecaj ojačanja na ponašanje pri savijanju grede od AlSi12 pjene poroznosti od 81 %	23
Slika 22. Deformacija uzoraka AlMg1Si0,6 pjene, poroznosti 85 %, nakon udarnog ispitivanja (maksimalna energija 15 J) za različite položaje ojačanja	24

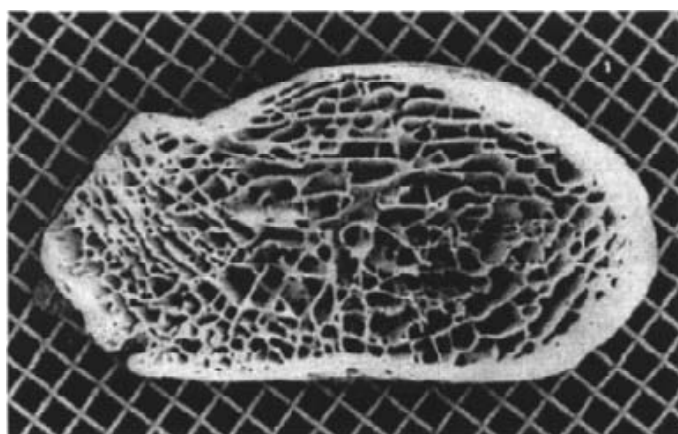
Slika 23. Svojstva ojačane AlSi12 pjene debljine 15 mm, poroznosti 85 % u usporedbi s Al limom debljine 3 mm; AlSi12 debljine 15 mm, poroznosti 80 %; sendvič AlSi12 debljina pjene 11 mm, poroznosti 80 %, vanjskih Al limova debljine 1 mm	24
Slika 24. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene	25
Slika 25. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al	26
Slika 26. Sendvič poluproizvodi od metalne pjene	30
Slika 27. Felga automobila s jezgrom od ALULIGHT pjene	30
Slika 28. Primjena metalne pjene u autoindustriji za ojačanje okvira	31
Slika 29. Izmjenjivač topline napravljen od DUOCEL Al-pjene	31
Slika 30. Masa narezanog prekursora potrebna za jedan ispitni uzorak iznosi 75 g	33
Slika 31. Za ojačalo su korištena komercijalno dostupna staklena i ugljična vlakna	34
Slika 32. Provlačenje ugljičnih vlakana kroz "usmjerivače" od prekursora	34
Slika 33. Improvizirani "usmjerivači" ugljičnih vlakana od prekursora u kalupu	35
Slika 34. Prethodni postupak je ponovljen sa staklenim vlaknima	35
Slika 35. Zabrtvljeni uzorak u kalupu	36
Slika 36. Kalup u peći zagrijanoj na temp. od 790 °C	36
Slika 37. Intenzivno hlađenje uzorka u vodi	37
Slika 38. Gotovi ispitni uzorci aluminijske pjene	37
Slika 39. Kidalica na kojoj su uzorci ispitani na savijanje	39
Slika 40. Prikaz dimenzija uzoraka i oslonaca pri ispitivanju u 3 točke	40
Slika 41. Uzorak za vrijeme ispitivanja	41
Slika 42. Grafičko sučelje programa kidalice ispisuje dijagram sila-progib u realnom vremenu za vrijeme ispitivanja	41
Slika 43. Uzorci nakon ispitivanja na savijanje	42
Slika 44. Aproksimirani dijagram sila-progib za uzorke bez ojačala	43
Slika 45. Aproksimirani dijagram sila-progib za uzorke ojačane staklenim vlaknima	43
Slika 46. Aproksimirani dijagram sila-progib za uzorke ojačane ugljičnim vlaknima	44
Slika 47. Aproksimirani dijagram sila-progib prosječnih vrijednosti svih uzoraka s obzirom na vrstu ojačala	44

Popis tablica

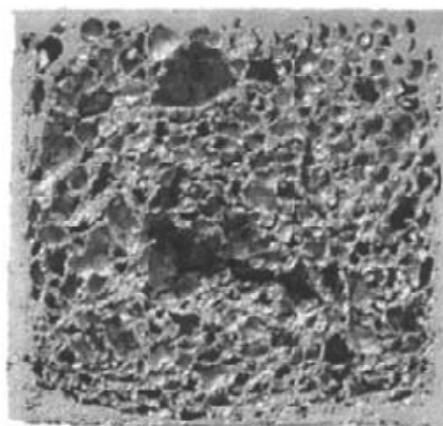
Tablica 1. Vrijednosti svojstava metalnih pjena	12
Tablica 2. Izrazi za izračunavanje svojstava metalnih pjena	12
Tablica 3. Mogućnosti primjene metalnih pjena	29
Tablica 4. Popis uzoraka i svojstva s obzirom na ojačala	38
Tablica 5. Vrijednosti maksimalnih sila (F_m) izmjerenih na kidalici	42
Tablica 6. Savojna čvrstoća uzoraka prema vrsti ojačala	46

1. UVOD

Današnjim razvojem tehnologije i uporabom novih oblika poznatih materijala došlo je do razvoja metalnih pjena. Metalne pjene su novi oblik materijala koji se razvijaju oponašanjem strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala kao što su drvo, kamen, kost, koralj itd. čija su svojstva prilagođena okolnim uvjetima. Zato metalne pjene predstavljaju zanimljivo i još nedovoljno istraženo područje na kojem je moguć daljnji razvoj i napredak. Temeljna svojstva im proizlaze iz vrste osnovnog materijala ćelija, oblika ćelija (otvorene i zatvorene) te načina proizvodnje. Osnovna svojstva su im visoka poroznost od 40 do 90 %, izrazito niska gustoća, prilagodljiva toplinska svojstva, vatrootpornost, dobra električna vodljivost, odlično prigušenje energije udara, vibracija i zvuka, visoka krutost kod sendvič konstrukcija. Koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova vozila, letjelica, brodova, u graditeljstvu, itd..



A



B

Slika 1. Prikaz strukture kosti (A) i metalne pjene (B) [1]

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 lošeg kvalitete. Metalne pjene nude zanimljivu perspektivu zbog kombinacije osobina koje su povezane sa osobinama metala s jedne strane i poroznom strukturom s druge strane.

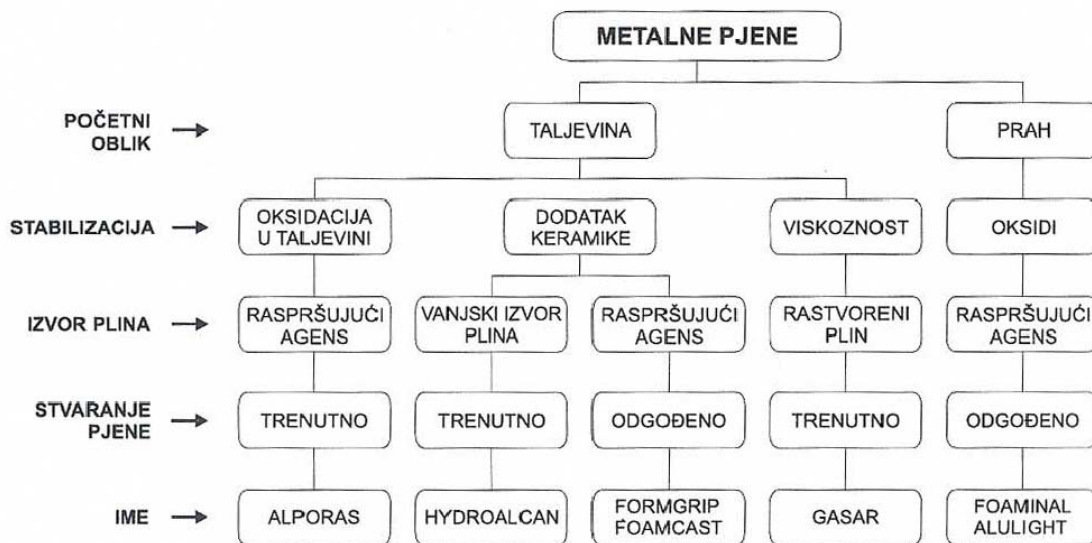
Metalne pjene se mogu proizvesti iz gotovo svih vrsta materijala koji postoje u obliku praha, ali danas su komercijalno dostupne uglavnom metalne pjene na bazi aluminija (Al) i nikla (Ni), no metalne pjene mogu se proizvesti iz gotovo svih vrsta metala koji postoje u obliku praha. Po posebnoj narudžbi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

U ovom radu ispitati će se mogućnosti ojačanja metalnih pjena, općenite mogućnosti ojačanja u teoretskom djelu te naravno izradu uzoraka od aluminijske pjene te ispitivanje njihove savojne čvrstoće. Za ojačanja uzoraka koristila su se staklena i ugljična vlakna, samo lokalno u vlačnoj zoni, s obzirom da na ovaj način ne dolazi do značajnog povećanja mase. Ovo je još uvijek novo i neistraženo područje, te parametri proizvodnje još nisu potpuno definirani. Nadam se da ćemo doći do korisnih informacija i proširivanja znanja u proizvodnji metalnih pjena. Čelijasta struktura omogućuje optimalnu kombinaciju mehaničkih svojstava i funkcionalnosti pri minimalnoj težini.



Slika 2. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [2]

2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA



Slika 3. Stablo metalnih pjena [3]

Početne sirovine za proizvodnju metalnih pjena mogu biti u obliku taljevine ili praha. Upjenjivanje je moguće jedino iz tekuće faze tako da se i prah mora rastaliti, izvor plina je neophodan za stvaranje šupljina unutar rastaljenog metala. On može imati vanjski izvor ili se u taljevinu može dodati raspršujući agens koji pospješuje pjenjenje.

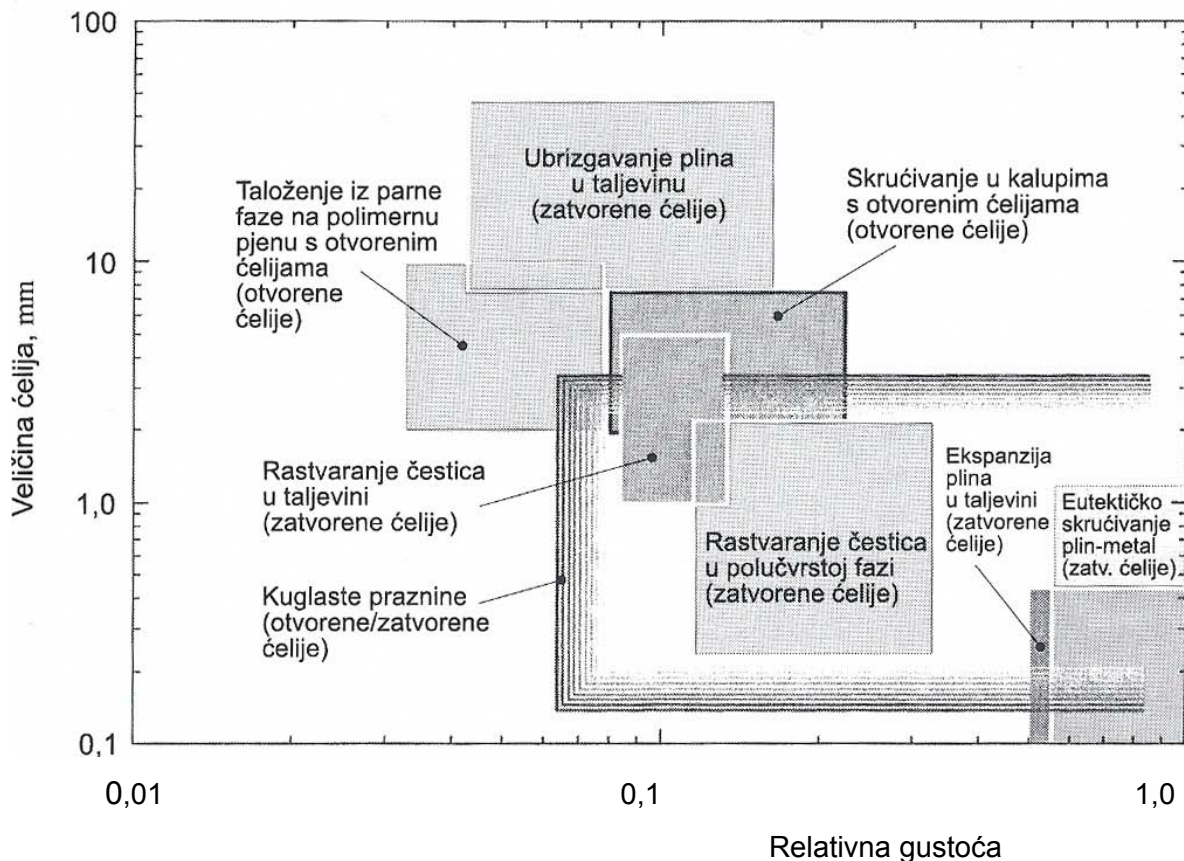
Očekuje se znatan napredak i razvoj metalnih pjena, uz povećanje njihovih vrsta na tržištu. Kombinacijom više metala može se dobiti širok raspon svojstava, pa je moguće i prilagoditi materijal za točno određeni proizvod.

Potrebno je pronalaženje novih, djelotvornijih i bolje upravljivih procesa za proizvodnju metalnih pjena kako bi se postigla još bolja i točno određena svojstva.

Danas je poznato devet načina proizvodnje metalnih pjena od kojih je pet u komercijalnoj uporabi, dijele se na 4 područja:

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

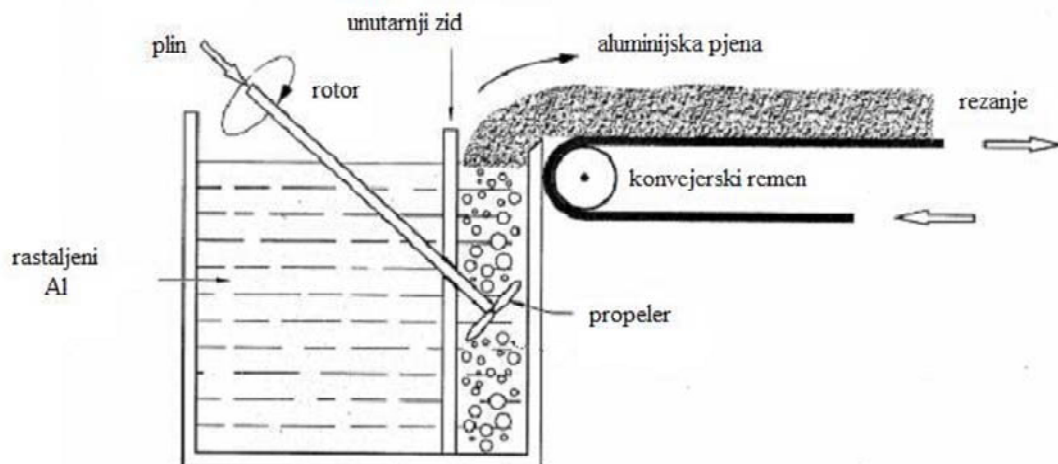
Svakim od ovih postupaka može se utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija te na relativnu gustoću. U radu se navodi tehnologija izrade pjena pjenjenjem prekursora u kalupu koja se je koristila u eksperimentalnom djelu rada, a opisani su i ostali postupci proizvodnje metalnih pjena.



Slika 4. Vrijednosti veličine ćelija i relativne gustoće koje se mogu dobiti određenim proizvodnim postupkom [4]

2.1. UBRIZGAVANJE PLINA U TALJEVINU

U taljevinu se dodaju sitne nerastvorljive čestice (SiC , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , TiB_2) promjera 0,5 do 25 μm , one povećavaju viskoznost aluminija, sprečavaju sušenje opne mjehurića i omogućuju da pjena ostane stabilna do skrućivanja mjehurića. Volumni udio čestica iznosi 10-20%, prilikom unošenja se miješaju kako bi se ravnomjerno raspodijelile. Zatim se u taljevinu upuhuje plin rotirajućim ubrizgavalicama i vibrirajućim raspršivačima. Plinovi koji se koriste su zrak, CO_2 , O_2 , inertni plinovi (npr. argon), N_2 , pa čak i vodena para. Mješavina metala i mjehurića ispliva na površinu gdje se metal suši. Pjena izlazi na površinu pomoću pomičnih traka (konvejskih remena). Ovim postupkom dobivaju se pjene gustoće od 69 kg/m^3 do 540 kg/m^3 , pore su promjera 3-25 mm, debljina stjenke iznosi 50-85 μm . Na veličinu ćelija utječe se protokom plina, brzinom ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača i ostalim parametrima.

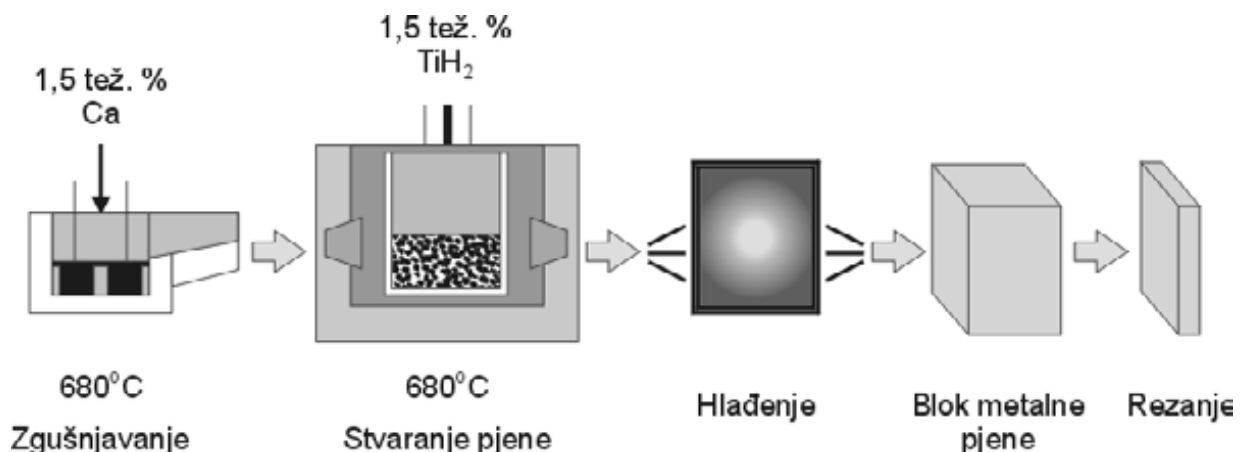


Slika 5. Proces nastajanja metalne pjene ubrizgavanjem plina u taljevinu [4]

Nedostatak ovog postupka je mogućnost dijagonalnog deformiranja ćelija što negativno utječe na mehanička svojstva koja postaju izotropna. Prednost ovog procesa je niska cijena i mogućnost proizvodnje komada većih dimenzija. Upjenjeni materijal sa zatvorenom površinom može se rezati na odgovarajuće oblike, pri čemu se otvaraju ćelije što je u nekim slučajevima nedostatak.

