

# Precipitacijsko očvršćivanje aluminijeve pjene

---

**Bobinac, Silvio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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:235:798416>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Silvio Bobinac**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Čorić, dipl. ing.

Student:

Silvio Bobinac

Zagreb, 2021.

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

*Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Danku Ćoriću te asistentu Tomislavu Rodingeru na pomoći i vremenu koje su mi posvetili prilikom izrade ovog rada. Hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su mi uvijek bili podrška tijekom studija. Najviše hvala dragom Bogu koji mi je dao zdravlja i motivacije da završim ovaj studij.*

Silvio Bobinac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

### DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **SILVIO BOBINAC** Mat. br.: 0035213094

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Precipitacijsko očvršćivanje aluminijeve pjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Precipitation hardening of aluminum foam**

Opis zadatka:

Metalne pjene predstavljaju relativno novu vrstu materijala porozne građe i posljedično karakterističnih svojstava. Osnovna svojstva metalnih pjena proizlaze od vrste materijala stijenki ćelija, oblika ćelija (zatvorene i otvorene) i procesa proizvodnje. Svojstva pjena moguće je naknadno modificirati određenim postupcima toplinske obrade u svrhu ispunjenja složenih eksploatacijskih zahtjeva. Jedan od mehanizama očvršćivanja je toplinsko očvršćivanje koje se provodi postupkom rastopnog žarenja i dozrijevanja (precipitacijsko očvršćivanje).

U radu je potrebno obraditi sljedeće:


1. Dati literaturni pregled razvoja, vrsta i tehnologija izrade metalnih pjena.
2. Detaljno opisati postupak izrade pjene temeljen na plinom oslobođenim česticama rastvorenim u polučvrstoj fazi.
3. Navesti mehanizme očvršćivanja aluminija i njegovih legura.
4. Napraviti uzorke aluminijeve pjene na njima provesti toplinsko očvršćivanje uz različite parametre temperature i vremena.
5. Ispitati tlačna svojstva toplinski obrađenih uzoraka.
6. Analizirati dobivene rezultate i donijeti odgovarajuće zaključke.


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

Zadatak zadan:  
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:  
2. prosinca 2021.

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

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Danko Čorić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Mislavka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA .....</b>	<b>2</b>
2.1 Plinom oslobođene čestice rastvorene u talini .....	2
2.2 Ubrizgavanje plina u talinu .....	3
2.3 Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi .....	4
2.4 Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama.....	6
2.5 Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv .....	8
2.6 Eutektičko skrućivanje plin – metal .....	9
2.7 Ekspanzija plina u talini .....	9
2.8 Taloženje metala na ćelijaste praoblake.....	10
2.9 Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera.....	11
<b>3 SVOJSTVA METALNIH PJENA .....</b>	<b>13</b>
3.1 Vlačna čvrstoća .....	13
3.2 Tlačna čvrstoća.....	14
3.3 Krutost.....	15
3.4 Vatrootpornost.....	16
3.5 Toplinska vodljivost.....	16
<b>4 PRIMJENA METALNIH PJENA .....</b>	<b>17</b>
4.1 Medicina.....	17
4.2 Brodogradnja.....	18
4.3 Rashladni uređaji i izmjenjivači topline.....	19
4.4 Zrakoplovna industrija .....	19
4.5 Automobilska industrija .....	20
4.6 Građevinarstvo .....	21
4.7 Željeznice .....	22
<b>5 MEHANIZMI OČVRSNUĆA.....</b>	<b>23</b>
5.1 Očvrsnuće kristalima mješancima.....	23
5.2 Očvrsnuće hladnom deformacijom .....	23
5.3 Očvrsnuće granicama zrna .....	24

---

5.4 Precipitacijsko očvršnuće .....	24
6 EKSPERIMENTALNI DIO.....	31
6.1 Postupak izrade uzoraka od aluminijske pjene .....	31
6.2 Precipitacijsko očvršćivanje upjenjenih uzoraka .....	37
6.3 Ispitivanje tlačnih svojstava toplinski obrađenih uzoraka.....	40
ZAKLJUČAK .....	51
LITERATURA.....	52

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1 Prikaz strukture metalne pjene [1]	1
Slika 2.1.1 Postupak izrade "Alporas" metalne pjene [3]	3
Slika 2.2.1 Proizvodnja metalne pjene ubrizgavanjem plina u talinu [2]	4
Slika 2.3.1 Proces izrade metalne pjene "Foaminal" postupkom [25]	6
Slika 2.4.1 Proces nastajanja metalnih pjena s kuglastim šupljinama [3]	7
Slika 2.4.2 Proizvodnja metalne pjene s kuglastim šupljinama IFAM postupkom [3]	8
Slika 2.5.1 Nastajanje metalne pjene uslijed povezivanja dva materijala od kojih je jedan topiv: a) rastaljeni metal (aluminij) se ulijeva u sloj topivih čestica;	8
Slika 2.7.1 Proces nastajanja metalne pjene širenjem inertnog plina[4]	10
Slika 2.8.1 Prikaz strukture INCO metalne pjene [5]	11
Slika 2.9.1 Postupak izrade "ERG-Duocel" pjene [4]	12
Slika 2.9.2 Prikaz mikrostrukture "ERG-Duocel" metalne pjene [6]	12
Slika 3.1.1 Dijagram naprezanje istežanje metalnih pjena [7]	13
Slika 3.2.1 Dijagram naprezanje-deformacija tlačno opterećenih metalnih pjena:	14
Slika 3.2.2 Krivulje naprezanje-deformacija kod tlačnog opterećivanja aluminijevih pjena [7]	15
Slika 3.3.1 Ovisnost modula elastičnosti i gustoće metalnih pjena [8]	15
Slika 4.1.1 Implantat titanijeve pjene [9]	18
Slika 4.2.1 Plutanje metalne pjene na vodi [10]	18
Slika 4.3.1 Prikaz provođenja topline u pjenama s otvorenim ćelijama [11]	19
Slika 4.4.1 Obloga zrakoplovnog motora od metalne pjene [12]	20
Slika 4.5.1 Prikaz zona po automobilu gdje se ugrađuju metalne pjene	21
Slika 4.6.1 Filter tekućine koja sadrži sitne krute čestice [13]	21
Slika 4.7.1 Prednji dio konstrukcije vlaka izrađen od kompozitnog sendviča s jezgrom od aluminijeve pjene [14]	22
Slika 5.4.1 Prikaz općeg dijagrama stanja i postupka precipitacijskog	26
Slika 5.4.2 Vrste precipitata [21]	28
Slika 5.4.3 Vlačna čvrstoća u odnosu na vrijeme i temperaturu dozrijevanja [21]	29
Slika 6.1.1 Korišteni prekursor sastava AlMgSi <sub>0,6</sub> sa 0,4 mas % TiH <sub>2</sub>	31
Slika 6.1.2 Vaganje aluminijevog prekursora	33
Slika 6.1.3 Rastavljeni kalup sa prekursorom	34
Slika 6.1.4 Sastavljeni kalup sa prekursorom	34
Slika 6.1.5 Elektrootporna zvonasta peć	35
Slika 6.1.6 Trenutak istjecanja pjene iz kalupa	35
Slika 6.1.7 Uzorci aluminijeve pjene	36
Slika 6.2.1 Dijagram stanja Al-Mg [21]	38
Slika 6.2.2 Dijagram stanja Al-Si [21]	38
Slika 6.2.3 Komorna elektro peć	39
Slika 6.3.1 Kidalica EU 40 mod.	41
Slika 6.3.2 Postupak tlačnog ispitivanja i uzorcni nakon ispitivanja	41
Slika 6.3.3 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 1	42
Slika 6.3.4 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 2	42
Slika 6.3.5 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 3	43
Slika 6.3.6 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 4	43
Slika 6.3.7 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 5	44
Slika 6.3.8 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 6	44
Slika 6.3.9 Dijagram naprezanje-deformacija sa specifičnom apsorpcijom energijom kao površinom ispod krivulje [24]	45



---

Slika 6.3.10 Dijagram naprezanje-deformacija s karakterističnim svojstvima tlačnog ispitivanja ćelijastih materijala [24]	46
Slika 6.3.11 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 1	47
Slika 6.3.12 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 2	48
Slika 6.3.13 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 3	48
Slika 6.3.14 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 4	49
Slika 6.3.15 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 5	49
Slika 6.3.16 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 6	50

---

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1. Primjena metalnih pjena [2].....</b>	<b>17</b>
<b>Tablica 2. Prikaz zona automobila izrađenih od metalne pjene [2] .....</b>	<b>20</b>
<b>Tablica 3. Oznake stanja toplinske obrade aluminijevih legura [23].....</b>	<b>30</b>
<b>Tablica 4. Izmjerene vrijednosti mase, gustoće i poroznosti uzoraka.....</b>	<b>36</b>
<b>Tablica 5. Rezultati kemijske analize prekursora .....</b>	<b>37</b>
<b>Tablica 6. Parametri toplinske obrade upjenjenih uzoraka .....</b>	<b>40</b>
<b>Tablica 7. Rezultati tlačnog ispitivanja .....</b>	<b>46</b>

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_{plt-E}$	%	Deformacija pri završetku platoa
$b$	-	Burgersov vektor
$e_d$	%	Deformacija
$G$	GPa	Modul smika
$h$	mm	Visina kalupa
$m$	kg	Masa uzorka aluminijeve pjene
$m_{Al}$	kg	Masa uzoraka bez poroznosti
$E$	GPa	Modul elastičnosti
$E_{eff}$	%	Efikasnost specifične apsorpcijske energije
$E_v$	MJ/m <sup>3</sup>	Specifična apsorpcija energije
$p$	MPa	Tlak
$r$	mm	Polumjer kalupa
$R_{et}$	MPa	Granica stlačivanja
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$(\Delta Re)_{Pr}$	MPa	Prirast granice razvlačenja precipitacijskim meh.
$R_{plt}$	MPa	Aritmetička sredina naprezanja izmjerenih pri deformaciji $e_d = 20\%$ i $e_d = 40\%$
$R_{130}$	MPa	Naprezanje pri $R = 1,3 \cdot R_{plt}$
$r_s$	%	Ravnotežni maseni udio
$V_k$	m <sup>3</sup>	Volumen kalupa
$\varepsilon$	mm/mm	Deformacija zgušnjavanja
$\lambda$	W/mK	Toplinska vodljivost
$\lambda_l$	nm	Udaljenost precipitata (od centra do centra)
$\nu$	-	Poissonov faktor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$\rho_{Al}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća aluminijske pjene
$\rho_{rel.}$	%	Relativna gustoća

---

**POPIS KRATICA**

Kratika	Opis
HIP	Vruće izostatsko prešanje (engl. <i>Hot Isostatic Pressing</i> )
CVD	Kemijsko taloženje iz parne faze (engl. <i>Chemical Vapor Deposition</i> )
AFS	Kompozitni sendvič od aluminijske pjene (engl. <i>Aluminium Foam Sandwich</i> )
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka (engl. <i>body centered cubic</i> )
BCT	Prostorno centrirana tetragonalna rešetka (engl. <i>body centered tetragonal</i> )

**SAŽETAK**

U ovome radu su opisane metalne pjene koje predstavljaju relativno novu vrstu materijala porozne građe i posljedično karakterističnih svojstava. Osnovna svojstava metalnih pjena proizlaze od vrste materijala stijenki ćelija, oblika ćelija (zatvorene i otvorene) i procesa proizvodnje. Svojstva pjena moguće je naknadno modificirati određenim postupcima toplinske obrade u svrhu ispunjenja složenih eksploatacijskih zahtjeva. Jedan od mehanizma očvršćivanja je toplinsko očvršćivanje koje se provodi postupkom rastopnog žarenja i dozrijevanja nazvano precipitacijsko očvršćivanje. U eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su uzorci aluminijskih pjena poznati pod nazivom "Alulight". Zatim je provedeno precipitacijsko očvršćivanje uzoraka metalnih pjena i prateća tlačna ispitivanja na kidalici da bi se odredila specifična apsorpcijska energija.

Ključne riječi: metalne pjene, rastopno žarenje, dozrijevanje, precipitacijsko očvršćivanje, Alulight, apsorpcijska energija.

---

**SUMMARY**

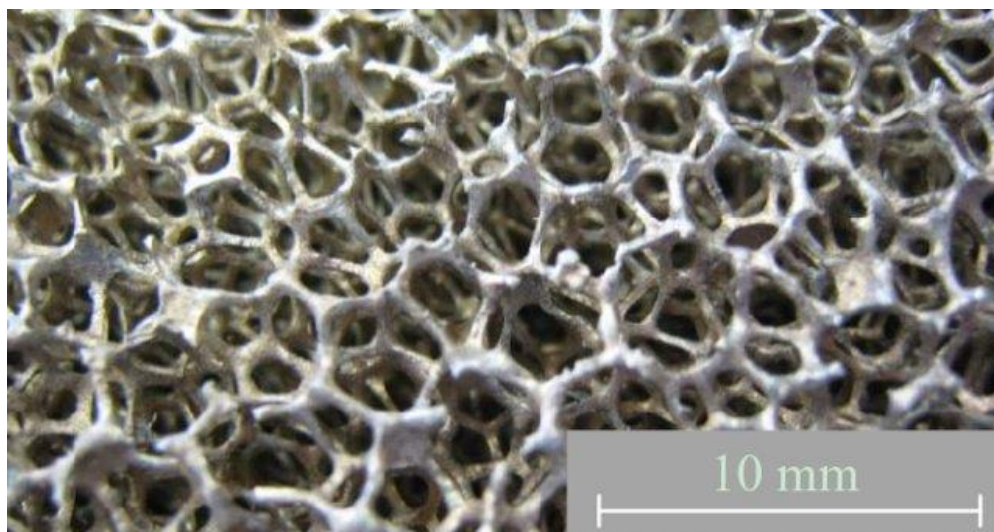
In this thesis metal foams that represent a relatively new type of material with a porous structure and consequently characteristic properties are described. The basic properties of metal foams derive from the type of cell wall material, the shape of the cells (closed and open) and the production process. The properties of the foams can be afterwards modified by certain heat treatment processes in order to meet complex operational requirements. One of the hardening mechanisms is thermal hardening which is carried out by homogenization and aging heat treatment called precipitation hardening. In the experimental part, samples of metal foams were made from a precursor by the process called Alulight. Precipitating hardenings were then performed, followed by pressure testing of the heat-treated samples which were then performed to determine the specific absorption energy.

Key words: metal foams, homogenization, aging, precipitation hardening, Alulight, absorption energy.

## 1 UVOD

Razvojem tehnologije i znanosti te otkrivanjem novih materijala razvijene su metalne pjene. Metalne pjene oponašaju materijale iz prirode koji imaju strukturu i građu u obliku ćelija. U tu skupinu mogu se ubrojiti drvo, kosti, koralji, spužve, određene vrste kamena te razni drugi prirodni materijali. Metalne pjene proizvode se iz različitih metala, a najpoznatije se temelje na aluminiju (Al), čeliku, titaniju (Ti), olovu (Pb), niklu (Ni), bakru (Cu) i zlatu (Au).

Svojstva metalnih pjena određuju se prema vrsti osnovnog materijala, načinu proizvodnje, poroznosti koja varira između 40 % i 90 % te prema veličini ćelija koje mogu biti zatvorenog i otvorenog tipa. Svojstva koja opisuju metalne pjene su niska gustoća, vatrootpornost, izuzetno prigušivanje energije udara, vrlo dobra električna vodljivost te odlično prigušivanje vibracija i zvuka. Metalne pjene nude velik prostor za razvitak jer se smatraju novim oblikom metalnih materijala. Nedovoljno su poznate znanstvenicima jer se istražuju tek 60-ak godina, ali otkriveno je već mnogo načina njihova dobivanja, a nove tehnologije se stalno iznalaze. Na slici 1.1 može se vidjeti prikaz strukture metalne pjene.