2.2. PLINOM OSLOBODENE ČESTICE RASTVORENE U TALJEVINI (ALPORAS pjena)

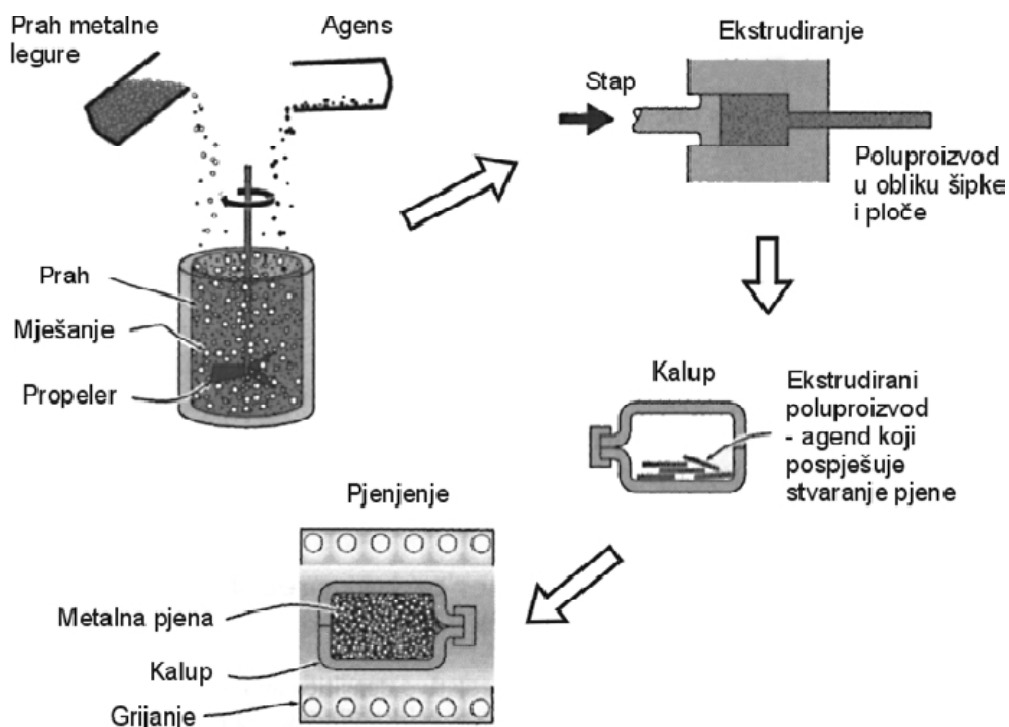
U ovom procesu taljevini se dodaje agens koji pospješuje upjenjivanje. Pod utjecajem povišene temperature on se raspada i tvori plin. U početnoj fazi procesa, pri temperaturi tališta aluminija u rasponu od 670 °C do 690 °C, u taljevinu se dodaje oko 1,5% Ca. Nakon nekoliko minuta procesa, viskoznost se znatno povećava zbog spojeva CaO, CaAl_2O_4 ili intermetalnog Al_4Ca . Kao raspršujući agens se dodaje otprilike 1% do 2% TiH_2 koji se iznad temperature od 465 °C rastvara na Ti i plinoviti H_2 . Mjehurići H_2 stvaraju metalnu pjenu s zatvorenim ćelijama, ako je sušenje dovoljno sporo. Promjer dodanih čestica je 5-20 μm , nastala pjena može se dalje obrađivati, proces je brz i odvija se pod konstantnim tlakom. Gustoća ovih pjena može biti od 180 kg/m^3 do 240 kg/m^3 , veličina ćelija od 0,5 mm do 5 mm. Proces je zasad ograničen samo na Al pjene komercijalnog naziva **ALPORAS**. Ćelije su zatvorene i valjanjem mogu postići dobra zvučno izolacijska svojstva. Postupak je nešto skuplji zbog relativno skupog Ca i TiH_2 .



Slika 6. Proces nastajanja metalne ALPORAS pjene [5]

2.3. PLINOM OSLOBOĐENE ČESTICE U POLUČVRSTOJ FAZI (FOAMINAL – ALULIGHT pjena)

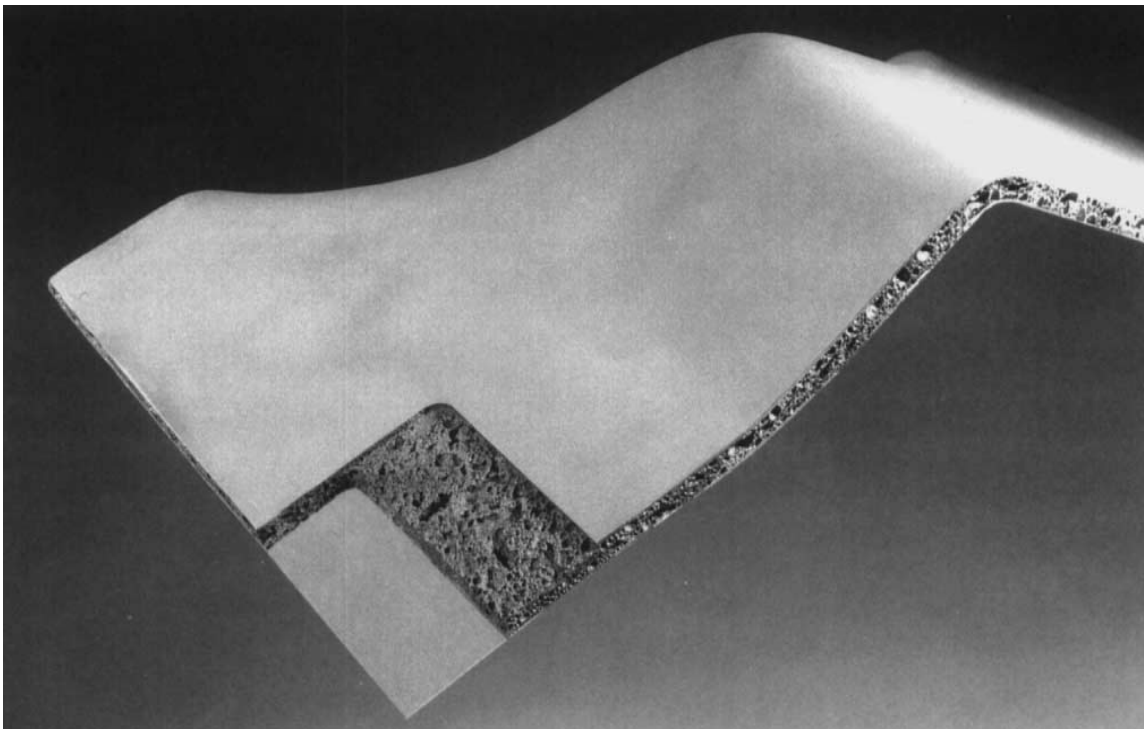
Pjenasti materijali mogu se izrađivati i od metalnog praha. Na samom početku procesa se miješa prah čistog metala ili legure te agens koji pospješuje pjenjenje. Kao agens se najčešće rabi TiH_2 . Nastala mješavina se zatim sabija u poluproizvod u obliku šipke ili pločice. Tehnike sabijanja u metalnu matricu mogu biti različite: neaksijalno ili izostatičko tlačenje, ekstrudiranje, valjanje praha itd.. Takav poluproizvod mora biti vrlo pažljivo napravljen, jer početna poroznost ili druge nepravilnosti uzrokuju lošije rezultate u kasnijim fazama procesa. Poluproizvod se reže na male komade i stavlja u kalup gdje se zagrijava na temperaturu nešto višu od solidus temperature legure. Agens se raspada na Ti i plinoviti H_2 koji uzrokuje širenje i stvaranje visoko poroznog materijala. Trajanje procesa može biti od nekoliko sekundi do nekoliko minuta, ovisno o temperaturi i veličini poluproizvoda. Proizvod zadržava oblik kalupa, ima relativnu gustoću od 0,08 naviše i zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm.



Slika 7. Proces nastajanja FOAMINAL – ALULIGHT metalne pjene [4]

Ovaj postupak nije ograničen samo na aluminij, već se njime mogu proizvoditi pjene na bazi cinka, mjedi, olova, zlata i drugih metala. Upjenjivanje se događa u polučvrstom stanju zato što se TiH_2 raspada na $465\text{ }^\circ\text{C}$ što je mnogo niže od tališta aluminija ($660\text{ }^\circ\text{C}$). To pospješuje upjenjivanje čvrstog aluminija koji se zatim zagrijava do taljenja. Hlađenjem se pjena stabilizira.

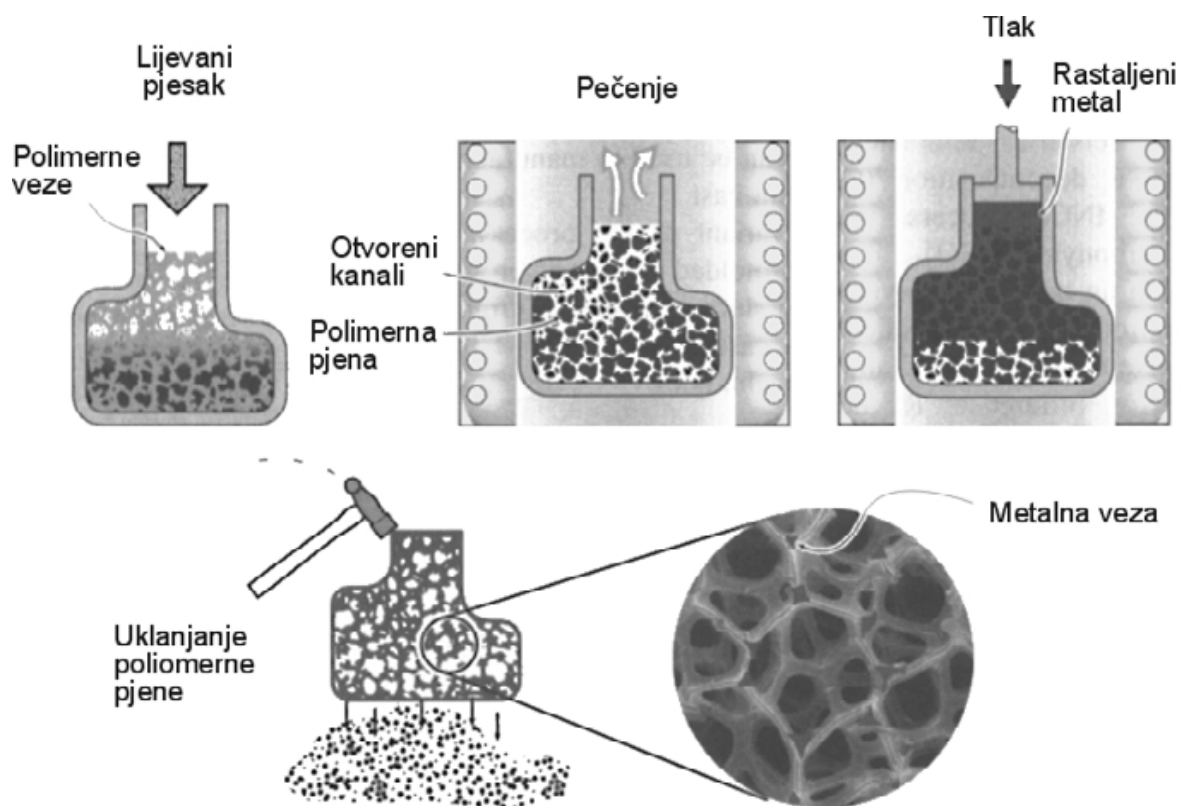
Fraunhoferov institut u Bremenu (Institut für Advanced Materials – IFAM) razvio je izradu sendvič konstrukcija ovim postupkom. Komercijalni naziv za te proizvode je **FOAMINAL-ALULIGHT**. Upjenjeni metal je zatvoren s dvije metalne ploče (lima) koji su ljepilom povezani s pjenom. Ako je potrebna metalna veza između slojeva, limovi od čelika, aluminija ili titana valjanjem zatvaraju jezgru od pjenovitog poluproizvoda. Ta konstrukcija se zatim zagrijava pri čemu poluproizvod stvara jezgru od metalne pjene. Sendvič ploče mogu biti dimenzija do 2x1 m.



Slika 8. Sendvič konstrukcije s jezgrom od metalne pjene FOAMINAL-ALULIGHT [6]

2.4. PRECIZNO LIJEVANJE POMOĆU KALUPA OD VOSKA ILI POLIMERA

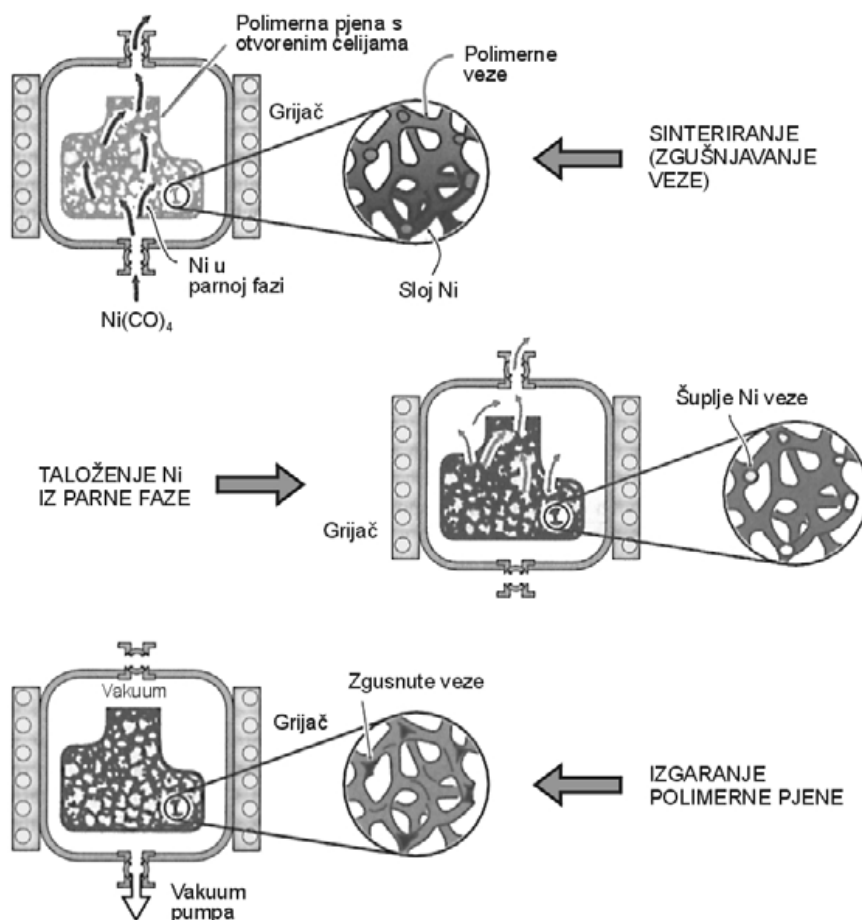
Ovaj proces je razvila tvrtka Ergaerospace i njime su proizvedene sve ERG DUOCEL metalne pjene. Ti materijali imaju strukturu s otvorenim ćelijama u obliku duodekaedara. Gustoća im iznosi od 3 % do 50 % gustoće čvrstih metala, dok im je gustoća ćelija 5, 10, 20 ili 40 pora/inču. Za izradu pjene se najčešće koriste aluminijske legure 6101 i A356. Za izradu kalupa, u kojima se postupkom preciznog lijevanja dobivaju metalne pjene, mogu se rabiti polimerne pjene s otvorenim ćelijama raznih veličina i oblika. Prvo se odabire polimerna pjena odgovarajuće veličine ćelija i relativne gustoće. Ona se zatim premazuje s keramičkim prahom koji se suši i ugrađuje u lijevani pijesak. Kalup se zatim peče da bi kalupni materijal očvrsnuo, a polimerna pjena isparila uz stvaranje negativ oblika pjene. Slijedeći korak je punjenje kalupa rastaljenom metalnom legurom koja se zatim hladi. Ovim procesom izrađuju se metalne pjene na bazi svih vrsta metala koji se mogu precizno lijevati.



Slika 9. Proces preciznog lijevanja metalne pjene s otvorenim ćelijama - ERG DUOCEL metoda [4]

2.5 TALOŽENJE MATERIJALA NA ČELIJASTE PRAOBLIKE (INCO pjena)

Polimerne pjene s otvorenim ćelijama također mogu poslužiti kao baza na koju se postupkom kemijskog taloženja iz parne faze (CVD) nanose metalni materijali evaporacijom ili elektrotaloženjem. Na početku INCO postupka polimerna pjena se stavlja u CVD retortu u koju se zatim uvodi $\text{Ni}(\text{CO})_4$. Zagrijavanjem na temperaturu od oko 100°C $\text{Ni}(\text{CO})_4$ se raspada na čisti Ni i ugljični monoksid CO. Nikal se u parnoj fazi taloži na polimerni materijal unutar retorte. Nakon što je nanoseno nekoliko desetaka mikrometara metalne prevlake, polimerne pjene se uklanjaju i spaljuju infracrvenim zagrijavanjem. Struktura ovako dobivenih metalnih pjena je ćelijasta sa šupljikavim vezama. Gustoća takvih veza se može povećati sinteriranjem. Ovaj postupak je razvila tvrtka INCO iz Kanade. To je vrlo skup i za okoliš otrovan postupak pa se rijetko koristi.