**Slika 1.1 Prikaz strukture metalne pjene [1]**

## 2 POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

Pri proizvodnji metalnih pjena potrebne su sirovine koje mogu biti u tekućem ili praškastom stanju. Poznato je više načina proizvodnje metalnih pjena dok se komercijalno koristi tek njih nekoliko. Četiri različita područja u koja su podijeljeni načini proizvodnje metalnih pjena su:

- oblikovanje pjene u čvrstoj fazi,
- oblikovanje pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze,
- oblikovanje pjene u rastaljenoj fazi,
- oblikovanje pjene taloženjem iz parne faze.

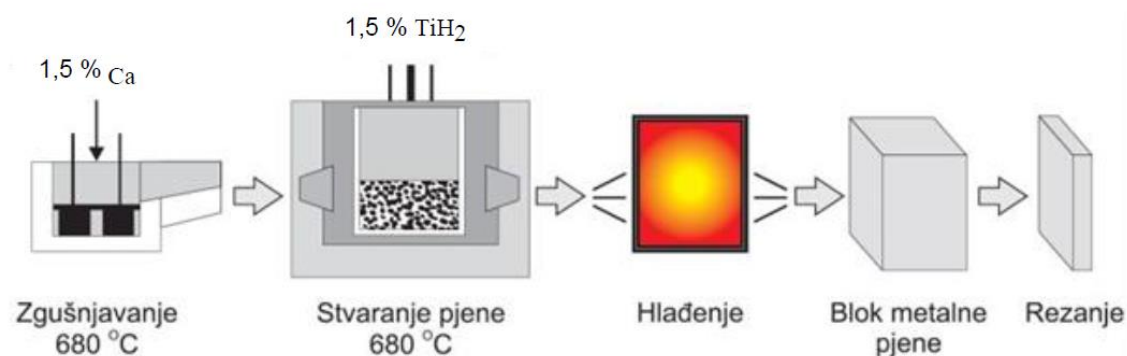
Svaki način proizvodnje metalnih pjena utječe na gustoću, otvorenost ćelija, oblik i veličinu ćelija.

### 2.1 Plinom oslobođene čestice rastvorene u talini

Navedeni proces odvija se na način da se talini aluminijska na povišenoj temperaturi dodaje kalcij (Ca) koji služi za povećanje viskoznosti taline. U toj fazi procesa u temperaturnom rasponu 670 °C – 690 °C dodaje se približno 1,5 %Ca. Dolazi do povećavanja viskoznosti uslijed nastanka spojeva kao što su  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_4\text{Ca}$  te  $\text{CaO}$ . Zatim se najčešće dodaje 1 – 2 % $\text{TiH}_2$  koji služi kao agens za upjenjivanje koji se raspada na  $\text{H}_2$  i  $\text{Ti}$  pri temperaturama iznad 465 °C. Za stvaranje mjehurića u talini zaslužan je  $\text{H}_2$ . Hlađenjem na sobnu temperaturu plin ostaje zarobljen unutar skrućene pjene. Industrijski naziv za pjene nastale ovim postupkom je “ALPORAS”.

Volumni udio agensa za upjenjivanje dodanog u talinu u kombinaciji s uvjetima hlađenja u konačnici određuje relativnu gustoću te veličinu ćelija. Veličina ćelija može se mijenjati od 0,5 mm do 5 mm promjenom količine agensa za upjenjivanje, te uvjetima upjenjivanja i hlađenja. Mogu se proizvesti pjene vrlo visokog stupnja poroznosti. Tijekom proizvodnje, “Alporas” pjena ima pretežno zatvorene ćelije, iako se naknadna obrada valjanjem može upotrijebiti za lomljenje staničnih stijenki kako bi se povećalo njihovo akustičko prigušivanje. Na slici 2.1.1 može se vidjeti postupak izrade „Alporas“ metalne pjene. [2]



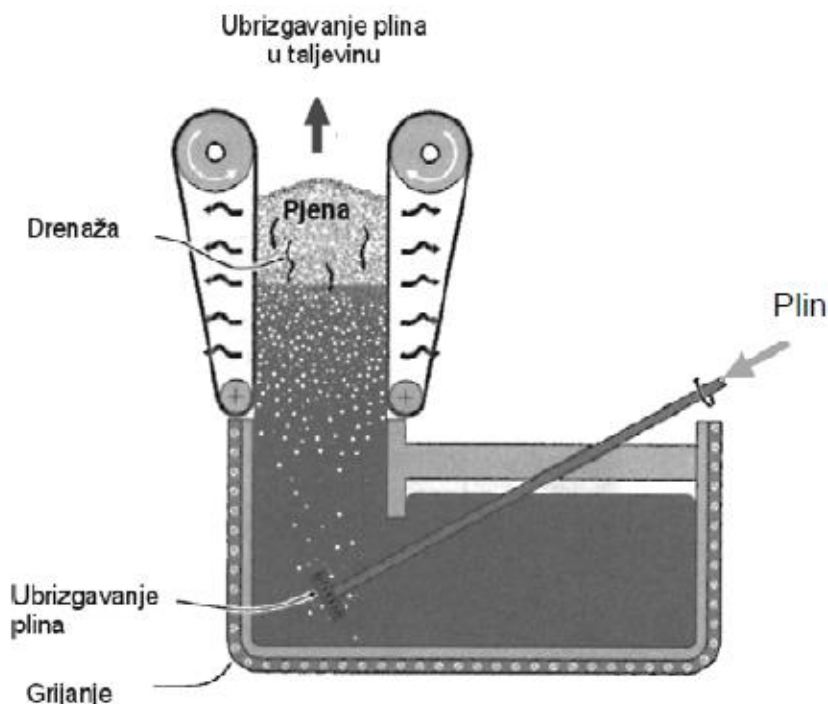


Slika 2.1.1 Postupak izrade “Alporas“ metalne pjene [3]

Danas se na ovaj način izrađuju samo pjene od aluminijevih legura jer vodik nagriza mnoge metale i zato što se raspadanje TiH<sub>2</sub> događa prebrzo u legurama s višim talištem. Istraživanja usmjerena na korištenje alternativnih agenasa za upjenjivanje (karbonati, nitrati) s višim temperaturama razgradnje nude mogućnost primjene ove metode i za upjenjivanje željeza, čelika i legura na bazi nikla. [3]

## 2.2 Ubrizgavanje plina u talinu

Čiste metalne taline ne mogu se lako upjeniti ubrizgavanjem plina u njih. Odvod tekućine kroz stijenke mjehurića obično se događa prebrzo da bi se stvorila pjena koja ostaje stabilna dovoljno dugo da skrutne. Međutim, dodavanjem 10-30 % malih, netopljivih ili sporo otapajućih čestica, poput aluminijevog oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ili silicijevog karbida (SiC), povećavaju viskoznost aluminijeve taline i ometaju odvodnju u stijenkama ćelija, stabilizirajući pjenu. Postupke ubrizgavanja plina najlakše je provesti s legurama aluminija jer imaju malu gustoću i ne oksidiraju pretjerano kada je talina izložena zraku ili drugim plinovima koji sadrže kisik. Postoji nekoliko varijanti ove metode, od kojih je jedna prikazana na slici 2.2.1. Čisti aluminij ili slitina aluminija se topi i dodaje se 5-15 mas. % stabilizirajućih keramičkih čestica. Ove čestice promjera 0,5-25 μm, mogu biti od glinice, cirkonija (Zr), silicijevog karbida (SiC) ili titanijevog diborida (TiB<sub>2</sub>).



Slika 2.2.1 Proizvodnja metalne pjene ubrizgavanjem plina u talinu [2]

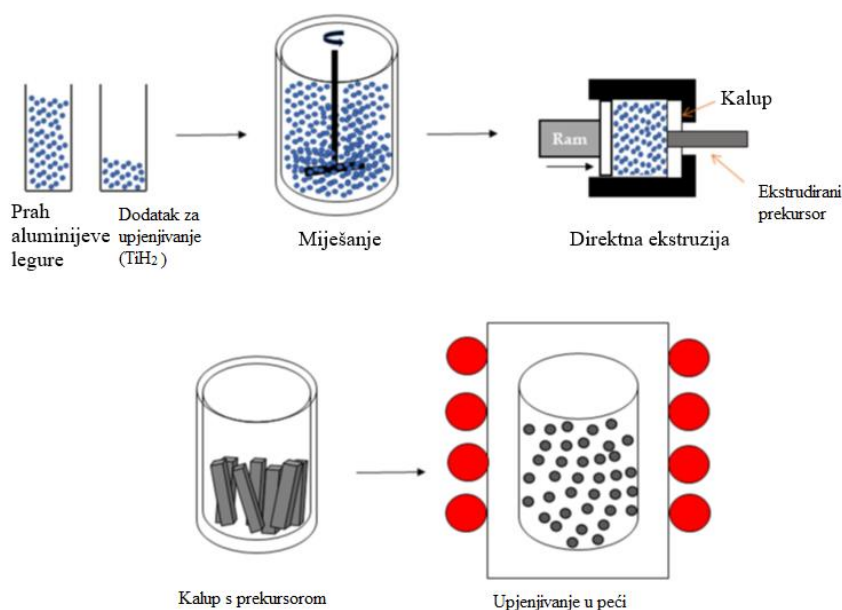
Za stvaranje mjehurića unutar rastaljenog aluminijskog legiranja mogu se koristiti različiti plinovi. Najčešće se koriste zrak, ugljični dioksid, kisik, inertni plinovi te voda koja se također može ubrizgati u tekući aluminij kako bi se stvorili mjehurići. Mjehurići nastali ovim postupkom dižu se na površinu taline, suše se, a zatim počinju skrućivati. Toplinski gradijent u pjeni određuje koliko dugo pjena ostaje tekuća ili polučvrsta, a time i opseg drenaže. Pjene zatvorenih ćelija niske relativne gustoće mogu se proizvesti pažljivom kontrolom procesa ubrizgavanja plina i regulacijom brzine hlađenja pjene. Različite se tehnike mogu koristiti za izvlačenje pjene i stvaranje ploča širine do 1 m i debljine 0,2 m koje imaju zatvorene ćelije promjera između 5 i 20 mm. Norsk-Hydro i Cymat isporučuju upjenjene aluminijske legure napravljene na ovaj način. Ovaj pristup je najjeftiniji za implementaciju i rezultira pjenom s relativnim gustoćama u rasponu od 0,03 do 0,1. Trenutno je postupak ograničen na proizvodnju aluminijskih pjena. [2]

### 2.3 Plinom oslobođene čestice rastvorene u polukrutoj fazi

Agensi za upjenjivanje mogu se unijeti u metale u krutom stanju miješanjem i prešanjem praha. Titanijev hidrid ( $\text{TiH}_2$ ), široko korišten agens za upjenjivanje, počinje se raspadati na oko  $465\text{ }^\circ\text{C}$ , što je znatno ispod tališta čistog aluminijskog legiranja ( $660\text{ }^\circ\text{C}$ ). Prilikom miješanja prahova aluminijskog legiranja i agensa za upjenjivanje potrebno je odabrati takve parametre da rasprostranjenost

agensa za upjenjivanje bude homogena unutar mješavine. Nakon miješanja prahove je potrebno kompaktirati na što veću relativnu gustoću. Tako kompaktirani poluproizvod (prekursor) stavlja se u kalup i u peć na potrebnu temperaturu gdje zagrijavanjem prekursora dolazi do oslobađanja plina iz  $TiH_2$  i stvaranja ćelija. Hlađenjem se zatim proizvod stabilizira u pjenu. Nekoliko postrojenja kao što su IFAM u Bremenu u Njemačkoj te LKR i Neuman u Austriji razvile su ovaj postupak.

Shematski dijagram proizvodnog postupka prikazan je na slici 2.3.1 Započinje miješanjem praha agensa za upjenjivanje s prahom aluminija ili legure aluminija. Nakon što se sastojci homogeniziraju miješanjem, mješavina se hladno kompaktira i zatim ekstrudira u šipku ili ploču. Taj materijal usitni se na manje dijelove, stavi u zatvoreni kalup i zagrije na temperaturu između solidusa i likvidusa. Tada se agens za upjenjivanje počinje raspadati uz dodatnu prisutnost visokog unutarnjeg tlaka. Raspadom agensa za upjenjivanje na krutu i plinovitu fazu aluminij bubri stvarajući pjenu koja ispunjava kalup. Postupak rezultira komponentama istog oblika kao kalup relativne gustoće do 0,08. Pjene imaju zatvorene ćelije promjera od 1mm do 5 mm. IFAM, Bremen, razvio je varijantu procesa koja ima znatan potencijal za inovativnu konstrukcijsku uporabu. Panelne konstrukcije izrađene su prvo valjanjem aluminijskih ili čeličnih limova na jezgru neekspandiranog prekursora. Takva neekspandirana sendvič konstrukcija se potom oblikuje i stavlja u peć radi upjenjivanja jezgre, pri čemu se dobiva sendvič-panel s jezgrom od aluminijeve pjene. Danas je komercijalno dostupan samo upjenjeni aluminij, ali se pjene od drugih materijala razvijaju pomoću različitih agenasa za upjenjivanje. Slika 2.3 prikazuje proces izrade metalne pjene ovakvim "Foaminal" postupkom. [2]



Slika 2.3.1 Proces izrade metalne pjene “Foaminal“ postupkom [25]

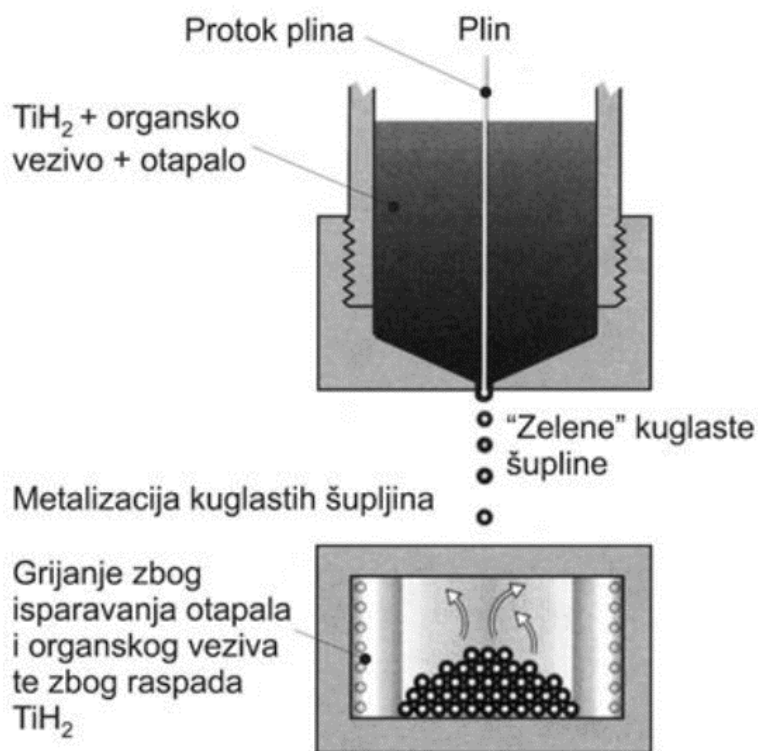
#### 2.4 Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama

Nedavno se pojavilo nekoliko pristupa proizvodnje metalnih pjena s kuglastim šupljinama. Raspršivanje inertnog plina često rezultira malim udjelom (1-5 %) kuglastih šupljina velikog promjera (0,3-1 mm) s relativnom gustoćom do 0,1. Ove se šupljine tada mogu rasporediti u metalu i konsolidirati vrućim izostatskim prešanjem (HIP), vakuumskim sinteriranjem ili sinteriranjem u tekućoj fazi. Sinteriranje u tekućoj fazi smatra se boljim pristupom za neke legure jer izbjegava kompresijske deformacije tankih šupljih čestica praha koje proizlaze iz procesa HIP-a i izbjegava dugotrajne visokotemperaturne uvjete potrebne za postizanje jakih veza između čestica.

Ovim se pristupom u laboratoriju mogu proizvesti porozne niklove superlegure i titanijeve legure s relativnom gustoćom od samo 0,06. Razvojem kontroliranih tehnika raspršivanja šupljeg praha može se omogućiti ekonomičnija izrada pjena ovim postupkom.

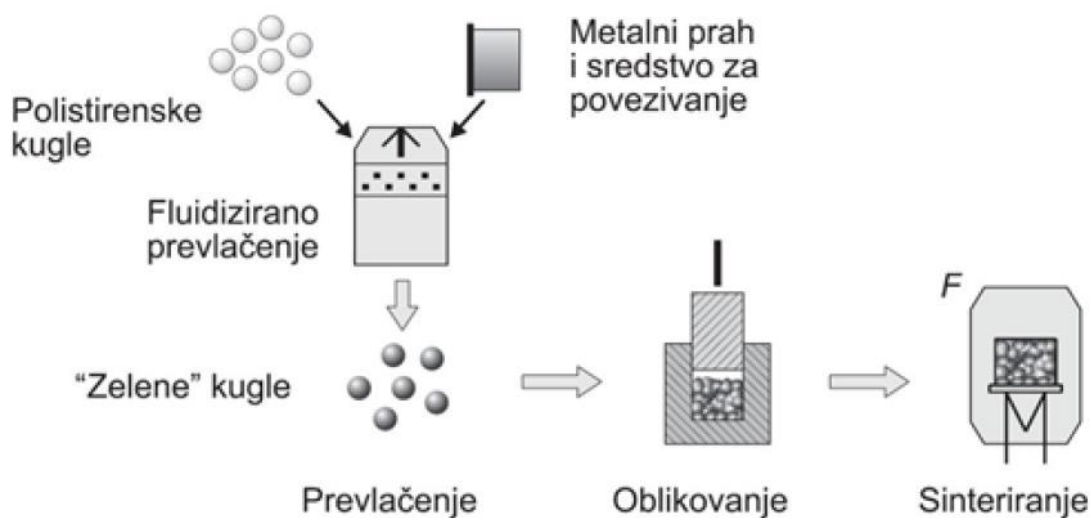
Drugim postupkom, kuglasta građa nastaje pomoću dodataka kao što su titanijev hidrid pomiješan s otapalom i organskim vezivom. Kugle otvrdnjavaju prolaskom kroz visoki toranj, a nakon njihove metalizacije zagrijavanjem na povišenu temperaturu omogućuje se

hlajenje otapala i uklanjanje veziva te raspad  $\text{TiH}_2$ , slika 2.4.1. Ovaj postupak je razvijen u Georgia Tech., SAD i može se primijeniti na mnoge metale poput nehrđajućih čelika.



**Slika 2.4.1** Proces nastajanja metalnih pjena s kuglastim šupljinama [3]

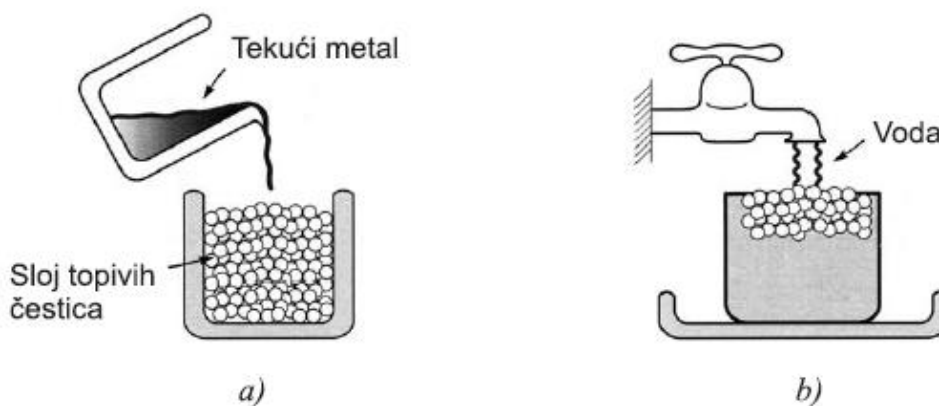
U trećoj metodi razvijenoj na IFAM-u, polistirenske kuglice su prevučene metalom i sinterirane, dajući pjene s kuglastim šupljinama visoke ujednačenosti. Konsolidacija kuglastih šupljina daje strukturu s mješavinom otvorene i zatvorene poroznosti. Omjer dviju vrsta poroznosti i ukupne relativne gustoće može se prilagoditi promjenom početne relativne gustoće kuglica i opsega zgušnjavanja tijekom konsolidacije. Relativne gustoće ovako proizvedenih pjena kreću se do 0,05 s veličinom pora u rasponu od 100  $\mu\text{m}$  do nekoliko milimetara. Slika 2.4.2 prikazuje proces nastajanja metalnih pjena s kuglastim šupljinama IFAM postupkom. [3]



Slika 2.4.2 Proizvodnja metalne pjene s kuglastim šupljinama IFAM postupkom [3]

### 2.5 Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv

Dva praša, nijedan s volumnim udjelom manjim od 25 %, miješaju se i kompaktiraju. Nakon konsolidacije jedan praš (npr. sol) se ispere u prikladnom otapalu. Pjene na bazi mješavine praša aluminijskih legura s natrijevim kloridom uspješno su izrađene u većim količinama s jednoličnom strukturom. Dobiveni oblici ćelija značajno se razlikuju od građe ćelija dobivenih drugim tehnikama. Slika 2.5.1 prikazuje nastajanje metalne pjene uslijed povezivanja dva materijala od kojih je jedan topiv.



Slika 2.5.1 Nastajanje metalne pjene uslijed povezivanja dva materijala od kojih je jedan topiv: a) rastaljeni metal (aluminij) se ulijeva u sloj topivih čestica; b) topive čestice se otapaju u vodi te nastaju pjene s otvorenim ćelijama [2]

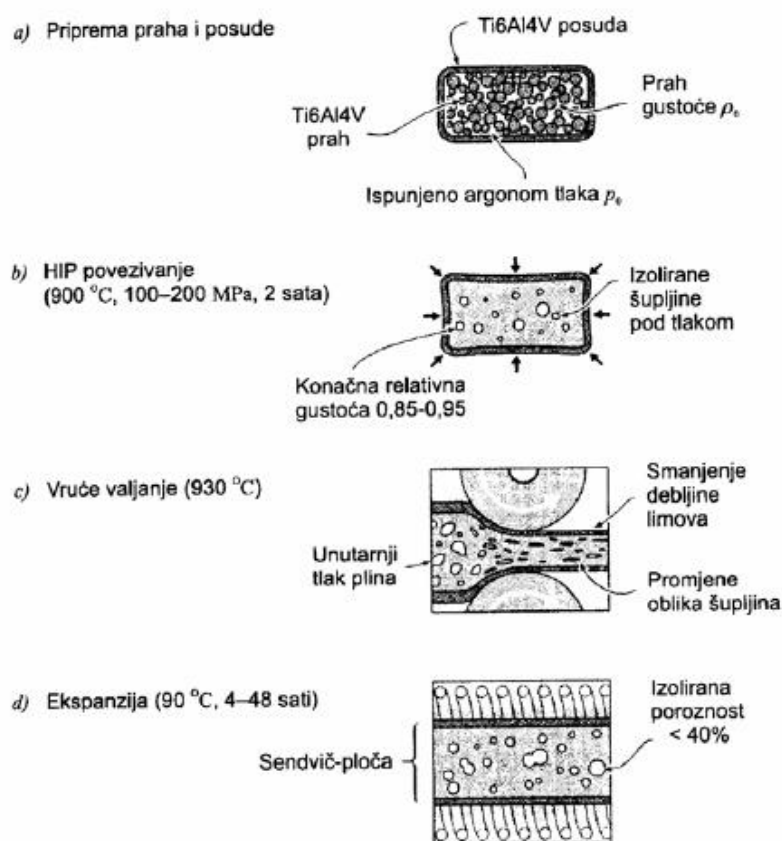
Čestice praha su veličine od 10  $\mu\text{m}$  do 10 mm te određuju veličinu ćelija metalnih pjena. [2]

## 2.6 Eutektičko skrućivanje plin – metal

Ovaj postupak temelji se na činjenici da neki metali s vodikom tvore eutektički sustav. To su metali poput: Fe, Cr, Cu, Mg, Mn, Ni, Be i Al. Pri tlaku od 0,5 do 1 MPa i visokoj temperaturi dolazi do taljenja legura u vodikovoj atmosferi čime se dobiva talina bogata vodikom. Snižavanjem temperature talina skrućuje i prelazi u heterogeno stanje procesom poznatim kao eutektička pretvorba. Produkt eutektičke reakcije je heterogeno dvofazno stanje plin+metal. Pjene koje su dobivene ovakvim eutektičkim skrućivanjem nazivaju se „GASAR“. Volumni udjeli ćelija nastalih ovom tehnikom zauzimaju do 30% metalne pjene, a promjera su između 10  $\mu\text{m}$  do 10 mm te su podijeljene na otvorene i zatvorene ćelije koje su izdužene i orijentirane u smjeru skrućivanja. [2]

## 2.7 Ekspanzija plina u talini

Proizvodnja metalnih pjena može se odvijati uz postupke metalurgije praha. Takve pjene su ispunjene inertnim plinovima koji se nalaze pod visokim tlakom, a najčešće je to argon. Argon ulazi pod visokim tlakom te visokom temperaturom što uzrokuje širenje šupljina i tečenje materijala. Na slici 2.7.1 se može vidjeti proces nastajanja metalne pjene uz pomoć inertnog plina. Na početku se u kalup izrađen od TiAl6V4 legure dodaje predlegirani titanijev prah. Zatim se doda argon i izvuče kisik kako ne bi došlo do vezanja titana i kisika. Argon ispunjava posudu tlakom koji varira između 0,3 do 0,5 MPa. Nakon toga se kalup zagrijava na temperaturu između 900 °C i 940 °C te se valja pri čemu dolazi do jednolikog rasporeda šupljina i one postaju izdužene. Zadnja faza dovodi do širenja plina pri temperaturi od 900 °C i traje do 48 sati. Ovaj postupak služi za izradu sendvič-konstrukcija čija veličina ćelije varira od 10  $\mu\text{m}$  do 300  $\mu\text{m}$  a baziraju se na titanijevim legurama. Navedeni postupak je vrlo skup zbog vrućeg valjanja. Također, ovim postupkom dolazi i do smanjivanja gustoće jer visoka temperatura podiže tlak u ćelijama te se one šire. Slika 2.7.1 prikazuje proces nastajanja metalne pjene širenjem inertnog plina. [4]

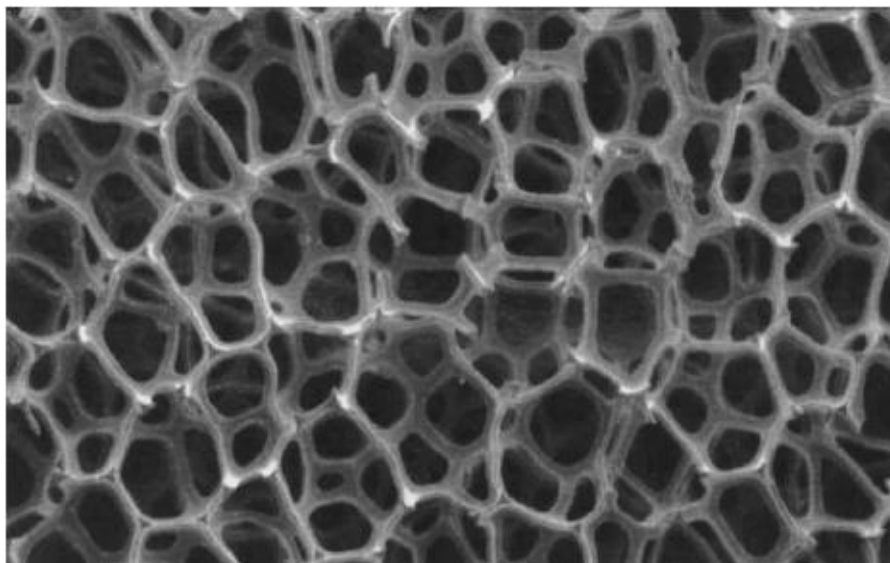


Slika 2.7.1 Proces nastajanja metalne pjene širenjem inertnog plina[4]

## 2.8 Taloženje metala na ćelijaste praoblake

Postupak taloženja iz parne faze (CVD) može se iskoristiti za elektrotaloženje, odnosno za evaporaciju metalnih materijala po pjenama koje imaju otvoreni tip ćelije i izrađene su od polimera. U prvom koraku u peć za CVD postupak stavlja se polimerna pjena te se u nju uvodi nikal tetrakarbonil ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ). Grijanjem na 100 °C dobivaju se produkti Ni i CO. U parnoj fazi Ni se taloži na polimerni materijal koji se nalazi unutar retorte. Nakon što se nanese nekoliko mikrometara metalne prevlake polimerna pjena se spaljuje ili uklanja infracrvenim zagrijavanjem. Navedene metalne pjene poprimaju šupljikave veze, a veličina ćelija varira od 100  $\mu\text{m}$  do 300  $\mu\text{m}$ . Sinteriranje kod ovoga postupka služi za povećanje relativne gustoće koja se kreće između 0,02 do 0,05. Negativna strana navedenog postupka je visoka cijena zbog vrlo skupog nikla i problematična zaštita okoliša uvjetovana prisutnošću otrovnoga  $\text{Ni}(\text{CO})_4$ . Slika 2.8.1 prikazuje strukturu INCO metalne pjene dobivene ovim postupkom. [4]

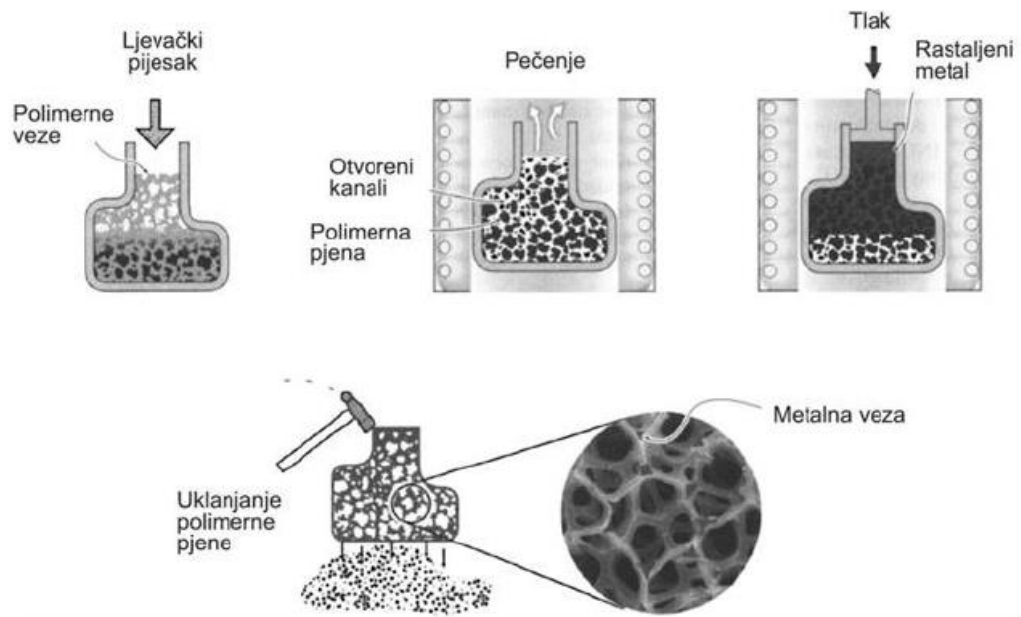




**Slika 2.8.1** Prikaz strukture INCO metalne pjene [5]

## **2.9 Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera**

Navedeni postupak razvila je tvrtka Erga-aerospace te je također jedan od postupaka za proizvodnju metalnih pjena. Metalne pjene dobivene ovim postupkom nazivaju se “ERG-Duocel“. Pri prvom postupku odabire se polimerna pjena koja ima određenu relativnu gustoću i veličinu ćelija. Drugi korak se zasniva na premazu keramičkim prahom koji se nakon sušenja postavlja u pijesak za lijevanje. Daljnji postupak je pečenje kalupa dok polimerna pjena ne sagori i materijal kalupa ne očvrsne. Kalup se puni legurom koja je u rastaljenom stanju te se hladi. Prisutnost tlaka prilikom lijevanja u kalup omogućuje otpor tečenju određenih legura. Dobivena metalna pjena prilikom vađenja i hlađenja iz kalupa poprima identičan izgled kao i polimerna pjena. Slika 2.9.1 prikazuje postupak izrade “ERG-Duocel“ pjene, a slika 2.9.2 prikazuje mikrostrukturu “ERG-Duocel“ metalne pjene. [4]