Slika 10. Proces nastajanja Ni metalne pjene (INCO pjena)[4]

3. SVOJSTVA METALNIH PJENA

Svojstva metalnih pjena određena su svojstvima osnovnog materijala i relativnom gustoćom ρ/ρ_s , ρ predstavlja gustoću pjene a ρ_s gustoću osnovnog materijala od kojeg je pjena napravljena. Relativna gustoća kreće se od 0,005 (rijetke pjene) do 0,5 (guste pjene).

Glavna prednost metalnih pjena u odnosu na osnovni materijal od kojeg je pjena napravljena je vrlo mala masa. Time dobivamo iznimno lake konstrukcije čime dobivamo uštedu na materijalu i masi (to donosi uštedu goriva u autoindustriji). Međutim s obzirom da kod pjena veliku ulogu igra stupanj nepravilnosti i nehomogenosti pjene, važno je točno odrediti mehanička svojstva pjene, kako bi se mogao odrediti podoban materijal za određenu konstrukciju. Zbog toga je važno odrediti tlačnu i vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti, modul smičnosti, dinamičku izdržljivost, tvrdoću, otpornost na umor i puzanje.

Izbor i dobra priprema uzoraka su vrlo bitni za utvrđivanje reprezentativnih podataka, ispitivanja metalnih pjena su još u razvoju i predstavljaju, zbog svoje kompleksnosti, pravi izazov za inženjere. Zbog svoje vrlo nepredvidive mikrostrukture, rezultati kod jednakog načina ispitivanja, često variraju i za nekoliko desetaka % , što u primjeni smanjuje povjerenje u metalne pjene. Da bi rezultati bili što vjerodostojniji ispitivanja se provode po strožim režimima nego je to uobičajeno. Koliko je teško postići zadovoljavajuće rezultate vidjeti će se i u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

Danas se komercijalno primjenjuju samo metalne pjene na bazi aluminija i nikla pa ćemo njih podrobnije obraditi. S obzirom na vrlo širok raspon svojstava metalne pjene imaju široko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja, pri čemu pjene s otvorenim i one s zatvorenim ćelijama uglavnom imaju ujednačena svojstva. S time da pjene s otvorenim ćelijama imaju nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće.

Tablica 1. Vrijednosti svojstava metalnih pjena [4]

Svojstvo, (jedinica), simbol	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	INCO
Materijal	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Relativna gustoća, ρ/ρ_s	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Struktura, (tip ćelije)	Zatvorene			Otvorene	
Modul elastičnosti, (GPa), E	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti, (GPa), G	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti, (GPa), E_f	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor	0,32-0,34				
Tlačna čvrstoća, (MPa), R_{mt}	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća, (MPa), R_m	0,05-3,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Din. izdržljivost, (MPa), R_d	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zguščivanju, ϵ_D	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost, (-), ϵ_f	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka, (%), η	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
Ivrdoća, H	0,05-10	2,4-35	2,0-22	2,0-3,5	0,6-1,0
Lomna žilavost, (MPa·m ^{1/2}), K_{IC}	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0
Talište, (K), T_m	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Max. radna temperatura, (K), T_{max}	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Min. radna temperatura, (K), T_{min}	1-2				
Specif. topl. kapacitet, (J/kgK), C_p	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Toplinska vodljivost, (W/mK), λ	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Topl. rastezljivost, (10 ⁻⁶ /K), α	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
Latentna toplina taljenja, (kJ/kg), L	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310
Električni otpor, (10 ⁻⁸ Ωm), R	90-3000	20-200	210-250	180-450	300-500

Tablica 2. Izrazi za izračunavanje svojstava metalnih pjena

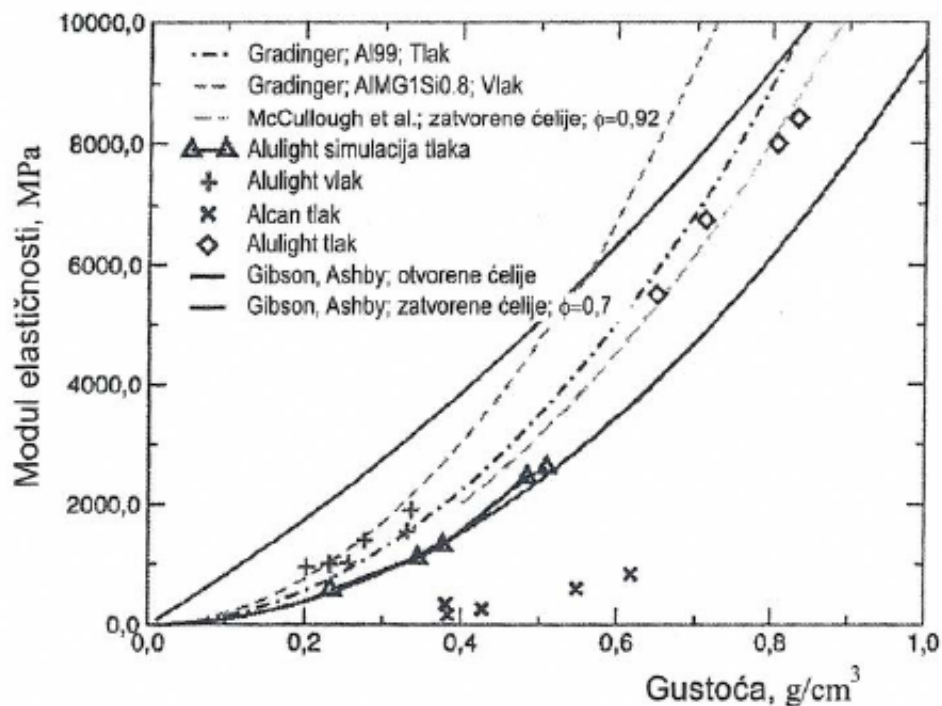
Napomena: Indeks "s" u oznaci odnosi se na svojstva osnovnog materijala

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

3.1. KRUTOST

Čvrstoća i krutost ćelijastih (poroznih) materijala u velikoj mjeri ovisi o njihovoj gustoći. Teorijske pretpostavke koje su postavili Gibson i Ashby [4] o mehaničkim svojstvima ćelijastih materijala, zasnivaju se na vezi morfologije i svojstava stijenki ćelija. Kod pjena s otvorenim ćelijama pretpostavke odgovaraju podacima dobivenim ispitivanjem dok kod pjena s zatvorenim ćelijama to nije slučaj.

Aluminijske pjene imaju različit modul elastičnosti pri vlačnom i tlačnom opterećenju. Dodatno otežavajuća činjenica je da početna krutost uzorka pri neosnom tlačnom opterećenju ne karakterizira ponašanje samog materijala, već vrijedi samo za ispitivani uzorak. Ta početna krutost iznosi samo 20% iznosa modula elastičnosti koji se dobiva iz krivulja opterećivanje/rasterećivanje uzorka nakon dostizanja granice stlačivanja (R_{et})



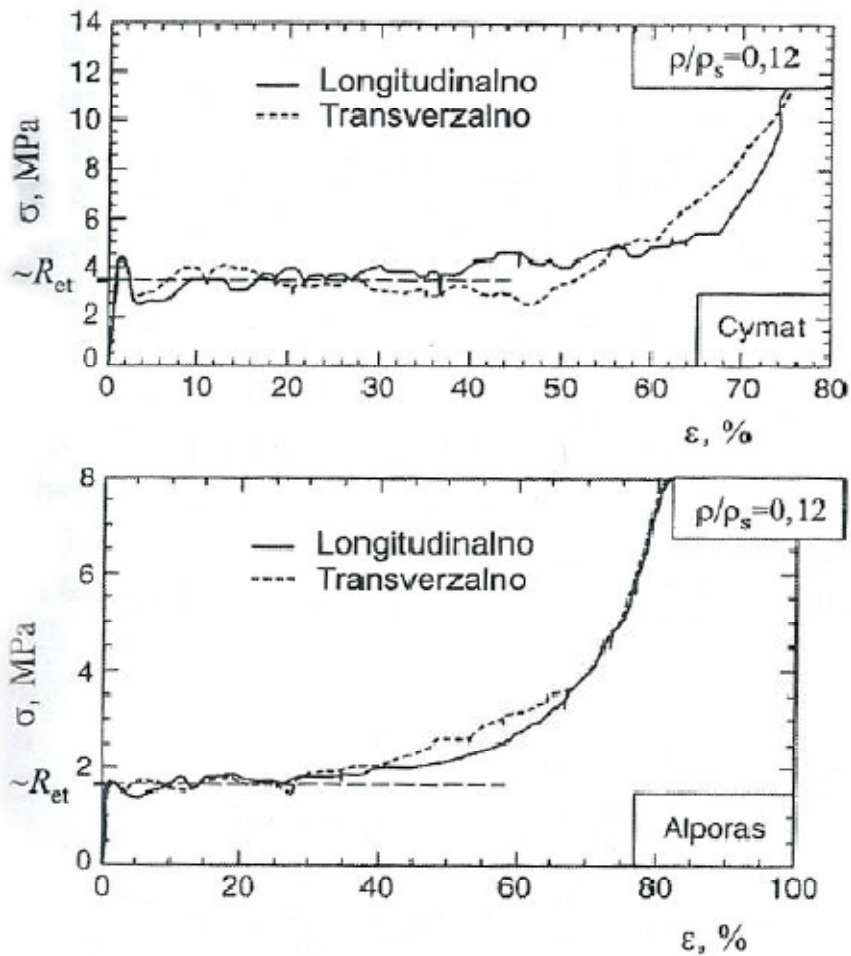
Slika 11. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena; neosno opterećeno na tlak [7]

Iz prethodne slike 11. vidljivo je da krutost materijala ovisi o njegovoj gustoći. Ovo su rezultati za Al pjene sa zatvorenim ćelijama. Izmjerene vrijednosti u pravilu su manje od očekivanih teorijskih proračuna. Pjene s zatvorenim ćelijama niske gustoće pokazuju niže vrijednosti krutosti od očekivanih zbog mikrostrukture materijala.

S povećanjem pravilnosti mezostrukture u pravilu raste krutost Al pjena. Krutost se snižava i zbog nepravilnosti kao što su zavojite stijenke ćelija, nehomogenosti u obliku veličine čvorova i velikih napuklina.

Al pjene proizvedene metalurgijom praha pokazuju vrlo malen stupanj anizotropije.

3.2. TLAČNA ČVRSTOĆA



Slika 12. Dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje komercijalnih Al pjena [4]

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

Pjene s otvorenim ćelijama imaju vrlo dobro definiranu granicu stlačivanja – R_{et} što je vidljivo na slici 12.. Pri tom naprezanju ćelije počinju teći uslijed savijanja. Zatvorene ćelije pokazuju mnogo složenije ponašanje. Naprezanje veličine granice stlačivanja izaziva zgušnjavanje pjene sve do konačne deformacije zgušnjavanja (ϵ_D).

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

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

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

R_{et} - granica stlačivanja

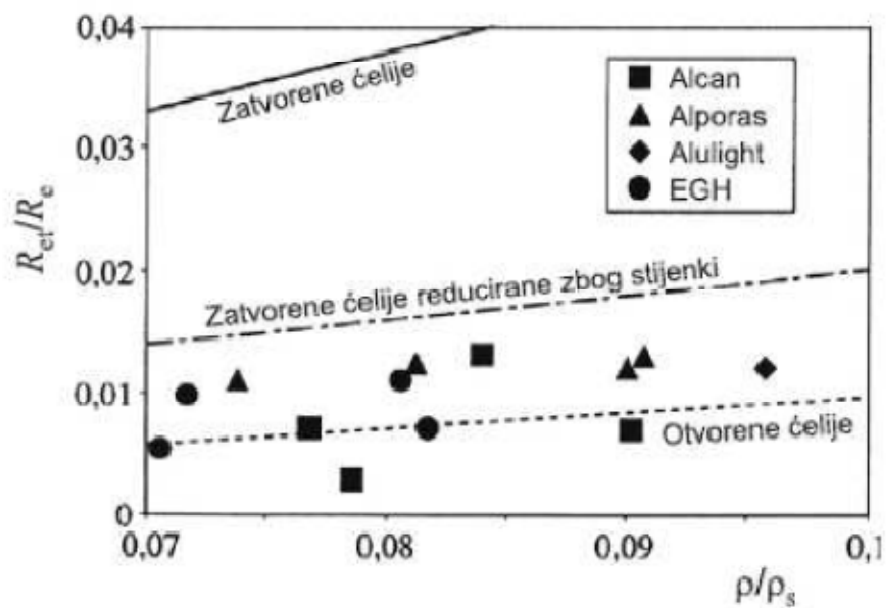
R_e - granica tečenja materijala pjene

m - eksponent koji za metalne pjene iznosi od 1,5 do 2

α_1 – koeficijent iznosi od 1,4 do 2

Ispitivanja se uglavnom provode na Al i Ni pjenama, s obzirom da se one uglavnom komercijalno primjenjuju. Od Al pjena proučavaju se CYMAT, ALPORAS, ERG Duocel, ALULIGHT i IFAM. Omjer visine i debljine uzorka mora biti veći od 1,5, dok omjer veličine uzorka i veličine ćelije mora biti veći od 7 da bi se izbjegao utjecaj veličine uzorka na rezultate ispitivanja.

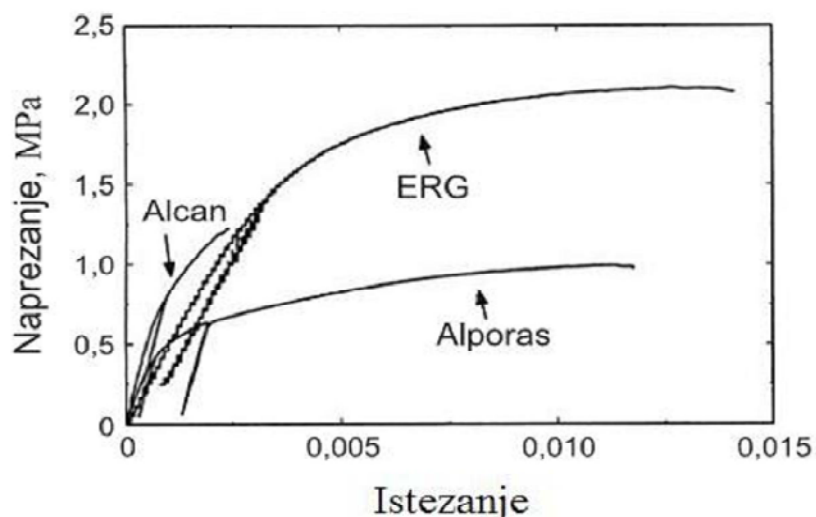
Ispitivanja se provode na kockastim uzorcima duljine brida 25, 40, 45 ili 50 mm. Ovisno o vrsti uzorci se opterećuju okomito ili paralelno na os izduženja ćelija. Uzorak se opterećuje silom od 50 kN između dvije ploče. Deformacija uzoraka mjeri se ekstenzimetrima i na temelju njih se izračunava Poissonov faktor. Brzina iznosi od 0,01 mm/s do 0,05 mm/s. Iz dijagrama na slici 13. može se zaključiti kolike su deformacije uzoraka pri najvećim opterećenjima za pojedini tip aluminijskih metalnih pjena.



Slika 15. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene (R_{et}) i granice tečenja materijala ćelija (R_e) o relativnoj gustoći [8]

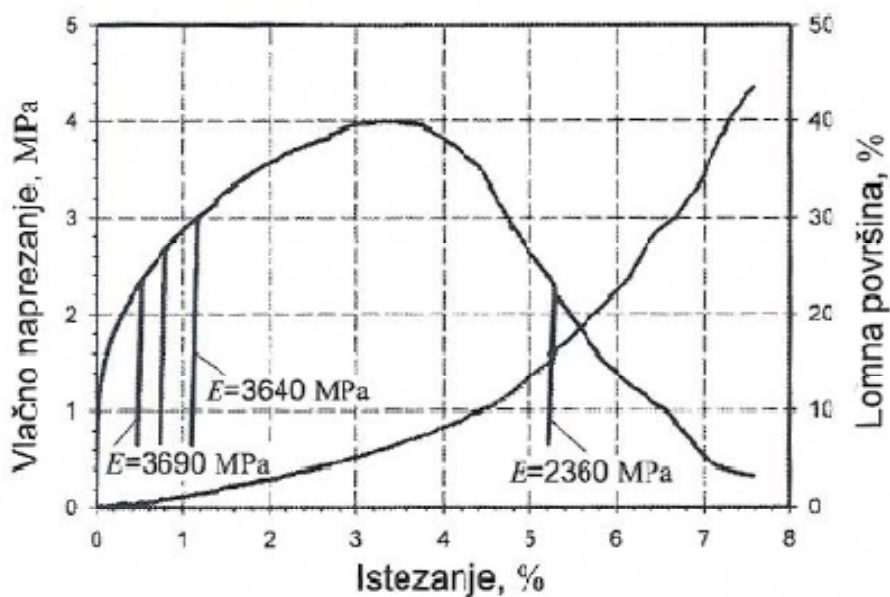
3.3. VLAČNA ČVRSTOĆA

Ispitivanja vlačnim opterećenjem provode se na cilindričnim uzorcima ili uzorcima u obliku kosti. Odvajanje i obrada uzoraka propisani su normom ASTM E8-96-a. Kao glavne dimenzije uzoraka uzimaju se promjer kod cilindričnog i debljina kod uzorka u obliku kosti. Omjer tih dimenzija i veličine ćelije mora biti veći od 7. Istezanje se mjeri ekstenzimetrom koji se pričvršćuje na dio uzorka gdje dolazi do lomova. Opterećenje je zadano u 2 smjera: okomito i paralelno na dulju os ćelija, brzina opterećenja je 0,01 mm/s. Modul elastičnosti može se izračunati iz nagiba krivulje "naprezanje-istezanje", dok se Poissonov faktor računa pomoću izmjerenih vrijednosti istezanja. Rezultati vlačnog ispitivanja za Al pjene prikazani su u sljedećem dijagramu na slici 16.