Slika 2.9.1 Postupak izrade "ERG-Duocel" pjene [4]



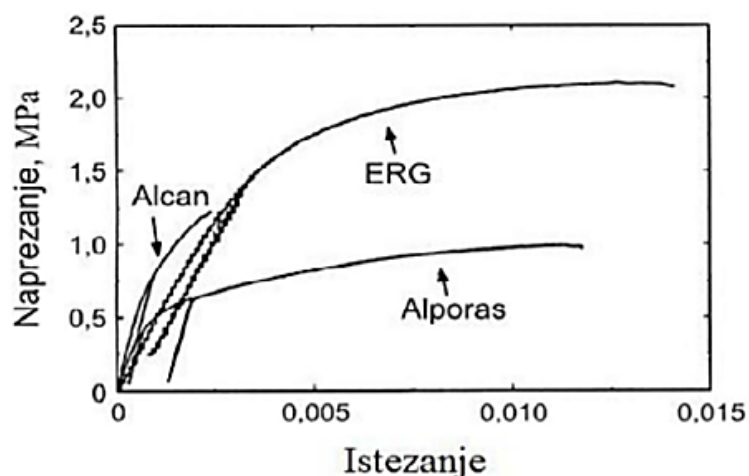
Slika 2.9.2 Prikaz mikrostrukture "ERG-Duocel" metalne pjene [6]

### 3 SVOJSTVA METALNIH PJENA

Kemijski sastav, građa, postupak proizvodnje i postupak obrade utječu na svojstva pojedinih materijala. Metalne pjene imaju pred sobom još mnogo prostora za razvoj te su trenutni postupci njihova ispitivanja još uvijek u povoju i vrlo su kompleksni. Vrlo često se prilikom istog ispitivanja dobiju vrlo različiti rezultati zbog neujednačenih veličina i oblika ćelija, što upućuje inženjere na mnogo više pažnje i potrebu za većim brojem ponovljenih ispitivanja.

#### 3.1 Vlačna čvrstoća

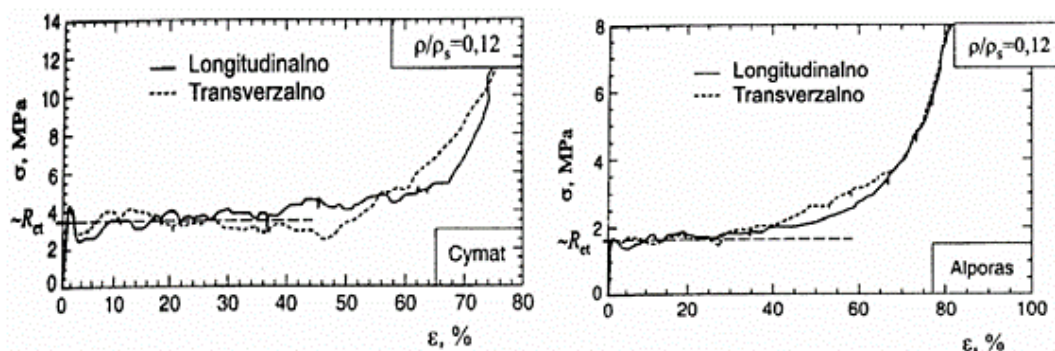
Cilindrični ili pravokutni uzorci uobičajeno se koriste za statička vlačna ispitivanja pa tako i kod metalnih pjena. Također je moguće koristiti i uzorke u obliku kosti. Promjer cilindričnih uzoraka te debljina uzoraka koji imaju oblik kosti predstavljaju glavne dimenzije epruvete. Produljenje uzorka tijekom razvlačenja se mjeri ekstenzimetrom pričvršćenim za sam uzorak. Ispitivanje se izvodi pri brzini opterećivanja od 0,01 mm/s te se opterećuje paralelno i okomito s obzirom na os ćelija. Nagib krivulje naprezanje-istezanje daje podatak o modulu elastičnosti, a vrijednosti istežanja nude izračun Poissonova faktora. Dijagram naprezanje-istezanje na slici 3.1.1 prikazuje rezultate statičkog vlačnog ispitivanja aluminijskih pjena proizvedenih različitim postupcima. [7]



Slika 3.1.1 Dijagram naprezanje istežanje metalnih pjena [7]

### 3.2 Tlačna čvrstoća

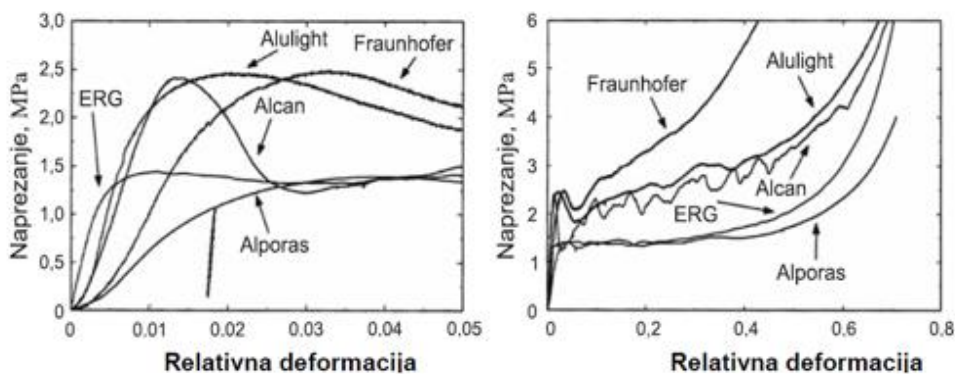
Kada se usporedi tlačno i vlačno ponašanje metalnih pjena proizlazi da je modul elastičnosti u uvjetima tlaka za 10 % manji nego kod vlačnog opterećenja. Pojedine ćelije teku već kod malih opterećenja dok neke tek pri većim opterećenjima a svi ti podaci mogu se iščitati sa slike 3.2.1 koja prikazuje dijagrame naprezanje-deformacija dobivene tlačnim opterećenjem metalnih pjena izrađenih na dva različita načina.



Slika 3.2.1 Dijagram naprezanje-deformacija tlačno opterećenih metalnih pjena:  
a) Cymat; b) Alporas [2]

Kod metalnih pjena sa zatvorenim ćelijama dolazi do zgušnjavanja i potpunog stlačivanja pjene pri naprezanju većem od granice stlačivanja i deformaciji potpunog zgušnjavanja. Metalne pjene otvorenih ćelija imaju jednostavnije ponašanje te se kod njih vrlo jasno vidi granica stlačivanja  $R_{et}$  (engl. *plateau stress*) pri kojoj pjene počinju teći.

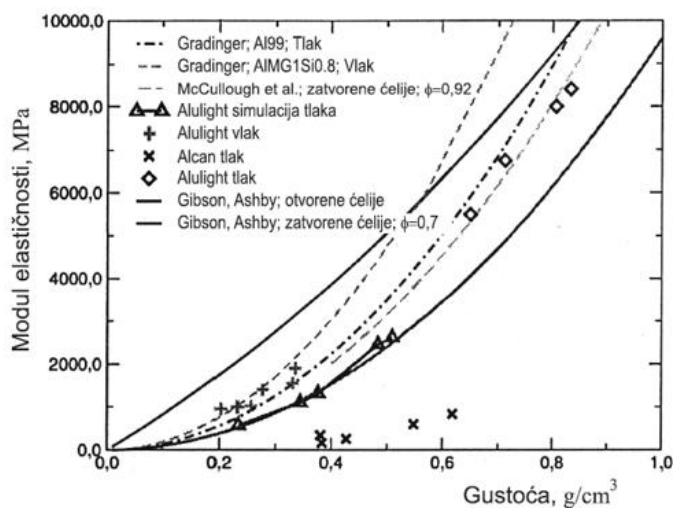
Metalne pjene koje su najzastupljenije u ispitivanjima su niklene i aluminijske izrađene nekim od postupaka poznatih kao IFAM, “ERG Duocel“, “Alporas“ i “Cymat“. Pri ispitivanju treba obratiti pozornost na veličinu uzorka te su zato određeni omjeri visine i debljine kao i omjer dimenzija uzorka i veličine ćelija. Prvi omjer mora biti veći od 1,5, dok drugi mora biti veći od 7. Zadovoljavanjem tih uvjeta izbjegava se dobivanje pogrešnog rezultata zbog utjecaja veličine samog uzorka. Slika 3.2.2 prikazuje krivulje naprezanje-deformacija aluminijskih pjena pod djelovanjem tlačnog opterećenja. [2]



Slika 3.2.2 Krivulje naprezanje-deformacija kod tlačnog opterećivanja aluminijevih pjena [7]

### 3.3 Krutost

Gustoća materijala ima veliku ulogu u svojstvima čvrstoće i krutosti. Glavni teoretičari ćelijastih materijala Ashby i Gibson povezali su osnove morfologije materijala s mehaničkim svojstvima. Ispitivanjem metalnih pjena pokazalo se da pretpostavke vrijede isključivo za pjene otvorenih ćelija. Modul elastičnosti razlikuje se kod aluminijevih pjena kod tlačnog i vlačnog opterećivanja. Niže vrijednosti krutosti mogu se pripisati metalnim pjenama koje imaju ćelije zatvorenog tipa. Slika 3.3.1 prikazuje ovisnost modula elastičnosti i gustoće različitih metalnih pjena. [8]



Slika 3.3.1 Ovisnost modula elastičnosti i gustoće metalnih pjena [8]

### 3.4 Vatrootpornost

Aluminijeve pjene sa zatvorenim ćelijama poznate su po velikoj vatrootpornosti do koje dolazi zbog formiranja teško taljivog  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja. Međutim, metalne pjene mogu i izgubiti nosivost kao rezultat strukturnog i toplinskog stradavanja pri visokim temperaturama. Najotpornije niklene pjene izdržavaju temperature koje mogu sezati do  $600\text{ }^\circ\text{C}$  i više. [7]

### 3.5 Toplinska vodljivost

Metalne pjene otvorenog tipa ćelija imaju veliki koeficijent toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ) te se koriste kod izmjenjivača topline. Zatvorene ćelije su velika suprotnost otvorenim ćelijama kada se radi o toplinskoj vodljivosti zbog niže vrijednosti  $\lambda$  ( $0,2 - 11\text{ W/mK}$ ) te se one koriste kao toplinski izolatori [7].

## 4 PRIMJENA METALNIH PJENA

Odlična svojstva metalnih pjena iskazuju njihovu potencijalno široku primjenu. Potencijalno široku zbog toga što se smatraju novim oblikom materijala koji još nije u potpunosti istražen niti sve njegove mogućnosti. Za primjenu metalnih pjena vrlo bitnu ulogu ima njihova gustoća koja varira između  $300 \text{ kg/m}^3$  do  $900 \text{ kg/m}^3$  i cijena koja je trenutno visoka, ali sve većom uporabom i napretkom tehnologija dobivanja za očekivati je i pad cijene. Tablica 1. prikazuje neke od primjena metalnih pjena. [2]

**Tablica 1. Primjena metalnih pjena [2]**

PRIMJENA	ZNAČAJKE
Filteri	Mogućnost filtriranja tekućina i plinova
Elektrode, držači katalizatora	Veliki omjer volumena i površine
Elektromagnetska zaštita	Dobra električna vodljivost
Zamjena za drvo	Krute su i lagane te se mogu spajati vijcima za drvo
Vatrootpornost	Pjene sa zatvorenim ćelijama - stjenke prekrivene slojem oksida
Izmjenjivači topline, hladnjaci	Pjene s otvorenim ćelijama dobro provode toplinu zbog velike površine i vodljivosti stijenki
Toplinska izolacija	Određene vrste pjena imaju niski koeficijent toplinske vodljivosti
Apsorpcija energije	Vrlo dobra apsorpcija udarne energije pri sobnim i povišenim temperaturama
Biokompatibilni implantati	Ćelijasta struktura biokompatibilnih titanijevih pjena stimulira rast okolnog tkiva
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i mase pri savijanju
Apsorpcija zvuka	Metalne pjene s mrežastom strukturom
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

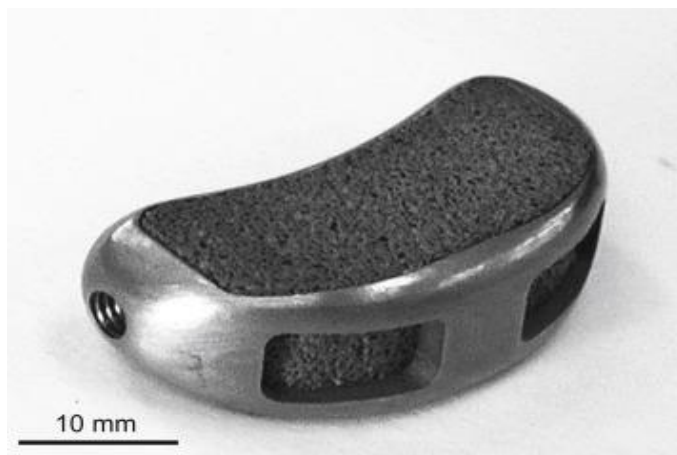
### 4.1 Medicina

Zubni implantati izrađuju se od metalnih pjena ukoliko su zadovoljena svojstva kao što su biokompatibilnost, oblik, veličina te poroznost i čvrstoća. Metalne pjene koje se koriste kod zubnih implantata izrađene su od titanija koji odlično srasta u kosti. Kao implantati mnogo



su bolje od neporoznih metala zbog toga što im se poroznost može podesiti tako da njihova gustoća odgovara gustoći kosti dok kod neporoznih materijala to nije slučaj pa dolazi do velike razlike između krutosti dva materijala u kontaktu. [2]

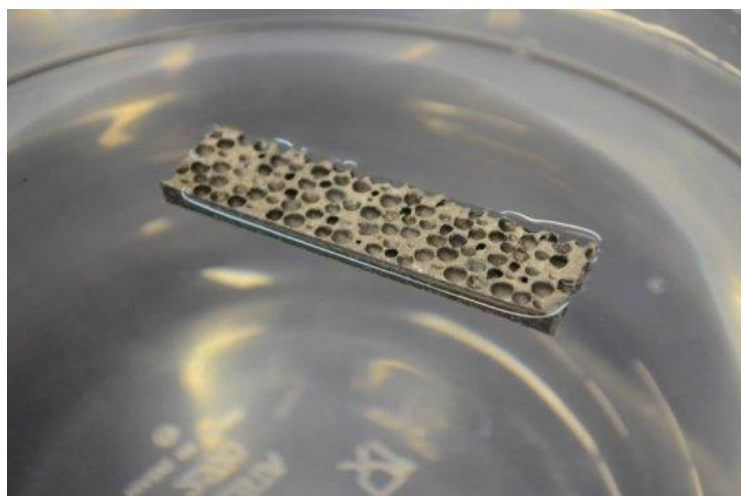
Na slici 4.1.1 se može vidjeti titanijev implantat od metalne pjene.



**Slika 4.1.1** Implantat titanijeve pjene [9]

## 4.2 Brodogradnja

Metalne pjene vrlo su značajne u brodogradnji. Ukoliko metalna pjena ima manju gustoću od vode, prilikom nesreće i oštećenja broda, dijelovi od metalne pjene ne tonu nego plutaju što može spasiti ljudske živote, slika 4.2.1. Također pomažu i kod izgradnje konstrukcije broda na način da povećavaju nosivost broda smanjenjem mase konstrukcije.



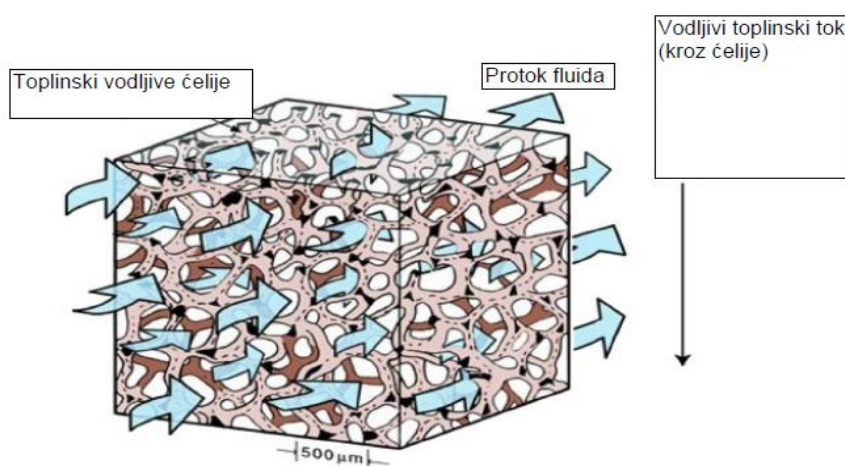
**Slika 4.2.1** Plutanje metalne pjene na vodi [10]



### 4.3 Rashladni uređaji i izmjenjivači topline

Metalne pjene visoke toplinske vodljivosti mogu se koristiti za izmjenjivače topline i rashladne uređaje koji rade na principu dovođenja i odvođenja topline putem velike površine uvjetovane ćelijastom građom. Zagrijavanje ili hlađenje može se provesti pomoću plinova i tekućina. Poroznost pri ovom procesu uvjetuje mali pad tlaka. Metalne pjene zatvorenih ćelija spadaju u skupinu dobrih toplinskih izolatora dok pjene otvorenih ćelija dobro provode toplinu. Takve metalne pjene svoju primjenu pronalaze kod hladnjaka, odnosno izmjenjivača topline. Na slici 4.3.1 prikazan je primjer provođenja topline kod pjena s otvorenim ćelijama.

[2]



Slika 4.3.1 Prikaz provođenja topline u pjenama s otvorenim ćelijama [11]

### 4.4 Zrakoplovna industrija

Metalne pjene vrlo su pogodne za smanjenje buke te za izradu strukture krila i oplata zrakoplova u obliku sendvič konstrukcija. Tu je njihova prednost prije svega mala masa, ali i visoka specifična krutost te izotropnija mehanička svojstva u odnosu na laminirane polimerne kompozite koji sadrže vlaknasto ojačanje. Također se upotrebljavaju pri slijetanju zrakoplova zbog iznimnog svojstva apsorpiranja udara. Na slici 4.4.1 je prikazan zrakoplovni motor obložen slojem metalne pjene koji prigušuje buku.



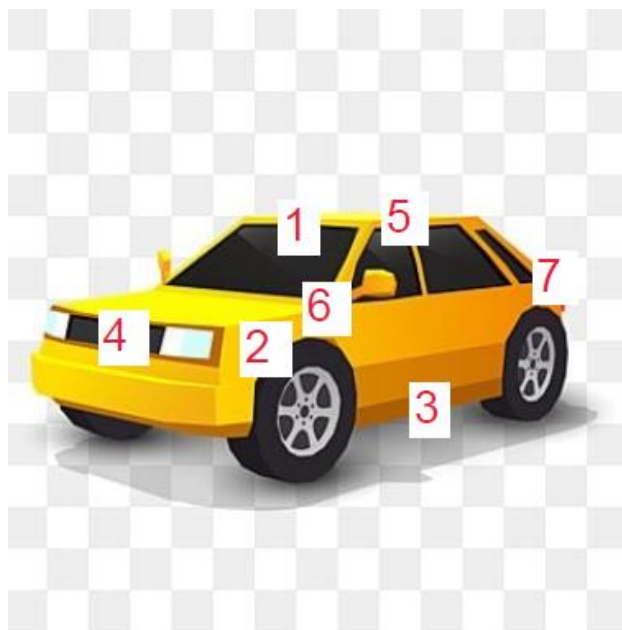
Slika 4.4.1 Obloga zrakoplovnog motora od metalne pjene [12]

#### 4.5 Automobilska industrija

Metalne pjene u automobilskoj industriji koriste se za izradu raznih dijelova koji su sposobni apsorbirati udare prilikom sudara i vibracije pri radu motora. U automobil se ugrađuju u obliku sendvič konstrukcija te se na taj način smanjuje masa vozila do 20 % dok se čvrstoća i krutost rastu. Danas automobili mogu postizati velike brzine bez stvaranja značajnije buke u unutrašnjosti automobila što se može zahvaliti sposobnosti zvučne izolacije izrađene od metalnih pjena. Od prednosti koje daju metalne pjene vrijedi spomenuti i manje vibracije motora, povećanje krutosti karoserije te mogućnost potpunog recikliranja. Automobil je podijeljen u 7 zona kada je u pitanju inženjerski pristup primjeni metalnih pjena u automobilskoj industriji. Navedene zone su prikazane u tablici 2 a na slika 4.5.1 su one i zorno predočene. [2]

Tablica 2. Prikaz zona automobila izrađenih od metalne pjene [2]

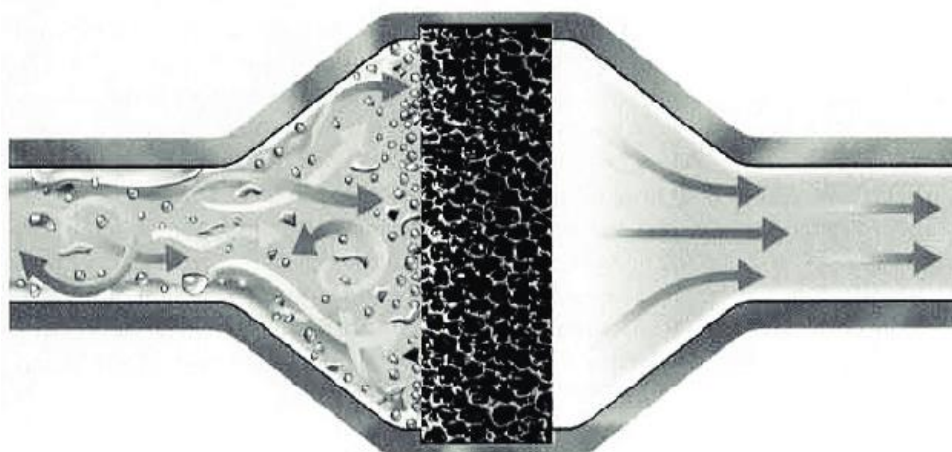
	ZONE AUTOMOBILA
1	Krovni nosač
2	Elementi nosača i vodilice branika
3	Unutrašnjost pragova
4	Prednja deformacijska zona kod apsorpcije udara
5	Pojačani bočni elementi karoserije
6	Učvršćivanje spojnih područja karoserije
7	Stražnja deformacijska zona kod apsorpcije udara



Slika 4.5.1 Prikaz zona po automobilu gdje se ugrađuju metalne pjene

#### 4.6 Građevinarstvo

Metalne pjene koriste se u građevinarstvu kao izolatori zvuka. Toplinska i mehanička svojstva mnogo su naprednija od staklene vune. Koriste se još i kao filteri za odvajanja tekućina i plinova od krutih čestica ili više tekućina međusobno. Jedan takav filter koji odvaja sitne krute čestice iz tekućine koja struji prikazan je na slici 4.6.1.



Slika 4.6.1 Filter tekućine koja sadrži sitne krute čestice [13]

## 4.7 Željeznice

Metalne pjene koriste se i u željezničkoj industriji. Sendvič konstrukcije s jezgrom od aluminijske pjene (AFS) ugrađuju se u prednji dio vlaka, slika 4.7.1. Pri sudaru ovakve konstrukcije apsorbiraju velik dio udarne energije te se još postavljaju i za podlogu u podzemnoj željeznici. Sveukupno mogu smanjiti težinu u iznosu do 18 % bez značajnog utjecaja na krutost.



**Slika 4.7.1 Prednji dio konstrukcije vlaka izrađen od kompozitnog sendviča s jezgrom od aluminijske pjene [14]**

## 5 MEHANIZMI OČVRSNUĆA

Aluminij spada u skupinu metala koji imaju malu mehaničku otpornost. Odlikuje ga niska konvencionalna granica razvlačenja u iznosu 20-120 N/mm<sup>2</sup> te niska vlačna čvrstoća koja ovisno o stanju varira u rasponu od 40 do 180 N/mm<sup>2</sup>. Zato su danas razvijene različite skupine aluminijevih legura da bi se poboljšala svojstva čistog aluminija.

Aluminijeve legure modificiraju se toplinskom obradom, deformacijom u hladnom stanju te legiranjem raznim elementima. Mehanizmi očvrsnuća koji se javljaju kod aluminija i njegovih legura jesu sljedeći [15]:

- očvrsnuće kristalima mješancima,
- očvrsnuće hladnom deformacijom,
- očvrsnuće granicama zrna,
- očvrsnuće izlučivanjem (precipitacijom).

### 5.1 Očvrsnuće kristalima mješancima

Otapanjem legirajućih elemenata u kristalnoj rešetki osnovnog metala naziva se legiranje. Legiranje je mehanizam očvrsnuća kod kojeg atomi legirajućih elemenata otopljeni u osnovnom metalu deformiraju kristalnu rešetku i time otežavaju gibanje dislokacija. Rastvaranjem namjerno dodanih elemenata u topitelju nastaju kristali mješanci koji mogu biti supstitucijskog i/ili intersticijskog tipa. Pri legiranju ferita velika je razlika između supstitucijskih (krom, molibden, itd..) i intersticijskih (fosfor, dušik i ugljik) elemenata. Kod legiranja vrlo su bitni supstitucijski elementi koji daju svojstvo žilavosti i intersticijski elementi koji uzrokuju jako očvrsnuće, ali i krhkost. [16, 17].

### 5.2 Očvrsnuće hladnom deformacijom

Mehanizam očvrsnuća hladnom deformacijom odvija se između dislokacija i prepreka te između samih dislokacija. Navedeni mehanizam očvrsnuća ostvaruje se tako da se materijal hladno plastično deformira te time dolazi do umnažanja dislokacija u strukturi materijala. Većim stupnjem deformacije postiže se veća gustoća dislokacija, a time i viša granica razvlačenja, te izrazito niska žilavost. Mehanizam očvrsnuća hladnom deformacijom vrlo je djelotvoran s obzirom na porast čvrstoće, ali se pri tom ne smije pretjerati jer pri suviše velikoj gustoći dislokacija potpuno se onemogućava njihovo gibanje i materijal postaje krhak,

sklon pojavi pukotina i u konačnici krhkom lomu. Aluminijske legure kristalizirane u obliku  $\alpha$ -krisala mješanaca aluminijske su vrlo očvrstive ovim postupkom zbog kubično plošno centrirane rešetke (FCC) [17, 18].

### 5.3 Očvrstnuće granicama zrna

Povećavanje granice razvlačenja dolazi kada se sprječava pokretljivost klizanja dislokacija po granicama zrna. Navedeni mehanizam očvrstnuća ne daje najveće očvrstnuće, ali povisuje žilavost materijala snižavanjem prijelazne temperature. Očvrstnuće granicama zrna uvelike se razlikuje s obzirom na ostale mehanizme očvrstćivanja zbog toga što gomilanjem dislokacija po granicama zrna dolazi do klizanja dislokacije u drugo zrno preko granice te se time izbjegava pojava loma ili pukotine. Navedeni mehanizam očvrstnuća izvediv je kod materijala sitnozrnate mikrostrukture s velikim brojem i duljinom granica zrna ( granica faza. Osobito je povoljno ako se radi o velikokutnim granicama zrna. [19].

### 5.4 Precipitacijsko očvrstnuće

Precipitacijsko očvrstnuće odvija se kod raznih legura gdje dolazi do promjene topljivosti legirajućih elemenata u osnovnom metalu s promjenom temperature. Alfred Wilm je još 1906. godine prvi otkrio pojavu precipitacijskog očvrstnuća. Promatrao je aluminijsku leguru koja se sadržala 0,5 % Mg i 4,5 % Cu brzo hlađenu (gašenu) u vodi s temperature 500 °C koja je zahvaljujući tome očvrstnula. Ova skupina aluminijskih legura kasnije je dobila naziv ‘duraluminij’, skraćeno ‘dural’ te se danas koristi za izradu elemenata zrakoplovnih konstrukcija koji moraju imati visoku specifičnu čvrstoću [16, 18].

Općeniti izraz za prirast granice razvlačenja kod precipitacijskog očvrstnuća opisan je jednadžbom (1) [17]:

$$(\Delta Re)_{Pr} = (3 \cdot G \cdot b) / \lambda_l \quad (1)$$

gdje je:

- $(\Delta Re)_{Pr}$  - prirast granice razvlačenja precipitacijskim očvrstnućem, N/mm<sup>2</sup>
- $G$  - modul smika, GPa
- $\lambda_l$  - udaljenost između središta precipitata, nm
- $b$  – Burgersov vektor

Polazni uvjeti precipitacijskog očvrstćivanja aluminijskih legura slijede iz odgovarajućeg dijagrama stanja i mogu se sažeti kako je navedeno [18]:

- Legura mora imati takav kemijski sastav da se nalazi u višefaznom području dijagrama stanja. Struktura mora sadržavati će  $\alpha$  – kristale mješance aluminijske i

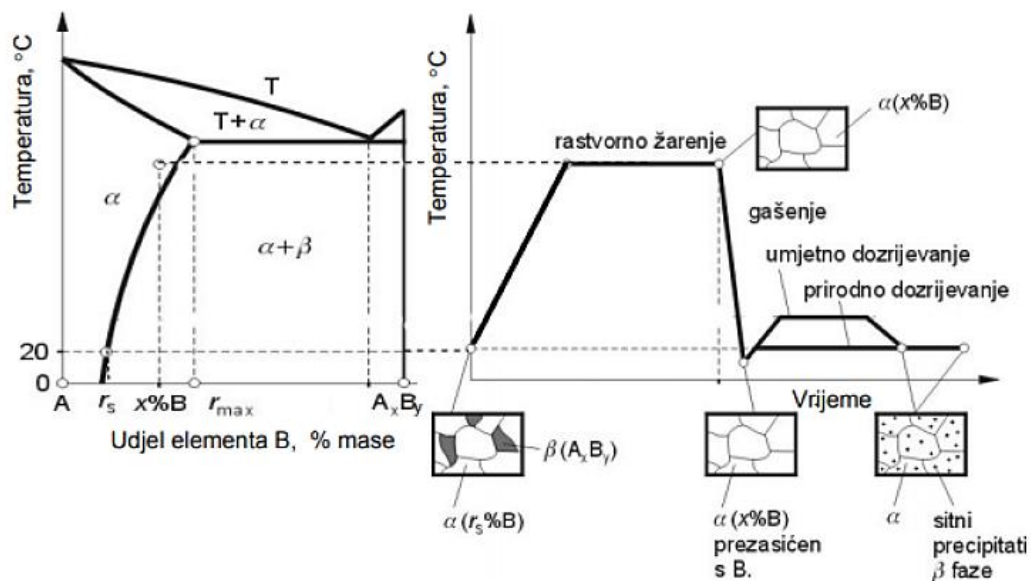
kristale druge faze, nekog intermetalnog spoja. Neki od mogućih intermetalnih spojeva su:  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  i  $\text{CuAl}_2$ . Druga faza jako je bitna ako se želi postići postupno izlučivanje intermetalnog spoja tijekom hlađenja, ali sada u obliku tvrdih i sitnih jednoliko raspršenih koherentnih precipitata.