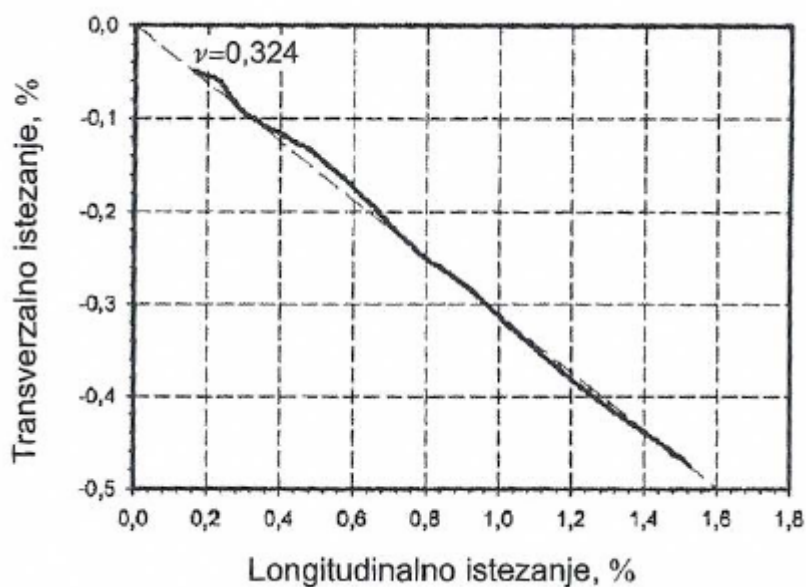
Slika 16. Dijagram naprezanje – istezanje Al pjena [8]

Aluminijske pjene se ponašaju slično kao žilavi materijali. To vidimo iz krivulja koje pokazuju ponašanje uzoraka bez ureza na slici 17. Linearno elastični dio krivulje vrlo je malen nakon kojeg slijedi veći dio u području plastičnosti. Rezultat je nehomogena raspodjela deformacija koja uzrokuje veliku deformaciju na nekim dijelovima površine uzorka. Inicijacija napuklina počinje blizu maksimalnog naprezanja. Daljnje istezanje dovodi do zone loma. Modul elastičnosti smanjuje se s povećanjem istezanja, općenito se može reći da je modul elastičnosti u uvjetima tlačnog opterećenja ipak nešto veći nego u uvjetima vlačnog.



Slika 17. Krivulja naprezanje – istežanje s udjelom lomne površine ALPORAS pjene (uzorci bez ureza) [9]

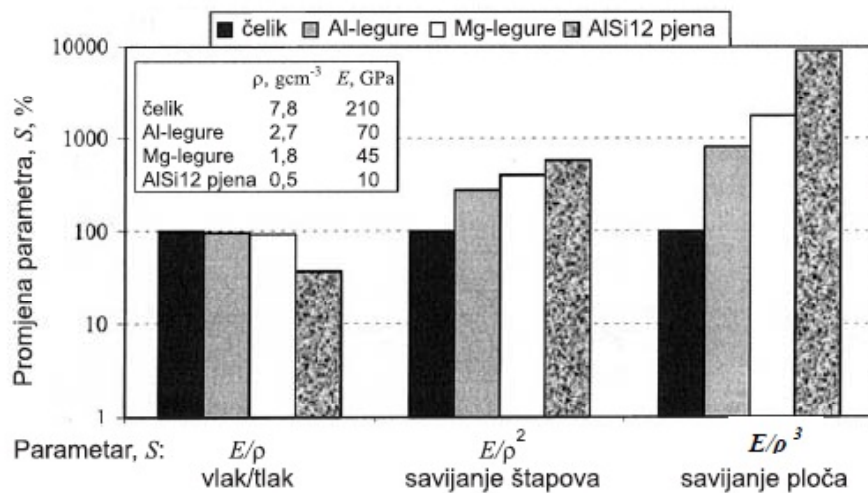
Poissonov faktor se može izračunati iz izmjerenih istežanja prikazanih na slici 18. Prosječni Poissonov faktor u uvjetima vlačnog opterećenja iznosi 0,35.



Slika 18. Odnos transverzalnog i longitudinalnog istežanja [9]

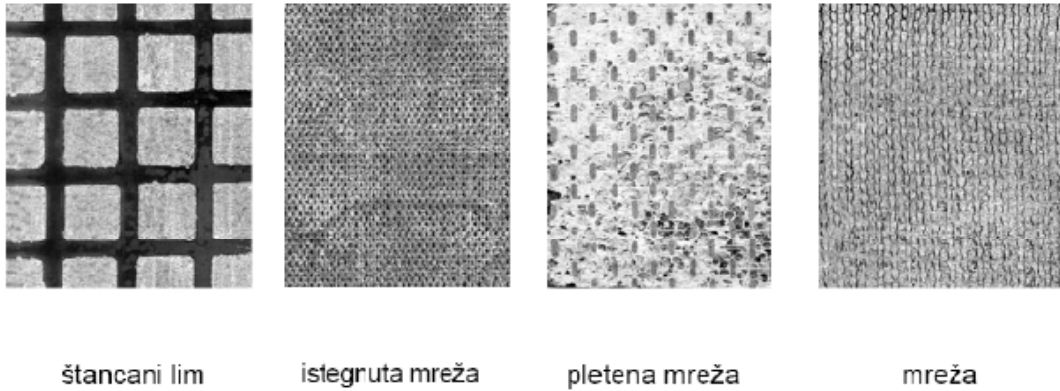
3.4. OJAČANE METALNE PJENE

Tijekom proizvodnje aluminijskih metalnih pjena formiraju se slučajne raspodjele šupljina različitih oblika, a nastaje i gusta površinska kora koja značajno poboljšava savojnu krutost i izgled pjene. Međutim, kora sadrži često nevidljive napukline i praznine koje mogu inicirati prijevremeni lom pjene, naročito pri vlačnom opterećenju i onda kada su povoljni uvjeti za stvaranje napuklina u visokoporoznom materijalu. Zbog toga je vlačna čvrstoća Al pjena nedovoljna za efikasnu uporabu kod jače opterećenih konstrukcijskih dijelova, iako joj je omjer krutosti i mase odličan.



Slika 19. Parametar S - omjer krutost/masa za različite materijale i opterećenja (E – modul elastičnosti, ρ - gustoća, 100 %-vrijednost za čelik), [10]

Rast napuklina u stijenkama ćelija se može spriječiti ojačanjem pjena, slično kao kod ojačanja betona. Za ojačanje Al pjena se koriste različiti oblici mreža od nehrđajućih čelika. Ako materijal ojačanja ima viši modul elastičnosti i dovoljno visoku granicu tečenja, naprezanja se prenose na ojačavajući element i postojeća napuklina u ćeliji postaje neaktivna.



Slika 20. Oblici mreža od nehrđajućeg čelika za ojačanje Al pjena [1]

Uloga ojačanja [11]:

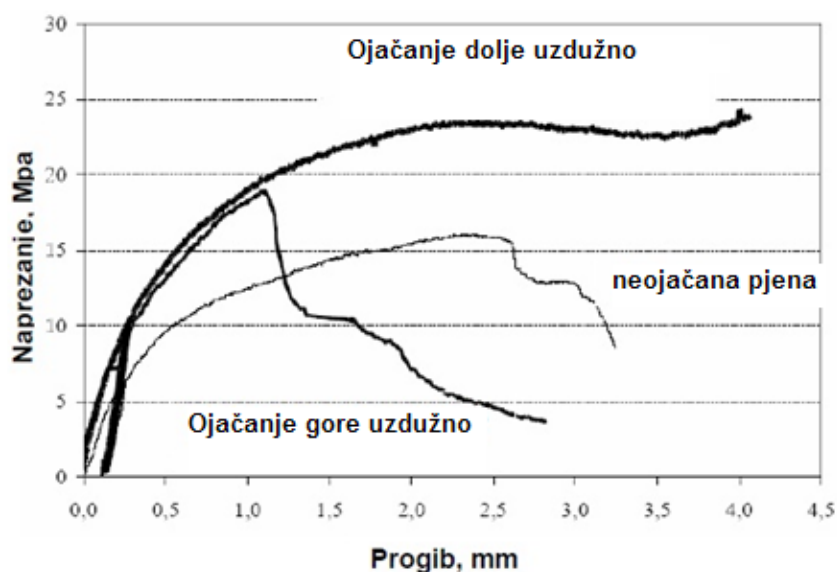
- sprečavaju urušavanje pjene
- povećavaju debljinu površinskog sloja
- značajno povećavaju lomnu i savojnu čvrstoću
- omogućuju odličnu apsorpciju energije
- kada je ograničen volumen pjene povećavaju savojnu krutost
- olakšavaju spajanje dijelova

Naprezanje koje uzrokuje tečenje ili čak površinski lom kod Al pjena, može se smanjiti ulaganjem ojačanja, naročito ako su postavljena u vlačno opterećenu zonu. Time dolazi do značajnog povećanja čvrstoće, kapaciteta apsorpcije energije uz neznatno povećanje mase (20 do 30 %). Pjena se ojačava u onom smjeru gdje se očekuje najveće opterećenje i tako se maksimalno optimiziraju svojstva u odnosu na masu. Ojačanja se koriste i za poboljšanje savojne krutosti sendvič-konstrukcija kada je ograničena debljina lima.

U postupku gdje se ojačanje stavlja na donju stranu kalupa, prilikom ekspanzije pjene ojačanje se pomiče prema površini gdje se stapa s pjenom. Tekuća pjena reagira s ojačanjem tvoreći metalnu vezu. Kvaliteta te veze ovisi o kemijskom sastavu oba materijala i može se kontrolirati vremenom kontakta između taljevine i ojačanja te pripremom površine ojačanja. Ovim tipom metalne veze dobivaju se značajna poboljšanja mehaničkih svojstava i toplinske stabilnosti u odnosu na lijepljene ili zavarene sendvič-konstrukcije. U odnosu na tipične kompozite s metalnom matricom ovdje gornji sloj ne predstavlja najslabiju kariku zbog toga što obično ima bolja svojstva od visokoporozne i krhke AlSi12 pjene. Ojačanja sprečavaju izlazak plina iz pjene prilikom hlađenja pa imaju stabilizirajući efekt.

Ojačanja povećavaju debljinu površine, pojednostavnjuju spajanje jer je moguće zavarivanje, i omogućavaju određeno oblikovanje. Dijelovi od metalnih pjena mogu biti ojačani ovisno o smjeru u kojem se očekuje najveće opterećenje, štedeći tako na troškovima ojačanja i masi materijala. Velika prednost ovog procesa proizvodnje ojačanih metalnih pjena je u tome što se izvodi u jednoj tehnološkoj operaciji, to smanjuje troškove i pojednostavnjuje proizvodnju.

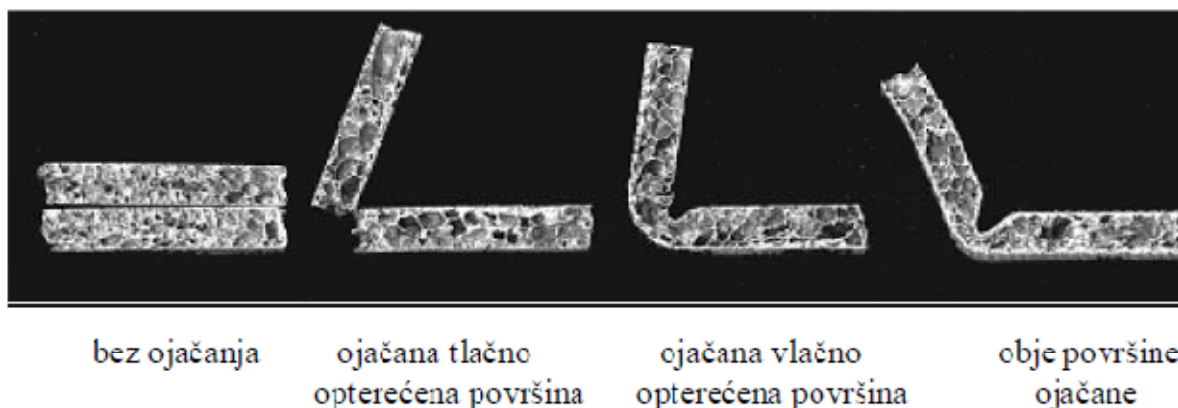
Na slici 21. prikazano je ponašanje AlSi12 sa i bez ojačanja prilikom ispitivanja na savijanje. Poroznost pjene približno je ista. Ojačanje je postavljeno na donju ili na gornju stranu ispitnog uzorka. Vidi se da je savojna krutost gotovo dvostruko veća, dok je masa uzorka porasla za oko 30 %. Najučinkovitije je ojačanje koje je postavljeno na donju, vlačno opterećenu stranu uzorka. U tom slučaju ne dolazi do loma tijekom ispitivanja. Ako je ojačanje postavljeno na gornju, tlačno opterećenu stranu uzorka, dolazi do loma pri znatno nižem opterećenju, koje je usporedivo s uzorkom bez ojačanja.



Slika 21. Utjecaj ojačanja na ponašanje pri savijanju grede od AlSi12 pjene poroznosti od 81 % [10]

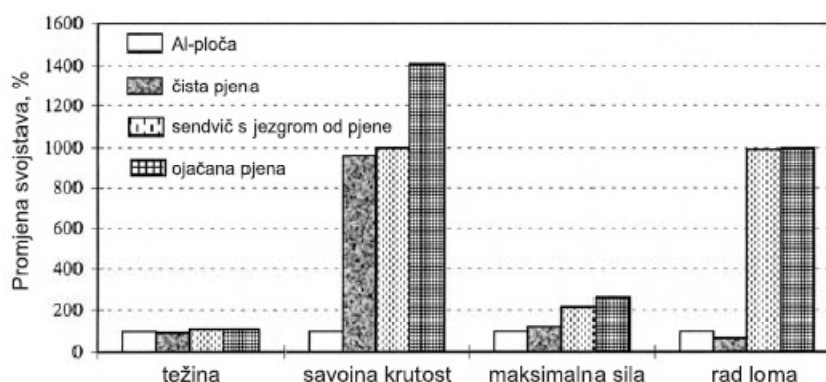
Čvrstoća je uvijek veća ako je ojačanje postavljeno na donju stranu uzorka (vlačno opterećena površina). Savojna krutost ovisi o orijentaciji ojačanja i ona je uvijek veća u uzdužnom smjeru, ali ne ovisi o položaju ojačanja, za razliku od čvrstoće.

Utjecaj položaja ojačanja na žilavost jasno je vidljiv na slici 22., koja pokazuje konačnu deformaciju nakon udarnog ispitivanja. Uzorak bez ojačanja nije uspio apsorbirati gotovo ništa udarne energije, dok su uzorci s ojačanjem svu udarnu energiju pretvorili u deformaciju. Mogućnost apsorpiranja dodatne količine energije može se vidjeti iz kuta pod kojim uzorak ostao savinut. Ponovo se može uočiti da je najefikasnija upotreba ojačanja na vlačno opterećenoj površini.



Slika 22. Deformacija uzoraka AlMg1Si0,6 pjene, poroznosti 85 %, nakon udarnog ispitivanja (maksimalna energija 15 J) za različite položaje ojačanja [10]

Sljedeća slika 23. prikazuje promjene svojstava različitih Al uzoraka jednakih masa. Uzorak od jednostavne Al pjene ima znatno bolju krutost od Al lima. Nikakvog poboljšanja nema niti pri usporedbi savojne čvrstoće, a otpornost na lom pjene je nešto manja. Zbog toga je Al pjene za praktičnu upotrebu nužno ojačati barem na vlačnoj strani.



Slika 23. Svojstva ojačane AlSi12 pjene debljine 15 mm, poroznosti 85 % u usporedbi s Al limom debljine 3 mm; AlSi12 debljine 15 mm, poroznosti 80 %; sendvič AlSi12 debljina pjene 11 mm, poroznosti 80 %, vanjskih Al limova debljine 1 mm, [10]

3.5. SENDVIČ KONSTRUKCIJE

Metalne pjene su novi materijal koji je idealan upravo za sendvič konstrukcije. Jezgre metalnih pjena posebno su važne kada se od konstrukcije zahtijeva multifunkcionalnost tako da se one, osim kao konstrukcijski dio, mogu koristiti kao ležište sustava cijevi za grijanje ili hlađenje, kao zvučna izolacija itd. Osim toga, one omogućuju primjenu pri višim temperaturama. Budući da je jezgra, zapravo konstrukcijski dio sendvič-ploča, ona na sebe prima sva opterećenja kao i vanjske površine. Zato je nužno ispitati cijeli niz mehaničkih svojstava kako bi se moglo predvidjeti ponašanje sendvič-konstrukcija u eksploataciji.

Za sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene zaključeno je sljedeće:

- na relativnu gustoću pjene znatno utječe debljina površinske kore i zato se prilikom određivanja modula elastičnosti mora uzeti u obzir debljina pjene;
- na savojnu krutost ploče ne utječe vrsta materijala pjene
- masa po jediničnoj površini može se iskoristiti za opisivanje ploča od pjene jer kombinira njihovu masu, gustoću i debljinu;
- stvarni moment inercije ploča i sendviča s jezgrom od pjene može se izračunati iz njihove mase po jediničnoj površini ako relativna gustoća pjene nije viša od 0,4.



Slika 24. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [2]

3.6. TOPLINSKA SVOJSTVA

Toplinska vodljivost (λ) najbolje pokazuje izolacijske sposobnosti materijala. Iz prethodne tablice jasno je vidljivo kako vrijednost λ varira od 0,2 W/mK sve do 11 W/mK. Budući da koeficijent toplinske vodljivosti za aluminij iznosi 150-220 W/mK, a za nemetalne materijale približno 3 W/mK, jasno je da metalne pjene mogu biti vrlo dobar izolator.

Toplinska vodljivost aluminijskih pjena je od 8 pa čak i do 100 puta manja od λ čistog aluminija. Danas su razvijeni matematički modeli pomoću kojih se s dovoljnom preciznošću može izračunati minimalna i maksimalna vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti.

Na prijenos topline utječe niz faktora kao što su: morfologija ćelija, relativna gustoća, koeficijent toplinske vodljivosti, emisivnost itd.

Aluminijske pjene su otporne na temperature i do 780 °C na kojima se deformiraju tek ako su izložene većim opterećenjima. To je još zanimljivije kada se zna da je talište aluminija oko 650 °C. Otpornost na visoku temperaturu se pripisuje sloju Al_2O_3 .

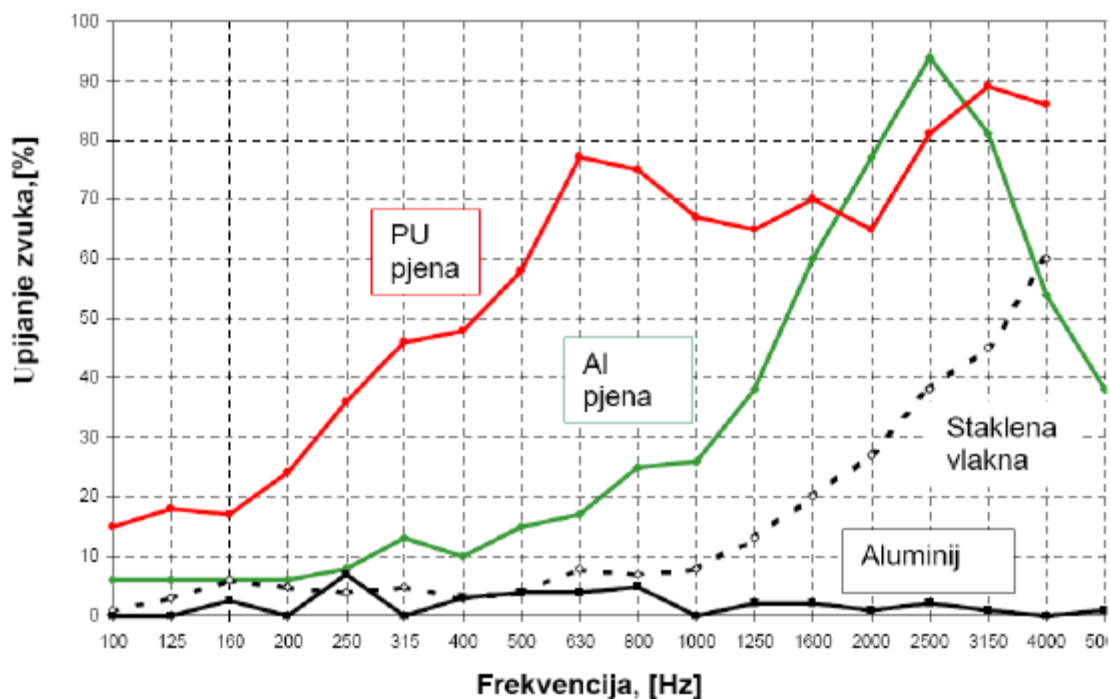
Aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama su pokazale iznimnu vatrootpornost što se pripisuje već spomenutom Al_2O_3 . Do stradavanja može doći iz više razloga, tako da se u obzir uzima i toplinska i strukturna vatrootpornost. Do toplinskog stradavanja dolazi kada pjena gubi izolacijski kapacitet, a do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

Alporas pjene su ispitane prema njemačkim standardima i proglašene negorivima. Mogu biti izložene temperaturama višim od 600°C za razliku od PU pjena, koje se koriste u tračnim vozilima, koje se izobličie i razvijaju otrovne plinove.

3.7. ZVUČNA SVOJSTVA

Dobra zvučna svojstva očituju se u činjenici da metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije. Kao što smo već napomenuli metalna pjena mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije kako bi dobro apsorbirala zvuk. Ispitivanja su provedena na Alporas pjeni sa zatvorenim ćelijama čije su stjenke različitim postupcima razbijane kako bi se omogućila cirkulacija zraka kroz njih. Apsorpcija zvuka može se poboljšati bušenjem rupa promjera 1-2 mm u metalnoj pjeni. Prema podacima proizvođača, prednosti Alporas pjena u odnosu prema konkurentnoj staklenoj vuni kada se radi o apsorpciji buke jesu:

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



Slika 25. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al [11]

3.8. PRIGUŠENJE VIBRACIJA

Prigušenje je vrlo važno svojstvo dijelova konstrukcija koji su tijekom eksploatacije izloženi vibracijama (npr. dijelovi strojeva za preciznu obradu). Princip ispitivanja je takav da se materijal izloži vibracijama te se proučava ponašanje u rezonanci nakon prestanka rada izvora vibracije. Kao i kod drugih ispitivanja i ovdje je problem nehomogena struktura uzoraka. Na rezultate utječe stupanj poroznosti, veličina i oblik ćelija, način obrade uzorka itd. Procesi prigušenja u materijalu najbolje su karakterizirani bezdimenzijskim koeficijentom gubitka, η .

4. PRIMJENA METALNIH PJENA

Tablica 3. Mogućnosti primjene metalnih pjena [4]

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

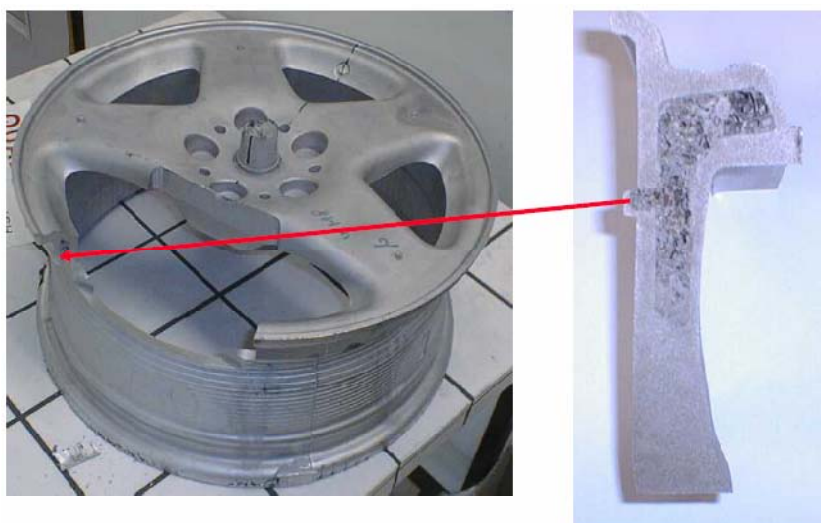
Primjena metalnih pjena slijedi iz njihovih svojstava. Budući da su metalne pjene relativno novi oblik materijala njihova primjena još uvijek nije raširena, iako već i danas postoji nekoliko respektabilnih proizvođača ove vrste materijala. Negativna strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no i to se iz dana u dan smanjuje.

Moguća primjena metalnih pjena je vrlo raznovrsna i to u brojnim područjima, kao što su: prijevozna sredstva (automobili, vlakovi, tramvaji itd.), brodogradnja, zrakoplovna industrija, strojogradnja, građevinarstvo, arhitektura (unutrašnje uređenje), proizvodnja namještaja, itd. Najveći dio primjena se odnosi na poluproizvode u obliku sendvič ploča.



Slika 26. Sendvič poluproizvodi od metalne pjene [10]

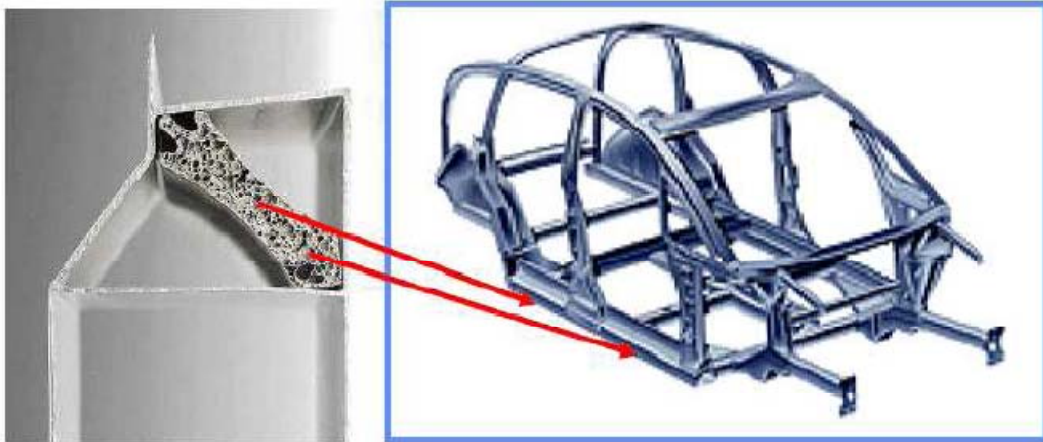
Koriste se i u industriji tračnih vozila, brodova, zrakoplova i svemirskih letjelica. Metalne pjene su najčešće jezgre sendvič poluproizvoda.



Slika 27. Naplatak automobila s jezgrom od ALULIGHT pjene (ušteta u masi do 2 kg po kotaču) [12]

Metalne pjene se u autoindustriji uglavnom koriste kao jezgra sendvič konstrukcija – dijelovi oplata i okvira. Time se masa automobila može smanjiti za 20 % što predstavlja i značajne uštede u potrošnji goriva. Uz poznatu činjenicu da metalne pjene imaju dobra toplinska i zvučna izolacijska svojstva te mogućnost prigušenja vibracija, jasno je da se mogu primjeniti za razdvajanja kabine vozila od područja motora.

Budući da aluminijske pjene imaju vrlo dobru sposobnost apsorpcije udarne energije od njih se mogu izrađivati i branici koji povećavaju sigurnost putnika pri udarcima.



Slika 28. Primjena metalne pjene u autoindustriji za ojačanje okvira [12]



Slika 29. Izmjenjivač topline napravljen od DUOCEL Al-pjene [13]

Pjene sa otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stijenki, dobro provode toplinu i mogu se koristiti za izradu izmjenjivača topline i hladnjaka.

Niklene pjene se uglavnom koriste za izradu dijelova NiCd i NiMH baterija koji se koriste u električnim alatima, video kamerama, mobitelima itd. Sendvič konstrukcije sa jezgrom od niklene pjene mogu se također koristiti za izradu izmjenjivača topline.

5. EKSEPRIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada razmatrane su mogućnosti ojačanja aluminijskih metalnih pjena. Napravljeni su uzorci ojačani staklenim i ugljičnim vlaknima, te uzorci bez ojačala. Zatim su svi uzorci ispitani na savijanje, te su komentirani dobiveni rezultati.

5.1. IDEJNI PROJEKT

Zadatak je bio razmotriti mogućnosti ojačanja metalnih pjena. Kao prekursor od kojeg je dobivena metalna pjena koristit će se ALULIGHT AlSi 10 TiH₂ - 0,8.

S obzirom da su u eksploataciji metalnih pjena izrazito nepovoljna vlačna naprezanja, ojačanja se upotrebljavaju samo lokalno u vlačnoj zoni, tako da ne uzrokuju značajna povećanja mase i troška materijala. Uzorci će biti ispitani na savijanje, pa su ojačala stavljena samo u vlačnu zonu s obzirom da su u tlačnoj zoni nepotrebna. Bilo je predviđeno da se kao ojačanje koristi i žica od nehrđajućeg čelika, međutim s obzirom na skromnu debljinu kalupa dimenzija $\varnothing 20 \times 250$ mm, nije bilo moguće pronaći dovoljno tanku žicu koja bi odgovarala kalupu. Zato su kao ojačala korištena samo staklena i ugljična vlakna. Plan je bio napraviti 3 uzorka s ugljičnim vlaknima, 3 uzorka sa staklenim vlaknima i 3 uzorka bez ojačanja. Potom će uzorci biti ispitani na savijanje i analizirati će se rezultati.

5.2. IZRADA UZORAKA

Uzorci su izrađeni u Laboratoriju za nemetale (FSB Zagreb) uz veliku pomoć laboranta Božidara Bušetinčana. S obzirom da su u kalup s prekursorom stavljena i ojačala, prvi problem je bio fiksiranje ojačala tako da ostanu u donjem dijelu kalupa te da se prilikom pjenjenja materijala ne pomaknu. Važno je da ojačala ostanu u donjem djelu kalupa jer će taj dio uzorka pri savijanju biti vlačno opterećen.

Prekursor korišten za izradu uzoraka je ALULIGHT AlSi 10 TiH₂ - 0,8 dimenzija 20 mm × 5 mm × 1200 mm, narezan je na komadiće kako bi stao u kalup. Prekursor je poluproizvod koji se proizvodi na način da se prah metalne legure, pomiješan s agensom koji omogućava pjenjenje, ekstrudira u pločice, što je detaljnije opisano u poglavlju 2.3. U ovom slučaju prekursor se sastoji od praša AlSi 10 pomiješanog sa 0,8 % TiH₂. Koristili smo masu od cca 75 grama prekursora za svaki uzorak, masa ojačala je zanemariva.



Slika 30. Masa narezanog prekursora potrebna za jedan ispitni uzorak iznosi 75 g

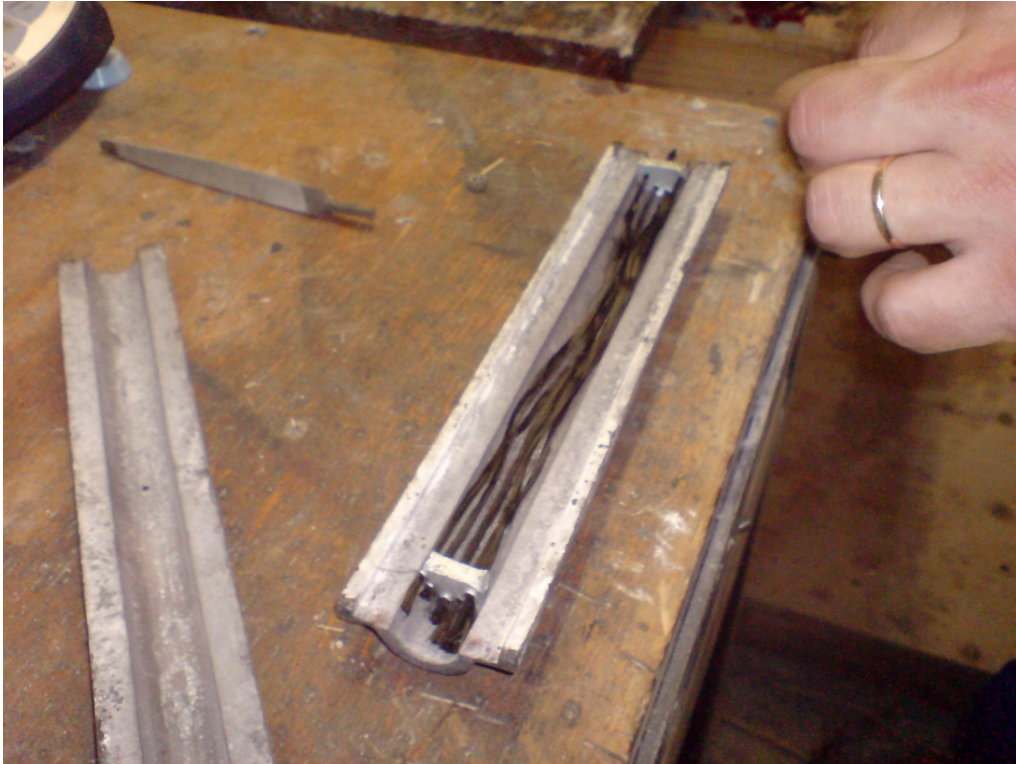
Ojačala su korištena u obliku snopova staklenih i ugljičnih vlakana. Snopove vlakana je bilo potrebno ravnomjerno rasporediti u donji dio kalupa tako da se međusobno ne dodiruju i da budu relativno zategnuta te da ne dodiruju sam kalup, tako da pri procesu pjenjenja prekursora ne isplivaju na površinu. Napravljeni su mali polukružni "usmjerivači" vlakana od prekursora kroz koje su provučeni snopovi vlakana. Prvo je stavljeno po 5 snopova vlakana u uzorak, međutim pokazalo se je da je tolika količina ojačala onemogućila kvalitetno upjenjivanje, zatim je korišteno po 3 snopa ojačala za svaki uzorak te su dobiveni zadovoljavajući rezultati.



Slika 31. Za ojačalo su korištena komercijalno dostupna staklena i ugljična vlakna



Slika 32. Provlačenje ugljičnih vlakana kroz "usmjerivače" od prekursora



Slika 33. Improvizirani "usmjerivači" ugljičnih vlakana od prekursora u kalupu



Slika 34. Prethodni postupak je ponovljen sa staklenim vlaknima



Slika 35. Zabrtvljeni uzorak u kalupu

Čelični kalup je dimenzija $\varnothing 20 \times 250$ mm, napunjen je narezanim prekursorom, zabrtvljen keramičkom smjesom, stegnut te stavljen u zagrijanu peć. Korištena je elektrootporna zvonasta peć tvrtke Feliks metal d.o.o. koja je prethodno zagrijana na temperaturu od 790 °C. Točno vrijeme koje kalup treba provesti u peći predstavlja problem jer ne postoji matematički model po kojem bi se ono izračunalo. Za svaki kalup i svaki materijal prekursora to vrijeme je potrebno odrediti ispitivanjem. Izradak je gotov kada se na poklopcu kalupa, koji na sebi ima otvor za izlaz plinova, pojavi prva kapljica taljevine. Da bi se mogla uočiti ta prva kapljica potrebno je peć često otvarati i provjeravati, ali to se mora izvesti što je brže moguće kako bi pad temperature u peći bio što manji. Slijedi vađenje kalupa iz peći te intenzivno ohlađivanje



u vodi, pri tome treba paziti da se kalup previše ne ohladi jer ne bi bilo moguće izvaditi uzorak iz kalupa.