- Legura mora sadržavati najmanje jedan konstituent, odnosno legirni element kod kojeg topivost u aluminiju raste sa povišenjem temperature.
- Kako bi došlo do potpunog otapanja atoma legirnog elemenata u  $\alpha$  – kristalu mješancu, vrlo je bitno pripaziti da maseni udio legirnog elemenata ne prijeđe granicu maksimalne topivosti u  $\alpha$  – kristalu mješancu aluminija.

Do očvrnuća nekih aluminijevih legura dolazi već pri sobnoj temperaturi te se taj postupak naziva prirodno dozrijevanje. Postupak se može ubrzavati povišenjem temperature, te se tada radi o umjetnom dozrijevanju.

Precipitacijsko očvrnuće odvija se kroz postupke toplinske obrade dozrijevanja i rastopnog žarenja. Rast čvrstoće i tvrdoće vezan je uz stvaranje koherentih precipitata u aluminijevoj matrici. Alotropne modifikacije koje se dešavaju kod kaljenja čelika nisu prisutne kod ovog mehanizma očvrnuća. Uslijed promjene topivosti atoma legirnog elemenata u  $\alpha$  – kristalu mješancu hlađenjem nastaje prezasićena čvrsta otopina koja nije stabilna na sobnoj temperaturi i gdje postoji težnja atoma legirnog elemenata da izađe iz kristalne rešetke  $\alpha$  – mješanca stvarajući tvrde i male precipitate intermetalnih spojeva.

Ostvarivanje precipitacijskog očvrnuća odvija se tako da se legura zagrijava do temperature prelaska u homogeno stanje, drži na toj temperaturi određeno vrijeme do potpune homogenizacije i potom se gasi na sobnu temperaturu, slika 5.6.1.



**Slika 5.4.1 Prikaz općeg dijagrama stanja i postupka precipitacijskog očvršćivanja [21]**

Rastopno žarenje je prisutno kako bi se legirani element označen simbolom B otopio u čvrstoj otopini. Kristal mješanac aluminija apsorbirati će elemente intermetalnog spoja samo uz uvjet da legura sadrži maseni udio elementa B manji od  $r_{max}$ . Na taj način nastaje homogena primarna čvrsta otopina u kojoj sadržaj elementa B u  $\alpha$ -kristalu mješancu iznosi  $X\%B$  i veći je od ravnotežne koncentracije na sobnoj temperaturi iznosa  $r_s$ . Do zasićenja rešetke  $\alpha$ -mješanaca sa prazninama i atomima elementa B dolazi zbog blizine solidus liniji i velike difuzijske pokretljivosti atoma. Temperatura igra vrlo važnu ulogu kako pri ovom rastopnom žarenju tako i kasnijem dozrijevanju. Kod preniske temperature homogenizacijskog zagrijavanja ne dolazi do potpunog otapanja i hlađenjem se dobiva legura s nižim vrijednostima čvrstoće i tvrdoće. Previsoka temperatura rastopnog žarenja uzrokuje taljenje što dovodi do potpunog uništenja uzorka. Vrlo bitan faktor rastopnog žarenja je i vrijeme koje varira između pola minute za tanje aluminijeve limove pa sve do 20-ak sati kad je riječ o aluminijevim ljevovima. U dovoljno vrijeme postiže se ravnotežno stanje omogućeno potpunom difuzijom između atoma aluminija i legirnog elementa. Pri rastopnom žarenju veliku ulogu ima i vlaga koja se uklanja čišćenjem te sušenjem odljevaka prije stavljanja u peć te čistoća same peći. Ako su peći vlažne i uprljane može doći do povećane difuzije vodika u aluminijev izradak.

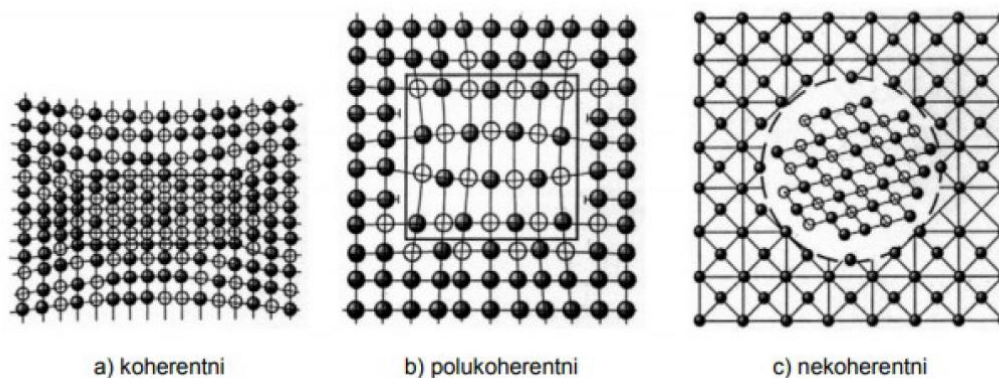


Sporo hlađenje legure do sobne temperature dovelo bi do uspostavljanja ravnoteže. Zatim bi došlo do izlučivanja čestica intermetalnog spoja, ali ponovo u obliku velikih nekoherentnih precipitata. To bi uzrokovalo slaba mehanička svojstva te krhkost uzrokovanih dvofaznom  $\alpha+\beta$  mikrostrukturom i prisutnošću krhkog intermetalnog spoja. Brzim hlađenjem legure s temperature rastopnog žarenja postiže se zadržavanje legirnog elementa B u  $\alpha$ -kristalu mješancu što daje prezasićenu čvrstu otopinu. Takvim načinom gašenja legura postiže monofaznu  $\alpha$ -strukturu, ali zbog velikog udjela elementa B otopina se nalazi u neravnotežnom stanju. Maksimalna topljivost atoma elementa B pri sobnoj temperaturi i ravnotežnom stanju iznosi  $r_s$  dok je u  $\alpha$ -kristalima mješancima u gašenom stanju otopljeno X % elementa B. Brzo hlađenje zadržava legirne elemente u otopini, ali također uzrokuje velike deformacije i pukotine koje su produkt zaostalih naprezanja. Brzim hlađenjem, odnosno gašenjem također se postižu najveće vrijednosti čvrstoće i povećava se otpornost na napetosnu i opću koroziju. Brzine hlađenja ovise o načinu hlađenja. Najveće brzine hlađenja postižu se uranjanjem u hladnu vodu dok se nešto sporija ohlađivanja odvijaju u vreloj ili toploj vodi koja stoga rezultiraju i manjim deformacijama te nižim zaostalim naprezanjima. Kod hlađenja treba paziti da ne dođe do preuranjene precipitacije. Postoje dva uvjeta koja će to spriječiti, a radi se o sljedećim:

- za hlađenje je potreban spremnik dovoljne veličine i volumena kako bi se osiguralo da sredstvo za gašenje ne promjeni temperaturu čime bi došlo do preuranjene precipitacije.
- sporo ohlađivanje na zraku može dovesti do preuranjene precipitacije u području kritičnih temperatura te se zbog toga mora paziti da vrijeme prijenosa izratka iz peći u sredstvo za hlađenje bude vrlo kratko.

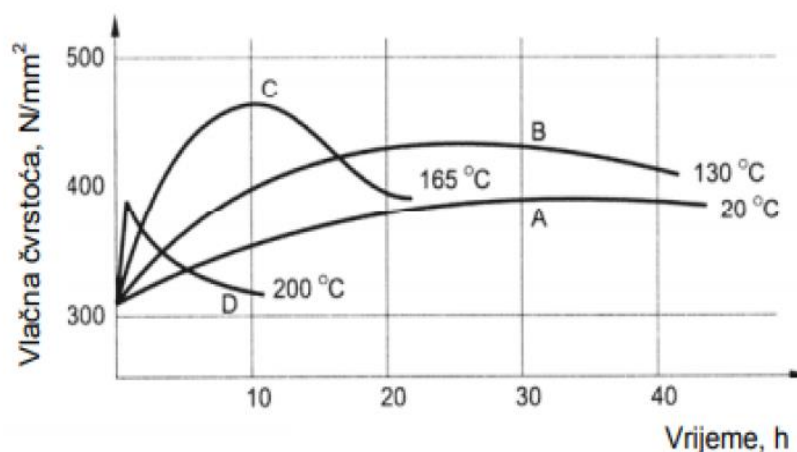
Završetkom rastopnog žarenja te gašenja dolazi se do postupka dozrijevanja. Dozrijevanje se dijeli na umjetno i prirodno dozrijevanje. Razlika između dozrijevanja je ta što prirodno dozrijevanje može potrajati od nekoliko dana do nekoliko mjeseci dok kod umjetnog traje između sat vremena i nekoliko dana. Kod umjetnog i prirodnog dozrijevanja osnovna pojava je difuzija. Difuzija se ubrzava povišenjem temperature, a temperature koje se koriste kod umjetnog dozrijevanja dosežu između 100 °C do 200 °C. Također, umjetnim dozrijevanjem postižu se veće vrijednosti tvrdoće i čvrstoće. U prvom stadiju dozrijevanja atomi legirnih elemenata B nastoje izaći iz čvrste otopine te tvore nukleuse (klice) za buduće čestice. Prilikom dozrijevanja atomi legirnog elementa B stvaraju nakupine otopljenih atoma

legirnog elementa u kristalnoj rešetki  $\alpha$ -mješanaca zbog seljenja iz područja visoke napetosti rešetke u područje prezasićeno prazninama. Nukleusi sadrže jednak raspored atoma kao i metalna matrica što ukazuje na kontinuiranu vezu između kristalnih rešetaka osnove i precipitata. Na taj način stvaraju se precipitati koherentnog tipa [18, 21]. Vrste precipitata prikazane su na slici 5.6.2.



Slika 5.4.2 Vrste precipitata [21]

Izlučivanjem koherentnih precipitata pri povišenim temperaturama tijekom umjetnog dozrijevanja dolazi do deformiranja kristalne rešetke te unutarnjih naprežanja koja uzrokuju sprječavanje gibanja dislokacija što dovodi do rasta tvrdoće i čvrstoće legure. Kako je sve manje velikih čestica  $\beta$ -intermetalne faze, istezljivost također raste. Kod predugog dozrijevanja ili dozrijevanja na previsokoj temperaturi može doći do prekida veza između precipitata i matrice uslijed prevelikog iskrivljenja kristalne rešetke te na taj način nastaje precipitat koji se veže sa matricom samo na određenim čvorovima rešetke, a naziva se polukoherentni. Također usprkos rastu tvrdoće i čvrstoće sada nastupa smanjenje istezljivosti te degradacija nekih drugih svojstava poput antikorozivnosti. Kod umjetnog dozrijevanja pri povišenim temperaturama, zbog ubrzanih difuzijskih procesa, polukoherentne i koherentne čestice vrlo brzo prelaze u nekoherentne čestice koje su odvojene od matrice. Takvim načinom prelaska u nekoherentni precipitat dolazi do pada tvrdoće, čvrstoće te istezljivosti uslijed smanjenja deformacija kristalne rešetke. [18] Tijekom dozrijevanja na različitim temperaturama zorno prikazuje slika 5.6.3.



Slika 5.4.3 Vlačna čvrstoća u odnosu na vrijeme i temperaturu dozrijevanja [21]

Krivulja A, na slici 5.6.3, prikazuje prirodno dozrijevanje na 20 °C kada vlačna čvrstoća doseže svoj maksimum od 380 N/mm<sup>2</sup> nakon 100 sati dozrijevanja. Umjetno dozrijevanje prikazano je krivuljama B, C i D. Krivulja B opisuje umjetno dozrijevanje na temperaturi 130 °C, te je vidljivo da se postiže značajno veća vlačna čvrstoća u kraćem vremenskom periodu. Krivulja C prikazuje najveće očvršnuće koje nastupa nakon 10 sati dozrijevanja pri temperaturi 165 °C. Povećanjem vremena dozrijevanja pri navedenoj temperaturi dolazi do precipitacije nekoherentnih čestica što uzrokuje naglo smanjenje čvrstoće. Krivulja D, koja se odnosi na najvišu temperaturu (200 °C) prikazuje najbrže propadanje čvrstoće uslijed stvaranja nekoherentnih precipitata [18, 21].

Postupak precipitacijskog očvršnuća označava se dodatnim oznakama uz oznaku legure, sukladno normama, kao što je prikazano u tablici 3 [22, 23].

**Tablica 3. Oznake stanja toplinske obrade aluminijevih legura [23]**

T4	rastopno žareno + prirodno dozrijevano
T4+	rastopno žareno + prirodno dozrijevano s ciljem postizanja boljih svojstava od T4
T42	rastopno žareno iz O i F stanja + prirodno dozrijevano
T6	rastopno žareno + umjetno dozrijevano
T6+	rastopno žareno + umjetno dozrijevano s ciljem postizanja boljih svojstava od T6
T62	rastopno žareno iz O i F stanja + umjetno dozrijevano
T651	rastopno žareno + oslobođeno zaostalih naprezanja + umjetno dozrijevano
T7	rastopno žareno + predozrijevano
T73...T79	rastopno žareno + predozrijevano radi postizanja veće otpornosti na koroziju i lomne žilavosti
T8	rastopno žareno + hladno oblikovano + umjetno dozrijevano
T9	rastopno žareno + umjetno dozrijevano + hladno oblikovano

Vrlo često se u praksi hladno oblikovanje koristi zajedno sa precipitacijskim očvršnućem i provodi se prije ili nakon dozrijevanja da se postigne što viša čvrstoća.

## 6 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada napravljeni su uzorci aluminijske pjene te je na njima provedeno precipitacijsko očvršćivanje uz različite parametre. Također nakon provedenih precipitacijskih očvršćivanja ispitivana su tlačna svojstva izrađenih uzoraka. Aluminijske pjene izrađene su u Laboratoriju za polimere i kompozite, a mehanička svojstva ispitana su u Laboratoriju za mehaničko ispitivanje materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

### 6.1 Postupak izrade uzoraka od aluminijske pjene

Za dobivanje uzoraka aluminijske pjene koristio se prekursor u obliku ekstrudirane šipke aluminijske legure sastava  $AlMgSi_{0,6}$  sa 0,4 mas. %  $TiH_2$  kao agensa za upjenjivanje. Prekursor je prvo izrezan na manje komade kako bi se mogao staviti u kalup i u konačnici ostvariti kvalitetnije upjenjivanje, slika 6.1.1.



Slika 6.1.1 Korišteni prekursor sastava  $AlMgSi_{0,6}$  sa 0,4 mas %  $TiH_2$

Da bi se odredila točna masa prekursora koja se mora staviti u kalup pristupilo se računanju volumena kalupa ( $V_k$ ) na osnovi njegovih dimenzija, promjera i duljine. Dimenzije kalupa iznosile su  $\varnothing 41 \times 80$  mm iz čega slijedi volumen kalupa prema jednadžbi (2):

$$V_k = \frac{d^2 \times \pi \times h}{4} \quad (2)$$

gdje je:

$V_k$  – volumen kalupa, m<sup>3</sup>

$d$  - promjer kalupa, m

$h$  - visina kalupa, m

Volumen kalupa korištenog kalupa iznosi 0,00010557 m<sup>3</sup>.

S ciljem upjenjivanja uzoraka ciljane poroznosti oko 75 % očito je da masa aluminijevog prekursora mora iznositi 25 % mase aluminijskog uzorka prikazuje jednadžba (3):

$$m = m_{Al} \times 0,25 \quad (3)$$

gdje je:

$m$  – masa aluminijevog prekursora za uzorak poroznosti 75 %, kg

$m_{Al}$  – masa aluminijevog prekursora za uzorak bez poroznosti, kg.

Masa aluminijevog prekursora koji je potrebno staviti u kalup da bi se dobio bezporozni uzorak prikazuje jednadžba (4):

$$m_{Al} = \rho_{Al} \times V_k = 0,28503 \text{ kg} \quad (4)$$

gdje je:

$\rho_{Al}$  – gustoća aluminijska (2700 kg/m<sup>3</sup>),

$V_k$  – volumen kalupa (0,00010557 m<sup>3</sup>).

Od gore navedene vrijednosti potrebno je u kalup staviti samo 25 % mase prekursora da bi se postigao traženi porozni (šuplji) volumen uzorka iznosa 75 %:

$$m = 0,28503 \times 0,25$$
$$m = 0,07126 \text{ kg} = 71,26 \text{ g}$$

Dakle svaki kalup sadrži približno 72 grama aluminijske legure. Slika 6.1.2 prikazuje vaganje prekursora na preciznoj vagi.



**Slika 6.1.2 Vaganje aluminijskog prekursora**

Nakon stavljanja prekursora u kalup (slika 6.1.3) isti se čvrsto zatvara stezanjem četiri vijčana spoja te se horizontalno polaže u zvonastu peć prethodno zagrijanu na temperaturu 770 °C. Pri polaganju kalupa u peć potrebno je obratiti pažnju da je rupica koja se nalazi na obodnoj stijenci kalupa okrenuta prema gore. Ovaj otvor služi da bi se odredilo vrijeme potrebno za pjenjenje odnosno trenutak kad je kalup u potpunosti ispunjen pjenom i ona kroz rupicu počinje istjecati vani .





**Slika 6.1.3 Rastavljeni kalup sa prekursorom**



**Slika 6.1.4 Sastavljeni kalup sa prekursorom**

Elektrootporna zvonasta peć posebno je dizajnirana upjenjavanju metalnih pjena jer na svojim vratima sadrži mali stakleni otvor kroz koji se može promatrati proces upjenjivanja, slika 6.1.5.





**Slika 6.1.5 Elektrootporna zvonasta peć**

Nakon otprilike 8 minuta držanja u peći, kroz rupicu počinje izlaziti talina te je tada potrebno kalup odmah izvaditi iz peći. Slika 6.1.6 prikazuje trenutak izlaska pjene iz kalupa popraćenog svjetlosnim bljeskom.



**Slika 6.1.6 Trenutak istjecanja pjene iz kalupa**

Na ova način postupkom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi napravljeno je 10 uzoraka prikazanih na slici 6.1.7.



**Slika 6.1.7 Uzorci aluminijeve pjene**

Budući da je kod svakog od ovih uzoraka istekla različita količina taline nužno je ponovo izmjeriti masu svakog uzorka kako bi se odredila točna vrijednost gustoće pjene i njena poroznost. Tablica 4 sadrži izmjerene mase, vrijednosti gustoće i poroznosti.

**Tablica 4. Izmjerene vrijednosti mase, gustoće i poroznosti uzoraka**

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa, g	58,3	59,2	52,3	42,6	53,6	54,9	44,0	57,8	49,4	60,8
Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	552,2	560,8	495,4	403,5	507,7	520,0	416,8	547,5	467,9	575,9
Relativna gustoća	0,205	0,208	0,183	0,149	0,188	0,193	0,154	0,203	0,173	0,213
Poroznost, %	79,5	79,2	81,7	85,1	81,2	80,7	84,6	79,7	82,7	78,7

Srednja vrijednost mase uzoraka nakon upjenjivanja iznosila je 53,29 g te je očito da je tijekom upjenjivanja iz kalupa isteklo približno 26 % taline.

Vrijednosti gustoće uzoraka varirale se u rasponu od 403,5 kg/m<sup>3</sup> do 575,9 kg/m<sup>3</sup>, a ostvarene proznosti kretale su se od minimalne 78,7 % do maksimalne 85,1 %.

## 6.2 Precipitacijsko očvršćivanje upjenjenih uzoraka

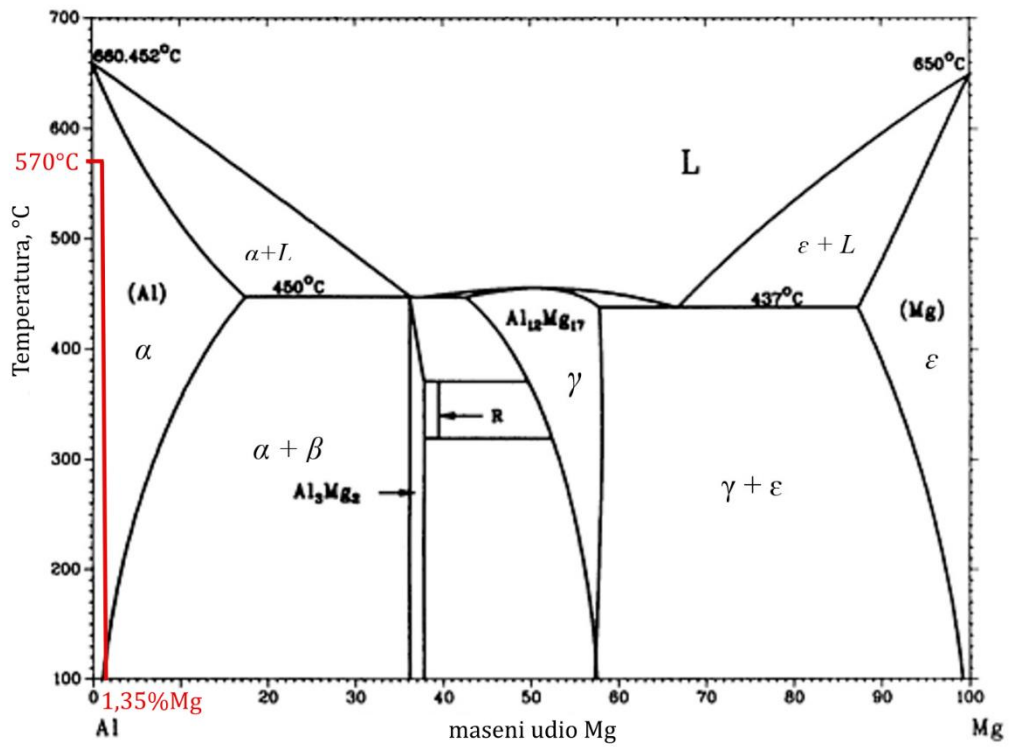
Precipitacijsko očvršćivanje provodi se rastopnim žarenjem i umjetnim dozrijevanjem. Da bi se odredili parametri toplinske obrade, prvenstveno temperatura homogenizacijskog zagrijavanja, potrebno je poznavati točan kemijski sastav prekursora. Stoga je u Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje provedena analiza kemijskog sastava optičkom emisijskom spektrometrijom na uređaju GDS 850 A, LECO. Rezultati ove analize su prikazani u tablici 5.

**Tablica 5. Rezultati kemijske analize prekursora**

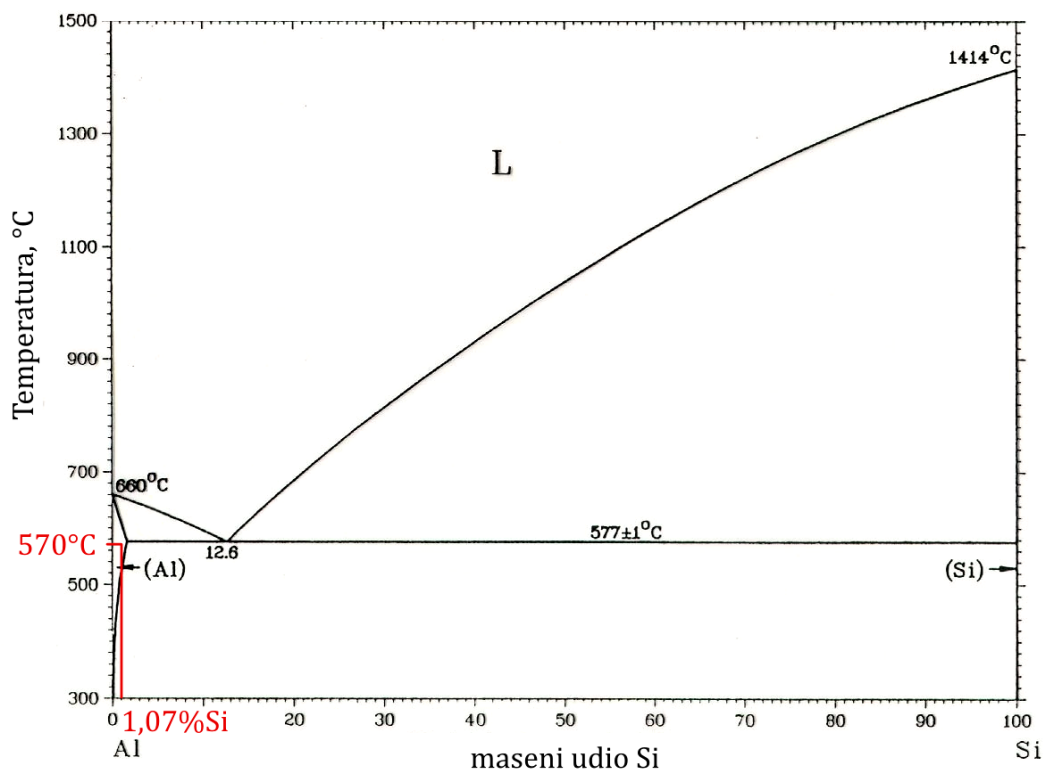
Mas. %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti*	Al
1,07	0,12	0,014	0,006	1,35	0,002	0,016	0,038	0,94	ostatak

Napomena: \* Ti je iznad granice detekcije zbog prisutnosti dodatka za upjenjivanje ( $\text{TiH}_2$ )

Kada je poznat kemijski sastav legure moguće je odrediti temperaturu rastopnog žarenja iz odgovarajućih binarnih dijagrama stanja sustava Al-Mg i Al-Si. Budući da se rastopnim žarenjem treba ostvariti homogena primarna čvrsta otopina sastavljena od 100 %  $\alpha$ -kristala mješancu aluminija na slikama 6.2.1 i 6.2.2 prikazano je određivanje temperature prema masenom udjel magnezija (1,35 %Mg) odnosno silicija (1,07 %Si).



Slika 6.2.1 Dijagram stanja Al-Mg [21]



Slika 6.2.2 Dijagram stanja Al-Si [21]

U postupku rastopnog žarenja temperatura mora zadovoljavati određene uvjete, a to su da se mora nalaziti ispod solidus linije kako ne bi došlo do taljenja, a u isto vrijeme mora biti iznad krivulje topljivosti u čvrstom stanju. Zagrijavanje legure na previsoku temperaturu uzrokovalo bi taljenje granica zrna što dovodi do uništenja uzorka. Nepotpuno otapanje kod preniske temperature rezultira niže tvrdoćom i čvrstoćom od maksimalno postizive. Vodeći se tim uvjetima, određena je temperatura rastopnog žarenja u iznosu od 570 °C. Trajanje rastopnog žarenja također ima važnu ulogu kod precipitacijskog očvršćivanja. Dovoljno dugo žarenje uzrokuje otapanje čestica intermetalne faze i potpunu apsorpciju atoma legiranih elemenata u kristalu mješancu aluminija. Slika 6.2.3 prikazuje komornu elektro peć u Laboratoriju za toplinsku obradu koja se koristila za rastopno žarenje i umjetno dozrijevanje.



**Slika 6.2.3 Komorna elektro peć**

U tablici 6 navedeni su parametri (temperatura i vrijeme) rastopnog žarenja i dozrijevanja.

**Tablica 6. Parametri toplinske obrade upjenjenih uzoraka**

Uzorak br.	Rastopno žarenje	Umjetno dozrijevanje
1	-	-
2	570 °C / 2h	-
3	570 °C / 2h	160 °C / 1h
4	570 °C / 2h	160 °C / 1h
5	570 °C / 2h	160 °C / 8h
6	570 °C / 2h	160 °C / 8h
7	570 °C / 2h	190 °C / 1h
8	570 °C / 2h	190 °C / 1h
9	570 °C / 2h	190 °C / 8h
10	570 °C / 2h	190 °C / 8h

Svi uzorci, osim uzorka br. 1 su homogenizacijski žareni u peći pri temperaturi 570 °C u trajanju od 2 sata nakon čega su gašeni u hladnoj vodi. Brzim ohlađivanjem (gašenjem) omogućuje se zadržavanje atoma legirnih elemenata u  $\alpha$  kristalu mješancu aluminija u području nižih temperatura, sve do sobne.

Dozrijevanje uzoraka planiralo se provesti na temperaturama 160 °C i 190 °C u vremenskom intervalu od 1 odnosno 8 sati. Cilj dozrijevanja je ostvariti što višu tvrdoću i čvrstoću izlučivanjem malih sitnih precipitata intermetalnih faza u stjenkama ćelija aluminijeve pjene. Nakon završetka dozrijevanja, uzorci su hlađeni na zraku. Međutim ovdje treba istaknuti da su uzorci br. 7 – 10 dozrijevanjem zapravo uništeni jer je pogreškom tehničara peć namještena na previsoku temperaturu koja je dovela do djelomičnog taljenja uzoraka. Tako se daljnja razmatranja isključivo odnose na uzorke 1 – 6 koji su rastopno žareni i umjetno dozrijevani pri temperaturi 160 °C u vremenu od jednog odnosno osam sati.

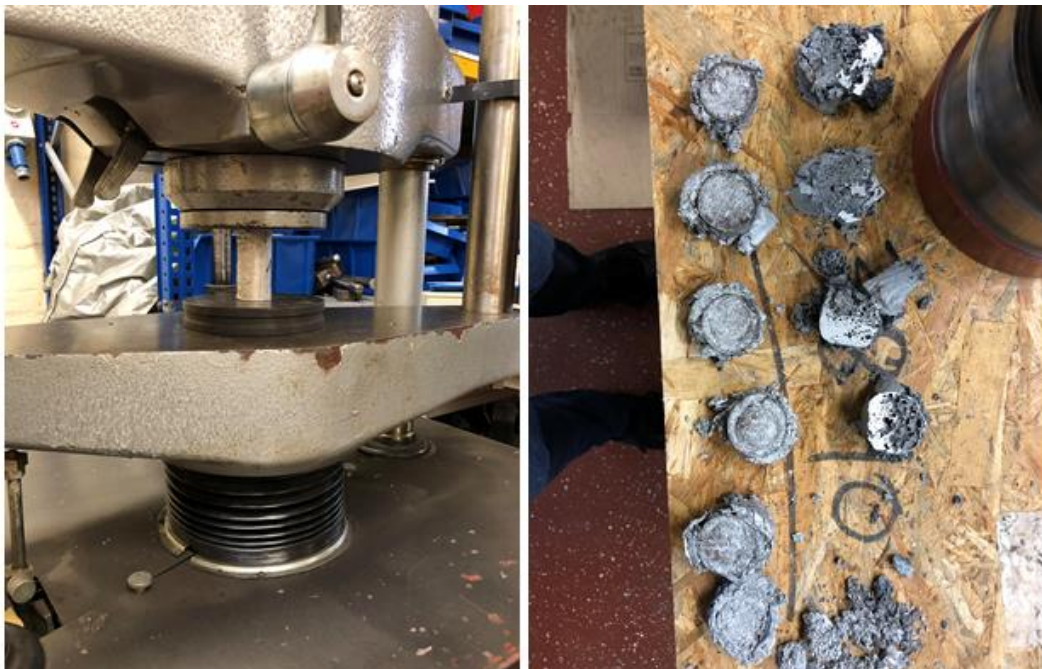
### 6.3 Ispitivanje tlačnih svojstava toplinski obrađenih uzoraka

Ispitivanje tlačnih svojstava upjenjenih uzoraka napravljeno je na univerzalnoj kidalici na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Kidalica na kojoj je provedeno ispitivanje može proizvesti maksimalnu tlačnu silu od 400 kN. Radi se o kidalici EU 40 mod proizvođača WPM, Njemačka. Ispitivanje je provedeno brzinom 1 mm/s (60 mm/min). Slika 6.3.1 prikazuje kidalicu, a na slikama 6.3.2 odnosno 6.3.3 prikazan je tijek tlačnog ispitivanja i uzorci nakon tlačenja.