Slika 36. Kalup u peći zagrijanoj na temp. od 790 °C



Slika 37. Intenzivno hlađenje uzorka u vodi

Dobili smo 9 uzoraka zadovoljavajuće kvalitete, što se može pripisati relativno potrošenom kalupu koji se iskrivio zbog toplinskih naprezanja te postupku kojeg je teško u potpunosti optimizirati. Zbog toga je teško dobiti pjene ujednačenih svojstava, što će se vidjeti nakon ispitivanja uzoraka.



Slika 38. Gotovi ispitni uzorci aluminijske pjene

Oznaka uzorka	Vrsta ojačala	Masa m [g]	Gustoća ρ [g/cm ³]	Relativna gustoća ρ/ρ_s	Prosječna masa [g]	Prosječna gustoća [g/cm ³]	Prosječna relativna gustoća [g/cm ³]
P1	bez ojačala	47,1	0,600	0,222	50,7	0,646	0,239
P2		53,4	0,680	0,252			
P3		51,7	0,658	0,243			
S1	staklo	57,6	0,733	0,271	58,9	0,750	0,278
S2		61,0	0,777	0,288			
S3		58,2	0,741	0,274			
C1	ugljik	65,3	0,831	0,307	56,3	0,716	0,265
C2		56,2	0,716	0,265			
C3		47,3	0,602	0,223			

Tablica 4. Popis uzoraka i svojstva s obzirom na ojačala

Dimenzija uzoraka: $\varnothing 20 \times 250$ mm

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

$$V_{uzorka} = 78540 \text{ mm}^3 = 78,54 \text{ cm}^3$$

Materijal: ALULIGHT AlSi 10 TiH2 - 0,8 sa zatvorenim ćelijama

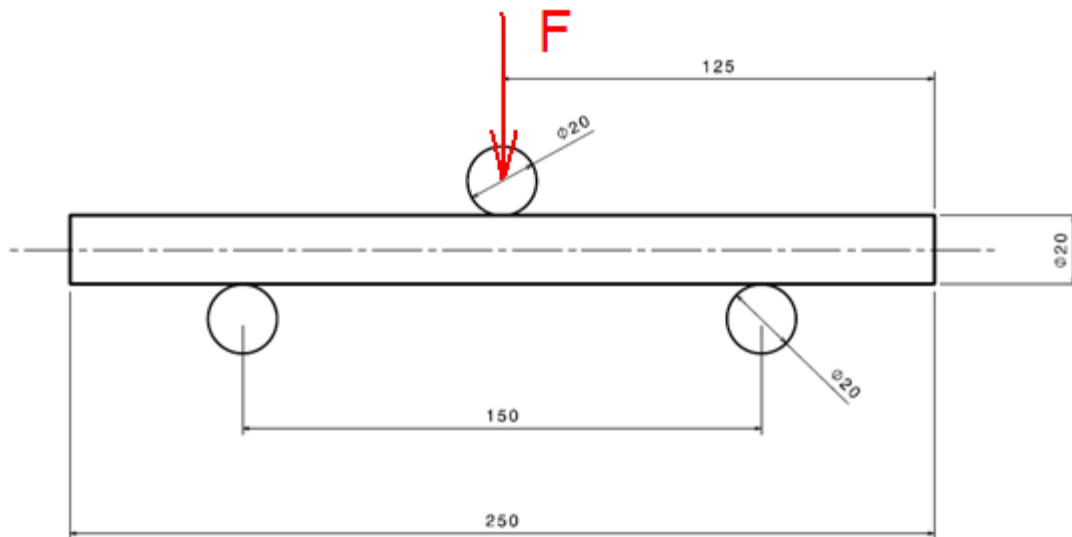
Relativna gustoća (ρ/ρ_s) prikazuje omjer gustoće uzorka ρ i gustoće osnovnog materijala ρ_s

5.3. ISPITIVANJE UZORAKA NA SAVIJANJE

Ispitivanje uzoraka na savijanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prema normi HRN C.A4.005 . Prilikom ispitivanja korištena je kidalica marke WPM, model EU 40 mod. prikazna na slici 39., maksimalne tlačne sile od 400 kN. Brzina ispitivanja statičkog tlačnog pokusa je konstantno iznosila 10 mm/min. Kidalica je spojena na računalo preko kojeg se upravlja ispitivanjem. Na računalu se za vrijeme ispitivanja prikazuje dijagram sila – progib, koji je snimljen za svaki uzorak.



Slika 39. Kidalica na kojoj su uzorci ispitani na savijanje



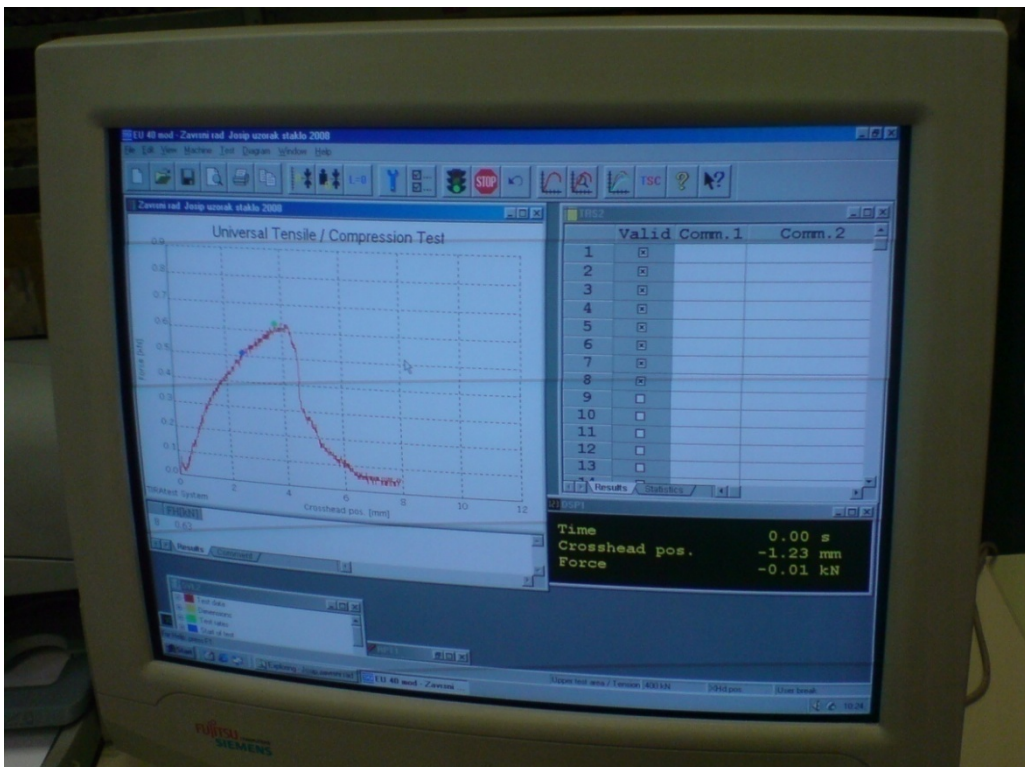
Slika 40. Prikaz dimenzija uzoraka i oslonaca pri ispitivanju u 3 točke



Slika 40. Uzorak na kidalici pripremljen za ispitivanje



Slika 41. Uzorak za vrijeme ispitivanja



Slika 42. Grafičko sučelje programa kidalice ispisuje dijagram sila-progib u realnom vremenu za vrijeme ispitivanja

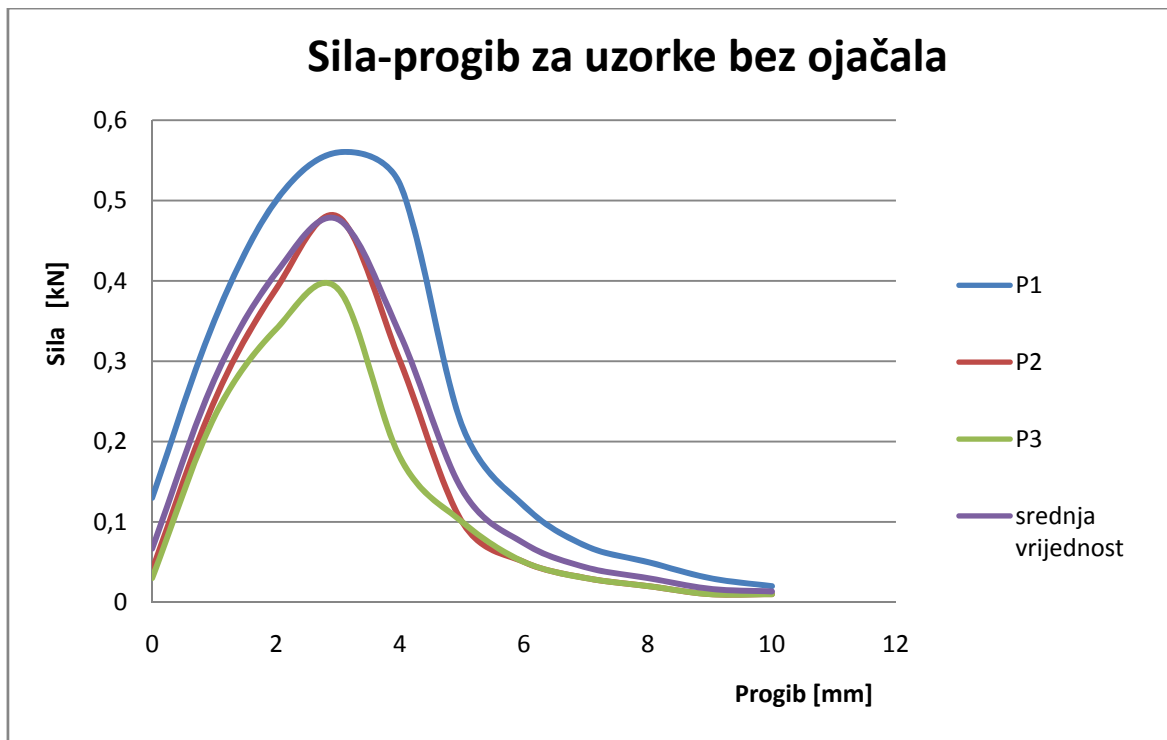


Slika 43. Uzorci nakon ispitivanja na savijanje

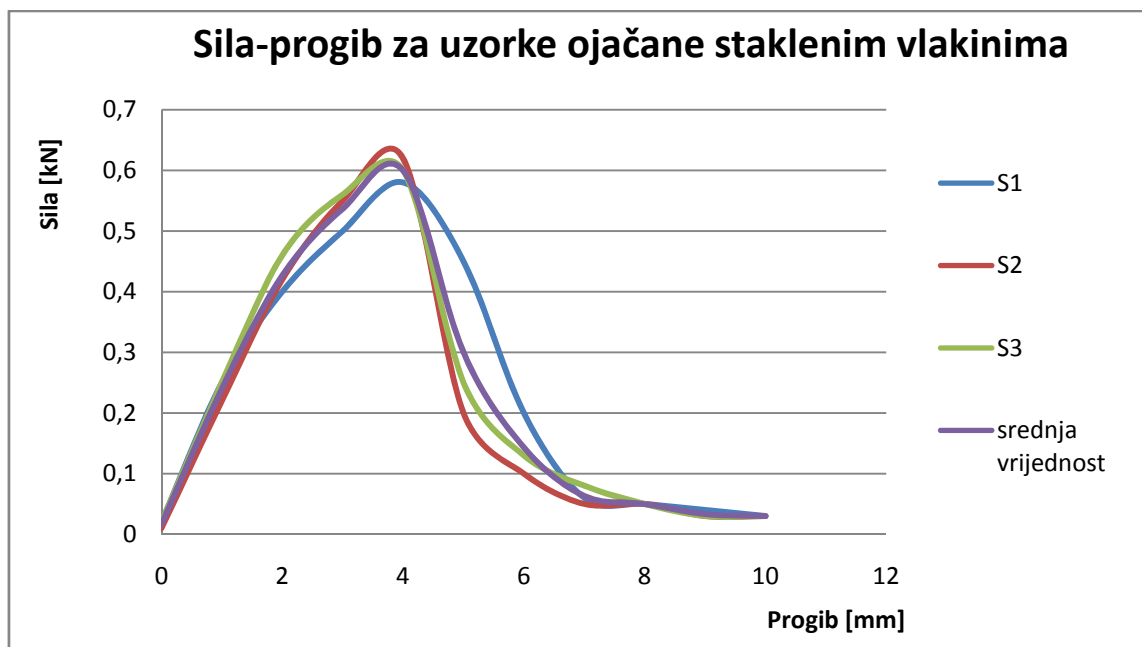
Rezultati ispitivanja su priloženi u prilogu 8., to su dijagrami sila-progib ispisani iz upravljačkog programa kidalice. Ispitivanjem su dobiveni iznosi maksimalne sile (F_m) pri kojoj je došlo do loma uzorka. Iznosi maksimalnih sila su prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 5. Vrijednosti maksimalnih sila (F_m) izmjerenih na kidalici

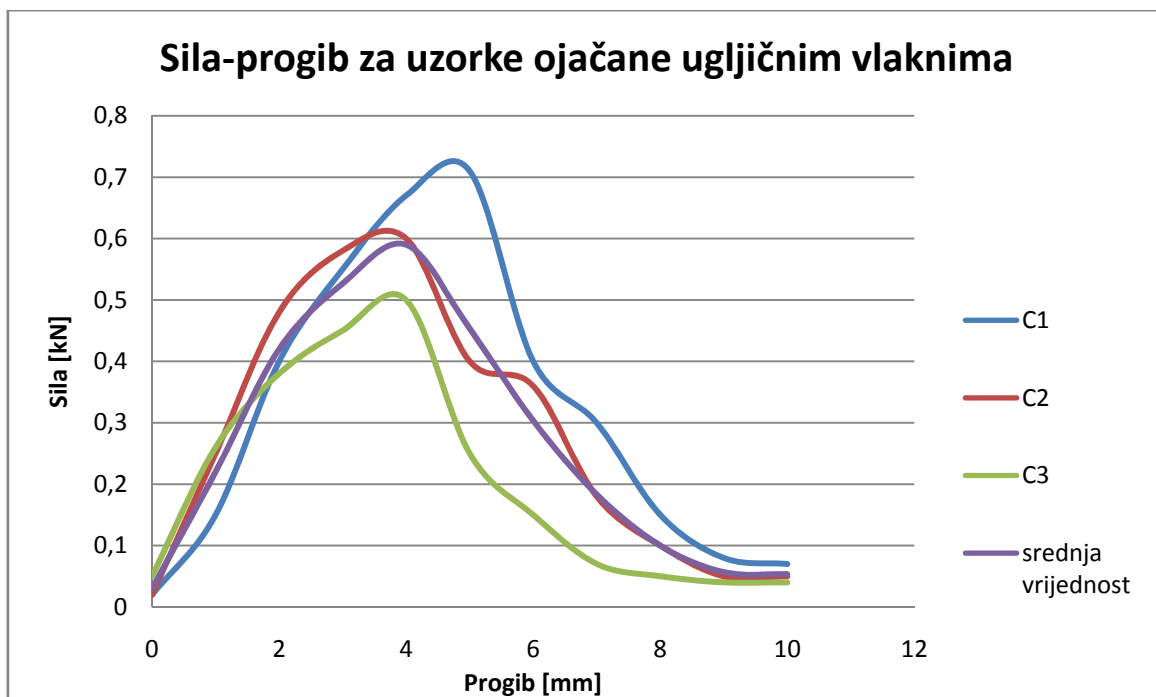
Oznaka uzorka	Vrsta ojačala	Masa [g]	F_m [kN]	Prosječna \bar{F}_m [kN]
P1	bez ojačala	47,1	0,61	0,50
P2		53,4	0,50	
P3		51,7	0,40	
S1	staklo	57,6	0,61	0,62
S2		61,0	0,63	
S3		58,2	0,62	
C1	ugljik	65,3	0,72	0,63
C2		56,2	0,65	
C3		47,3	0,52	



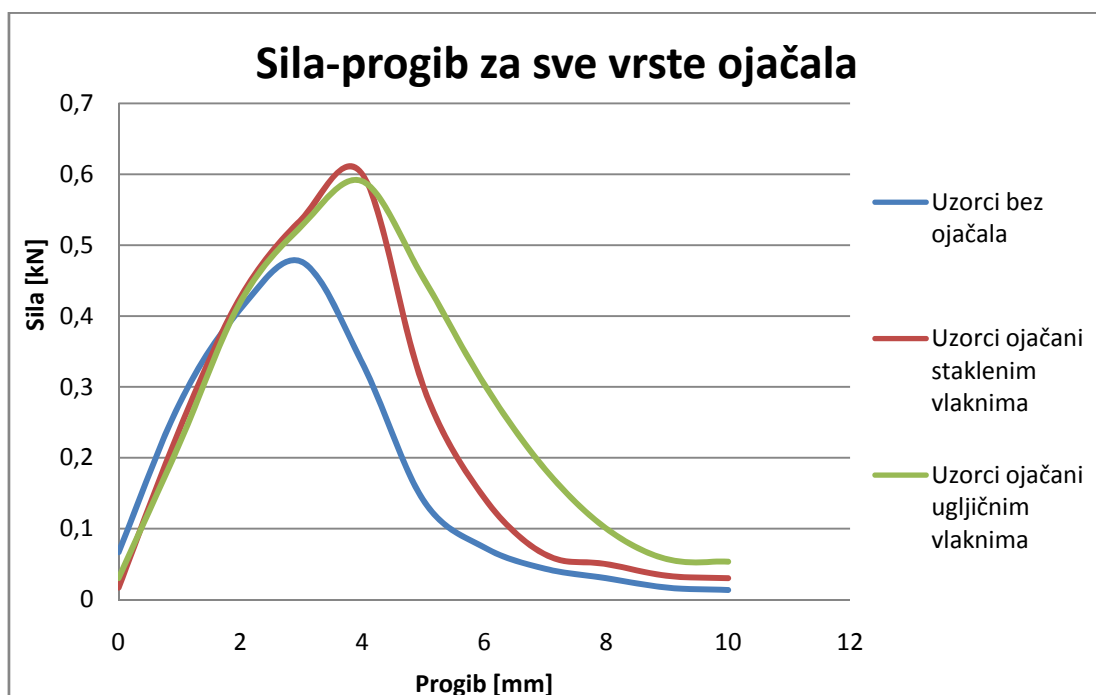
Slika 44. Aproximirani dijagram sila-progib za uzorke bez ojačala



Slika 45. Aproximirani dijagram sila-progib za uzorke ojačane staklenim vlaknima



Slika 46. Aproximirani dijagram sila-progib za uzorke ojačane ugljičnim vlaknima



Slika 47. Aproximirani dijagram sila-progib prosječnih vrijednosti svih uzoraka s obzirom na vrstu ojačala

5.4. PRORAČUN SAVOJNE ČVRSTOĆE

$$M_{sm} = \frac{F_m \cdot L_s}{4}$$

$$W = \frac{\pi \cdot d_0^3}{32}$$

$$R_{ms} = \frac{M_{sm}}{W}$$

$$R_{ms} = \frac{8 \cdot F_m \cdot L_s}{\pi \cdot d^3}$$

F_m – maksimalna sila [N]

M_{sm} – maksimalni moment savijanja [Nmm]

W - moment otpora presjeka [mm³]

L_s – razmak između oslonaca [mm]

d_0 – promjer uzorka [mm]

R_{ms} – savojna čvrstoća [N/mm²]

Pri ispitivanju trotočkastim savijanjem epruveta se opterećuje na sredini raspona savojnom silom pa je na tom mjestu maksimalni savojni moment M_{sm} .

Oznaka uzorka	Vrsta ojačala	Masa [g]	R_{ms} [MPa]	Prosječna \bar{R}_{ms} [MPa]
P1	bez ojačala	47,1	29,13	24,03
P2		53,4	23,87	
P3		51,7	19,10	
S1	staklo	57,6	29,13	29,42
S2		61,0	30,08	
S3		58,2	29,60	
C1	ugljik	65,3	34,38	30,08
C2		56,2	31,04	
C3		47,3	24,83	

Tablica 6. Savojna čvrstoća uzoraka prema vrsti ojačala

Prema dijagramu na slici 47. i podacima dobivenim u tablici 6. možemo zaključiti da je kod ojačanih uzoraka došlo do značajnog povišenja savojne čvrstoće u prosjeku od 25 %. Možemo zaključiti da su staklena vlakna dala stabilnije rezultate s manjim varijacijama oko 30 MPa, dok su se kod ugljičnih vlakana rezultati značajno razlikovali i varirali od 24,83 MPa do 34,38 MPa. Neojačani uzorci također su varirali od vrlo niske savojne čvrstoće od 19,1 MPa pa do 29,13 MPa. Međutim ispitan je premali broj uzoraka da bi se mogli donijeti neki sigurniji zaključci s obzirom da smo napravili samo po 3 uzorka s pojedinim ojačanjem. Nažalost zbog ograničenog vremena i resursa za ovaj rad nije bilo moguće napraviti veći broj uzorka. Prosječne vrijednosti poboljšanja čvrstoće između staklenih i ugljičnih vlakana su zanemarive, s time da su ugljična vlakna u blagoj prednosti. Vrlo je vjerojatno da bi boljom optimizacijom procesa i samog načina ulaganja i broja ojačanja bilo moguće dobiti i značajno bolje rezultate. Vrijednosti progiba pri maksimalnoj sili također su povećane od prosječnih 3 mm kod neojačanih uzoraka do 4 mm kod staklom i ugljikom ojačanih uzoraka. Također dobili smo značajne varijacije u masi uzoraka, a time i u relativnoj gustoći (ρ/ρ_s). Kod ojačanih uzoraka dobili smo značajno bolje rezultate za uzorke s većom masom, a samim time i većom relativnom gustoćom te manjom poroznošću kao što se je i očekivalo.

6. ZAKLJUČAK

Metalne pjene su zanimljiv konstrukcijski materijal koji očito još nije dovoljno istražen s obzirom na svoje potencijale. Ojačanja metalnih pjena su moguća bez značajnog porasta mase i troška materijala, te se očekuje daljnji razvoj na tom području.

U radu su korištena ojačanja u obliku staklenih i ugljičnih vlakana, kao prekursor korišten je ALULIGHT AISi 10 TiH₂ - 0,8. Napravljeni su uzorci dimenzija $\varnothing 20 \times 250$ mm tehnologijom pjenjenja prekursora u kalupu. Za svaki uzorak koristili smo masu od 75 grama narezanog prekursora, jer se je tom masom dobila zadovoljavajuća relativna gustoća (ρ/ρ_s). Relativna gustoća je ipak varirala od prosječnih 0,230 za neojačane uzorke, 0,278 za staklenim vlaknima ojačane uzorke i 0,265 za ugljičnim vlaknima ojačane uzorke. Razlog je istrošeni kalup koji nije dobro brtvio i ograničeni proces izrade. Nije bilo moguće koristiti veću količinu vlakana što bi rezultiralo i boljim rezultatima u odnosu na neojačane uzorke. Daljnja poboljšanja su moguća variranjem količine i tipa ojačala, te njihovim rasporedom.

Savojna čvrstoća ojačanih uzoraka je poboljšana za prosječno 25 % što je primjetno poboljšanje bez obzira na velika odstupanja na pojedinim uzorcima. Možemo zaključiti da su staklena vlakna dala stabilnije rezultate s manjim varijacijama oko 30 MPa, dok su se kod ugljičnih vlakana rezultati značajno razlikovali i varirali od 24,83 MPa do 34,38 MPa. Neojačani uzorci također su varirali od vrlo niske savojne čvrstoće od 19,1 MPa pa do 29,13 MPa. Prosječne vrijednosti poboljšanja čvrstoće između staklenih i ugljičnih vlakana su zanemarive, s time da su ugljična vlakna u blagoj prednosti. Vrijednosti progiba pri maksimalnoj sili također su povećane od prosječnih 3 mm kod neojačanih uzoraka do 4 mm kod staklom i ugljikom ojačanih uzoraka što je značajno poboljšanje od 33 %.

Čim se ovlada procesima proizvodnje, metalne pjene će pronaći svoje mjesto u velikoj većini inženjerske primjene. U prilog tome govori i činjenica da jedna od najzastupljenijih industrija, industrija transportnih sredstava, ulaže značajna financijska sredstva u njihov razvoj.

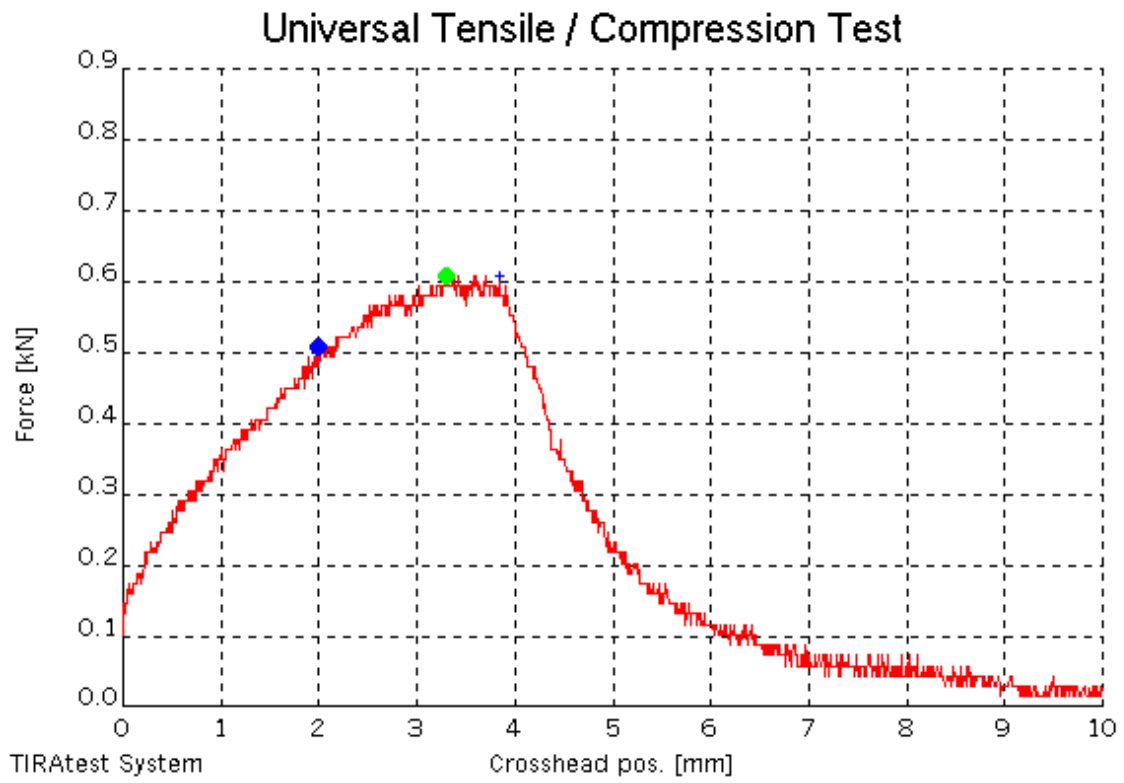
U nekom daljnjem istraživanju poželjno bi bilo izraditi mnogo veći broj uzoraka s pojedinim ojačalima te manjim razlikama u masi uzorka što bi zahtijevalo znatno više vremena i utrošenog materijala, kojeg mi nažalost nismo imali na raspolaganju. Međutim i ovako su dobiveni rezultati koji pokazuju potencijalni napredak.

7. LITERATURA

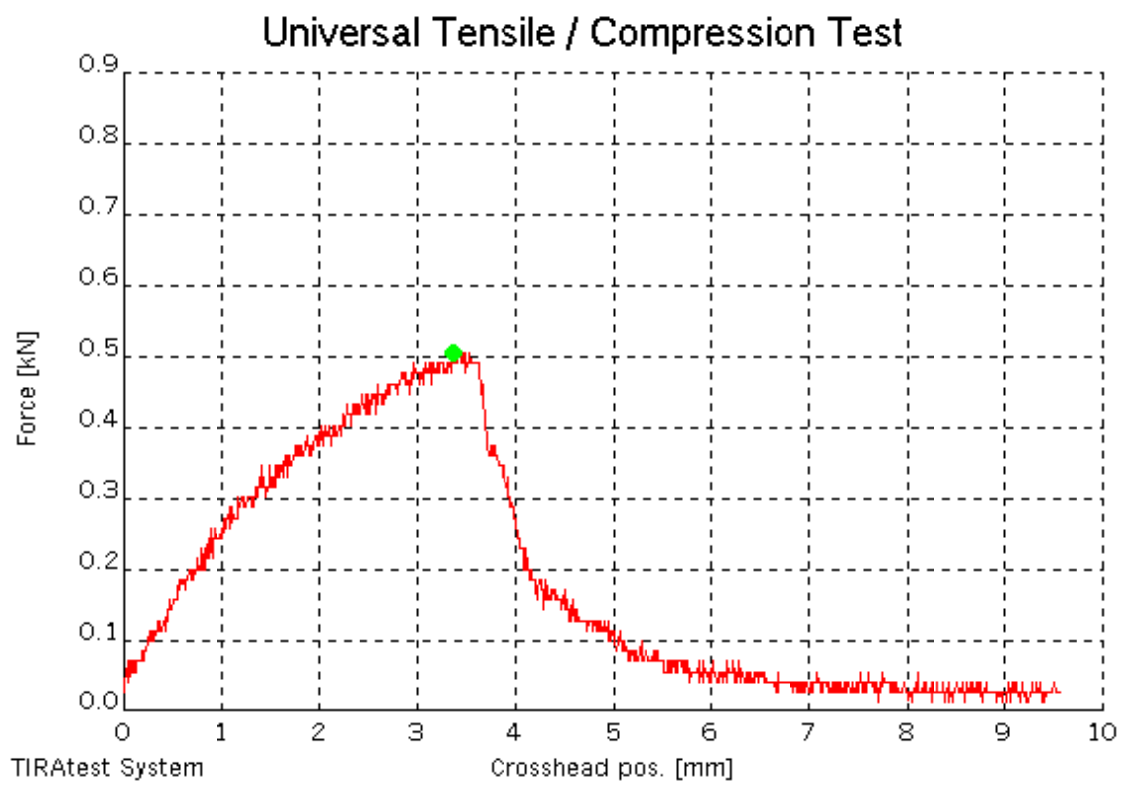
- [1] T. Filetin, I. Kramer, G Marić: Metalne Pjene, Hrvatsko Društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [2] <http://www.iwu.fraunhofer.de/schaumzentrum/images/photos/rohrprofile.jpg>
- [3] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
- [4] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley: Metal foams: A design guide, Butterworth – Heinemann, Woburn, USA, 2000.
- [5] J. Banhart; Metallschäume, MIT Verlag, Bremen, 1997.
- [6] Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams John Banhart, Bremen, Germany, 2000.
- [7] W. Krach, T. Daxner, F.G. Rammerstorfer: Metallic Foams versus Human Bones, Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000., Paper No. 1160
- [8] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson: Compressive and tensile behaviour of aluminium foam, Materials Science and Engineering A270 (1999.), p. 113 – 124
- [9] C. Motz, R. Pippan: Deformation behaviour of closed – cell aluminium foams in tension, Acta mater. 49(2001.), p. 2463-2470
- [10] F. Simančik, J. Kovačik, N. Minarikova: «Bending properties of foamed aluminium panels and sandwiches», MRS Symposium Proceedings (Ed. by. D.S. Schwartz, D.S. Shih, A.G. Evans and H.N.G. Wadley), Vol. 521, Materials Research Society, Warrendale, Pennsylvania, 1998., p. 91
- [11] F. Simančik, H. P. Degischer, H. Worz : «Foamed aluminium – light structural and insulation material», Euromat 1995., Venice / Padua, Italy, 25. – 28. 09. 1995.
- [12] František Simančik: “Aluminium Foam potential for ultra-lightweight structures”, Institute of Materials & Machine Mechanics Slovak Academy of Sciences, Bratislava, January 2004.
- [13] www.npl.co.uk/npl/cmmt/metal_foams/applications.html

8. PRILOZI

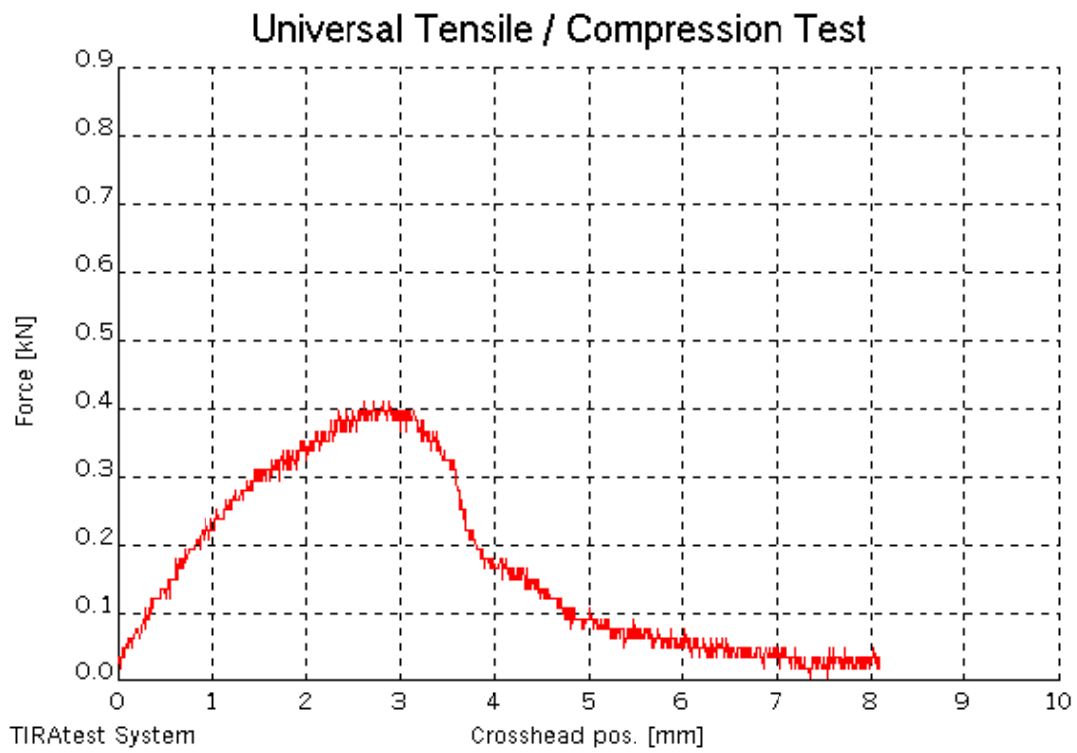
U prilogu se nalaze dijagrami sila-progib dobiveni ispitivanjem na savijanje, za uzorke bez ojačanja P1, P2 i P3, uzorke ojačane staklenim vlaknima S1, S2 i S3, te uzorke ojačane ugljičnim vlaknima C1, C2 i C3.



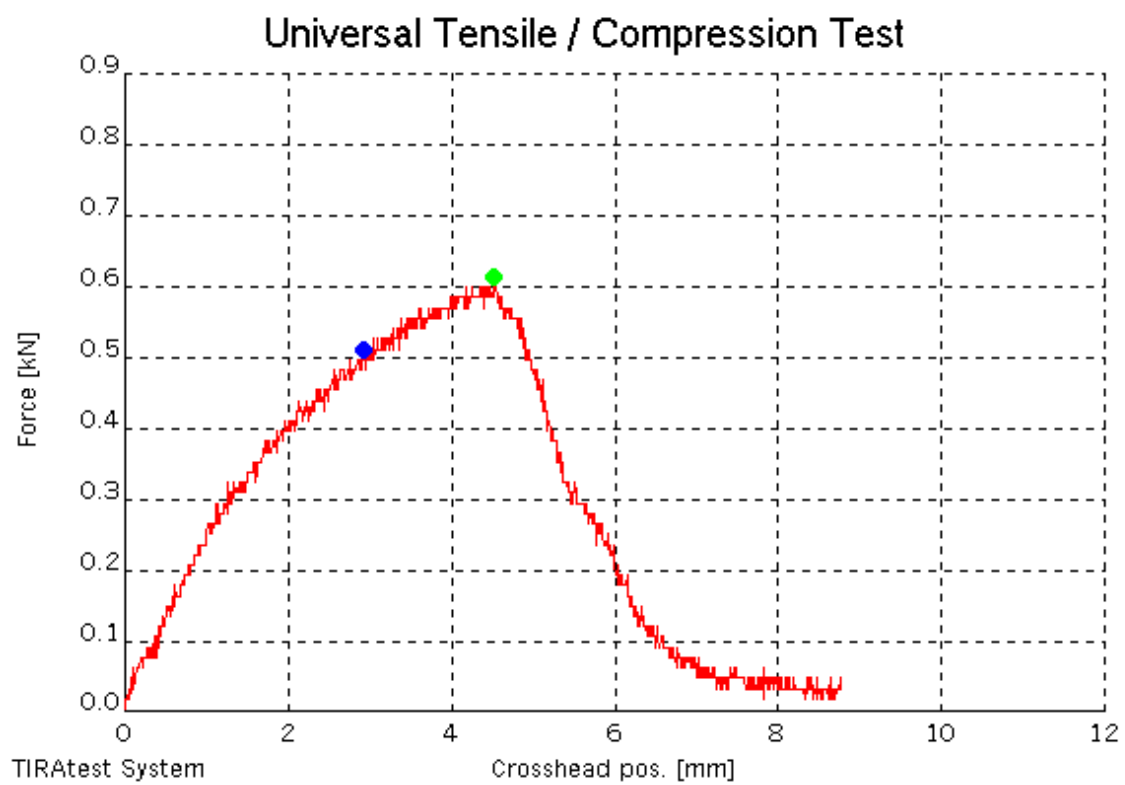
Dijagram sila-progib za uzorak bez ojačanja P1



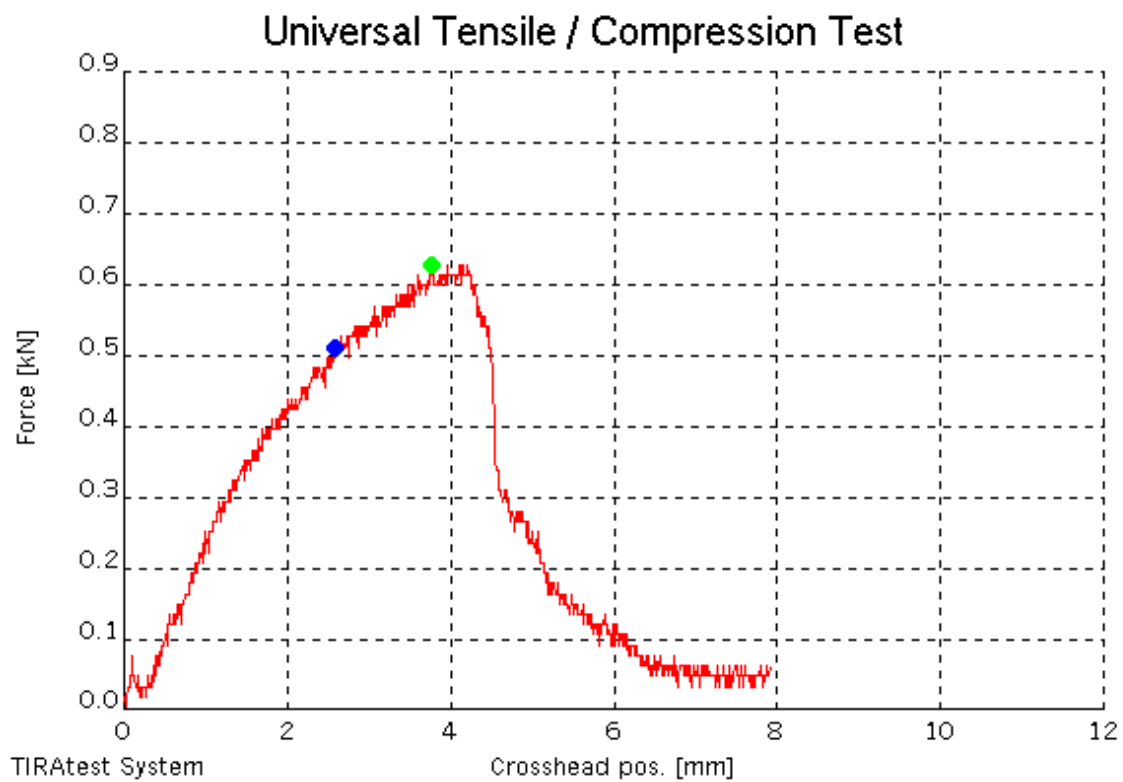
Dijagram sila-progib za uzorak bez ojačanja P2



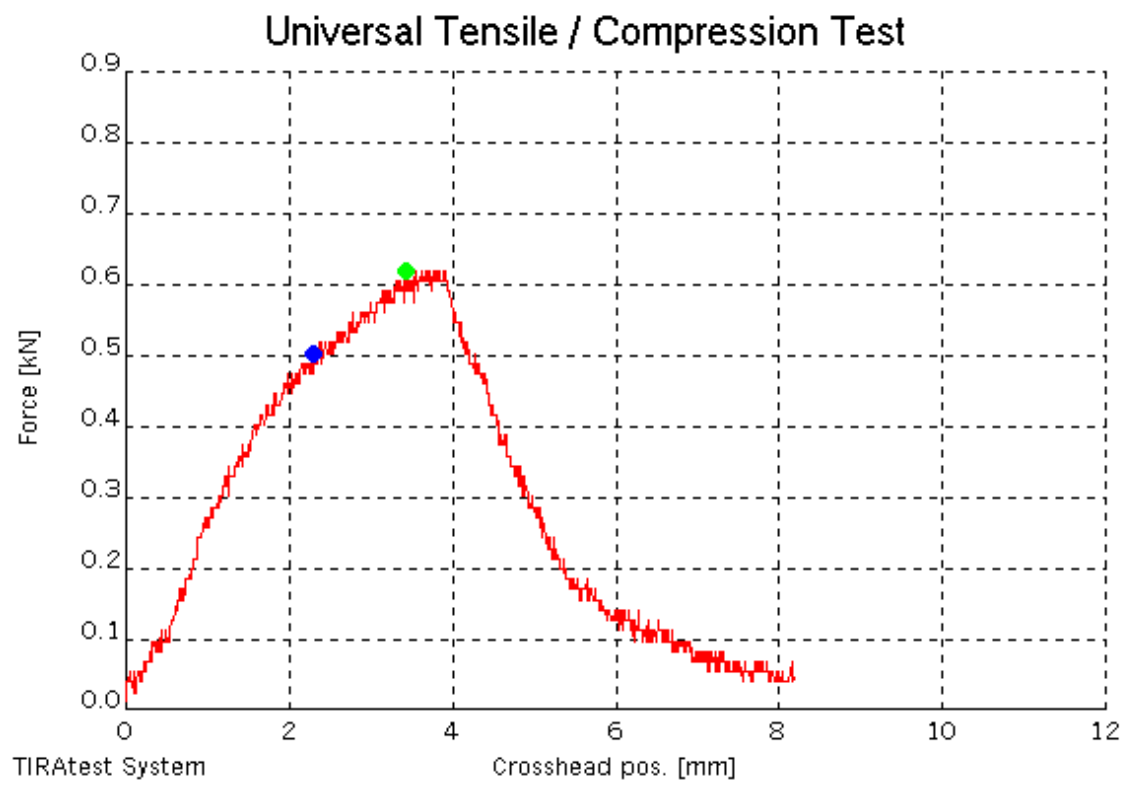
Dijagram sila-progib za uzorak bez ojačanja P3



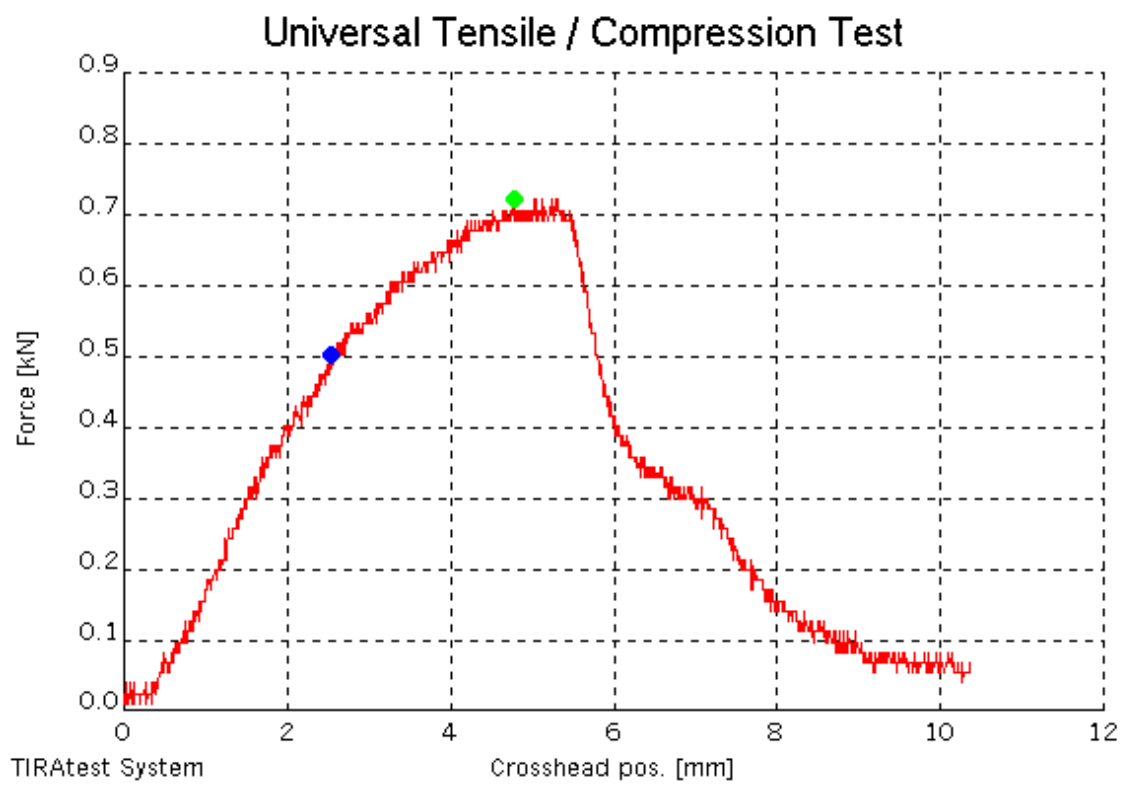
Dijagram sila progib za uzorak ojačan staklenim vlaknima S1



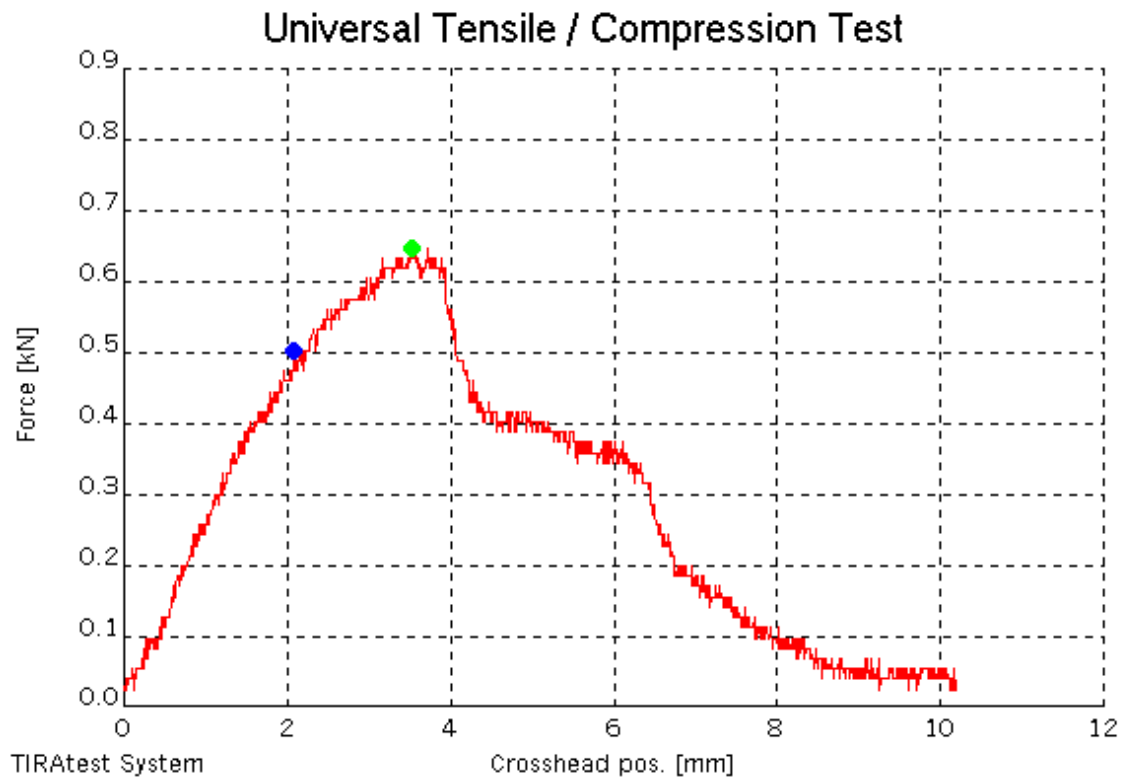
Dijagram sila progib za uzorak ojačan staklenim vlaknima S2



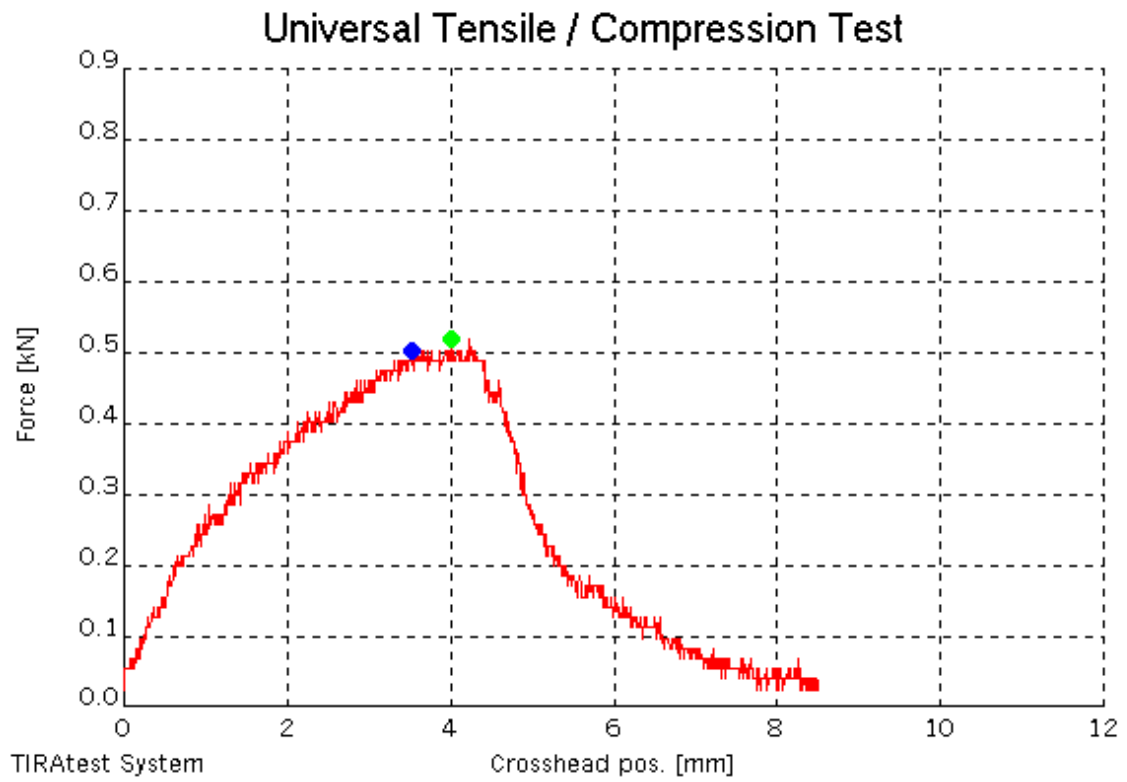
Dijagram sila progib za uzorak ojačan staklenim vlaknima S3



Dijagram sila progib za uzorak ojačanim ugljičnim vlaknima C1



Dijagram sila progib za uzorak ojačanim ugljičnim vlaknima C2



Dijagram sila progib za uzorak ojačanim ugljičnim vlaknima C3