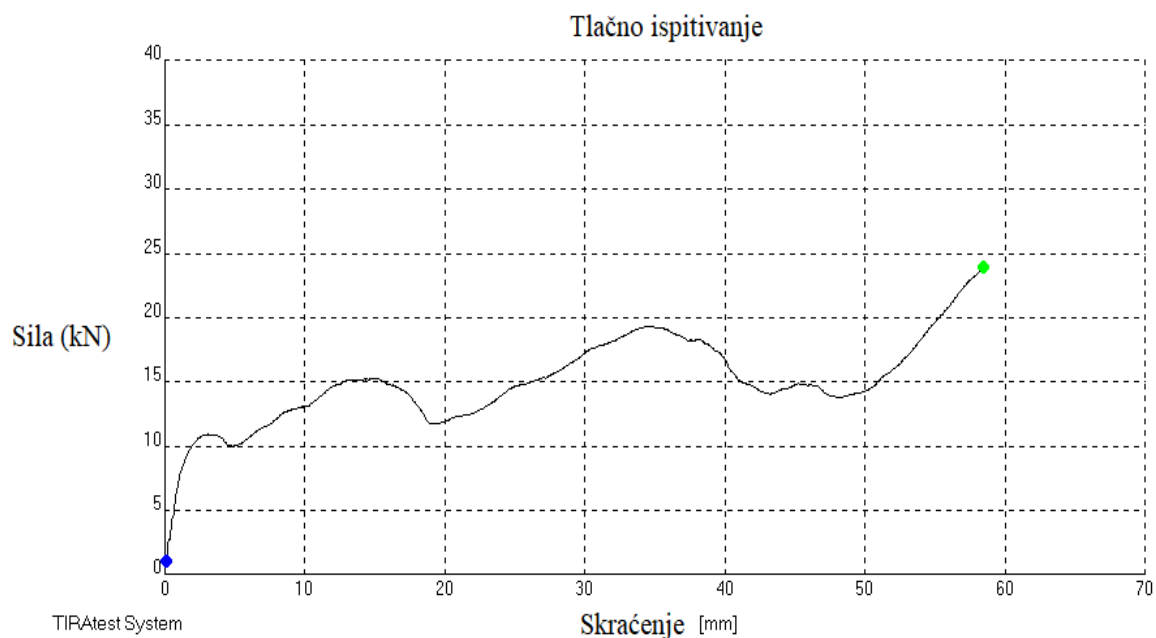


Slika 6.3.1 Kidalica EU 40 mod.

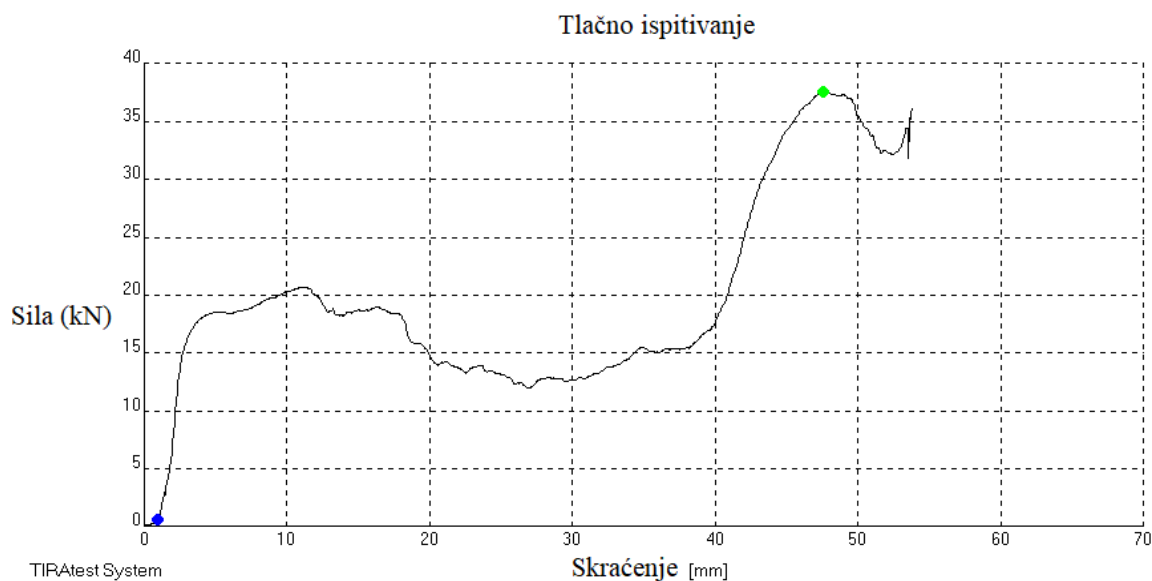


Slika 6.3.2 Postupak tlačnog ispitivanja i uzorci nakon ispitivanja

Na slikama 6.3.4 do 6.3.9 prikazani su dijagrami sila – skraćenje (sabijanje) snimljeni na kidalici tlačenjem uzorka 1 – 6.

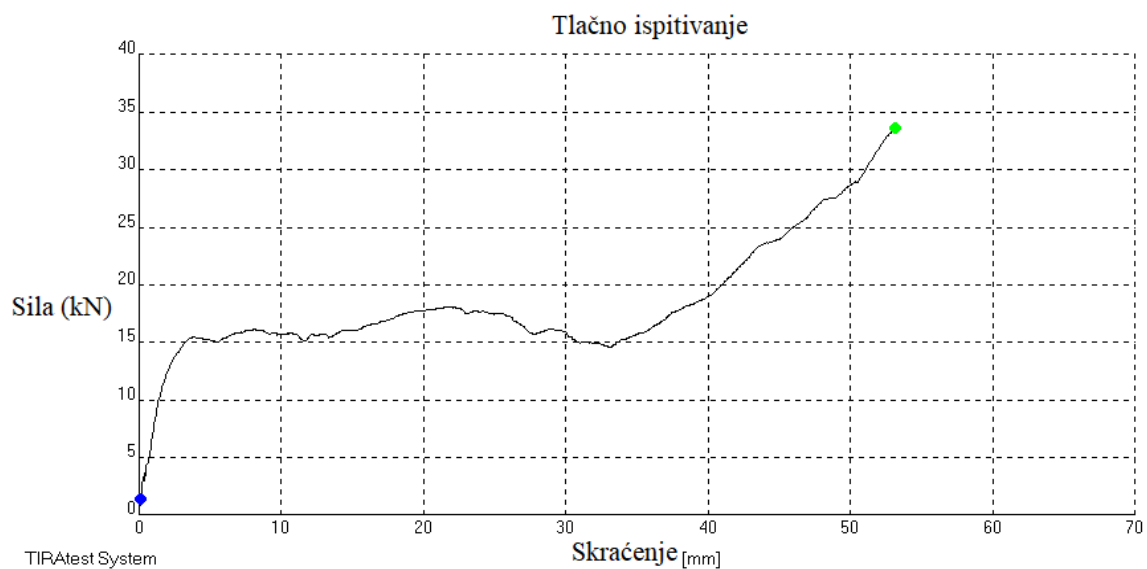


**Slika 6.3.3** Dijagram sila – skraćenje, uzorak 1

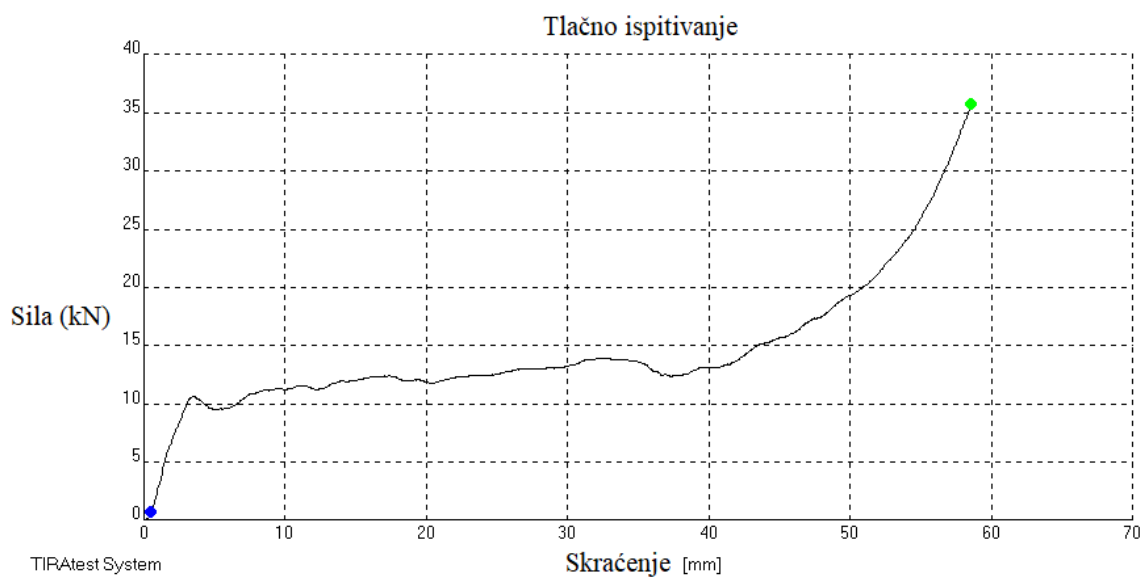


**Slika 6.3.4** Dijagram sila – skraćenje, uzorak 2

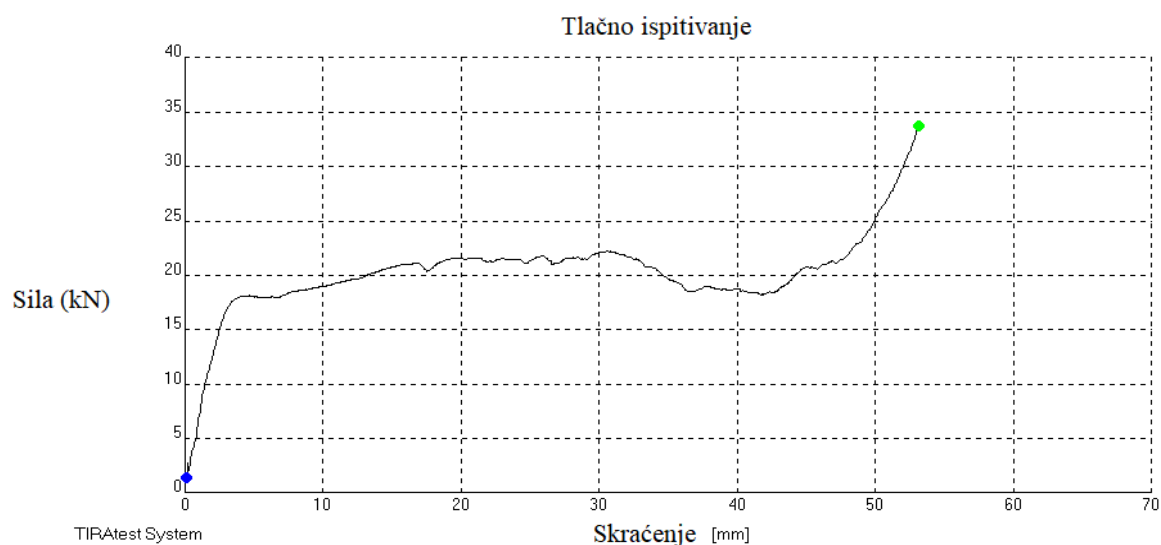




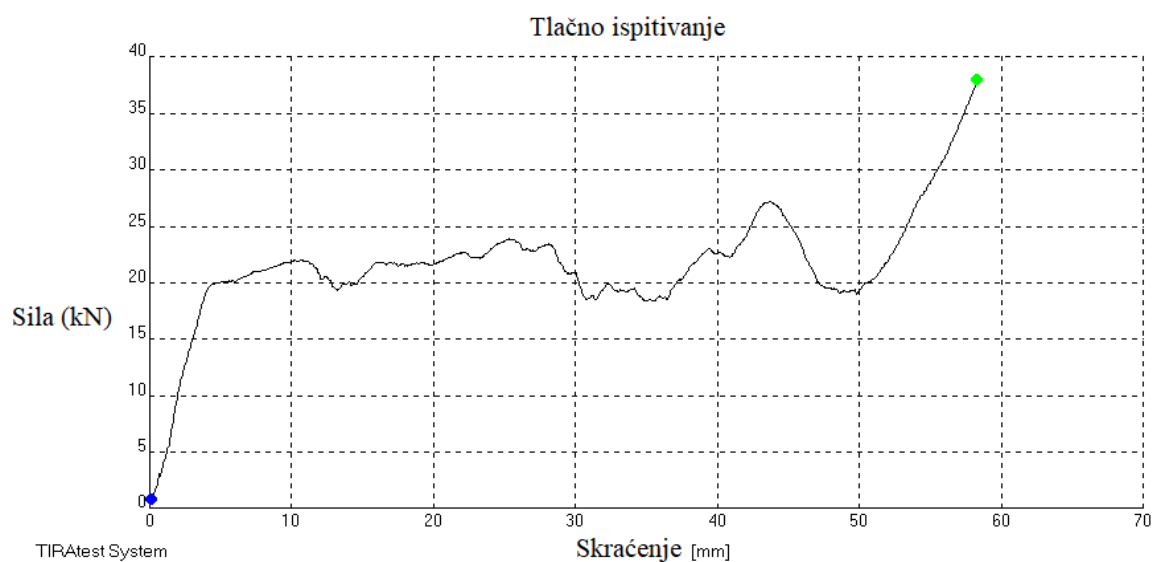
Slika 6.3.5 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 3



Slika 6.3.6 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 4

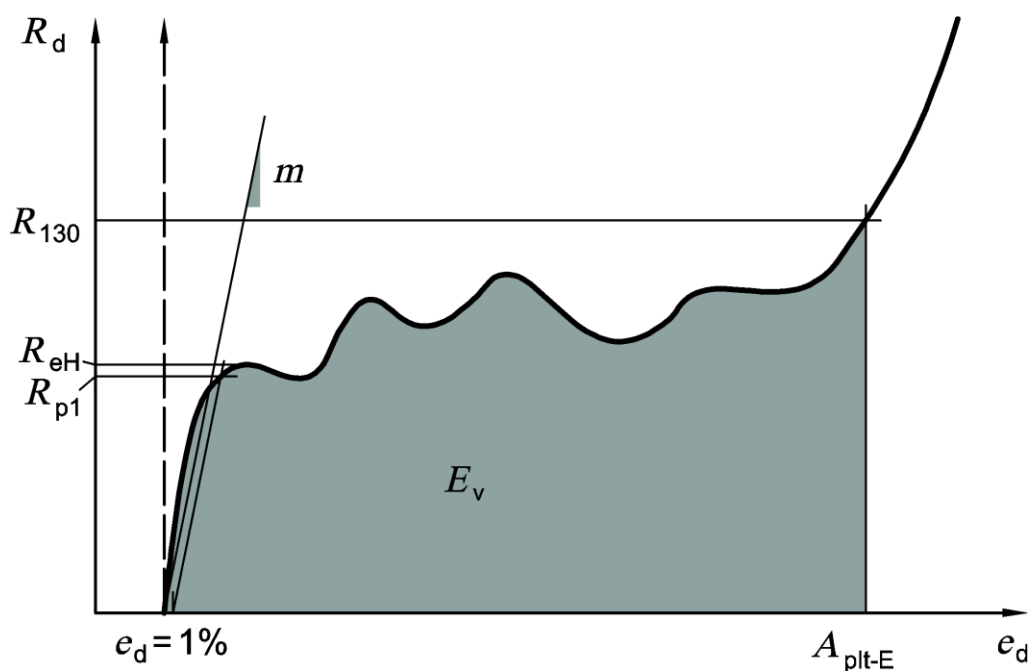


Slika 6.3.7 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 5



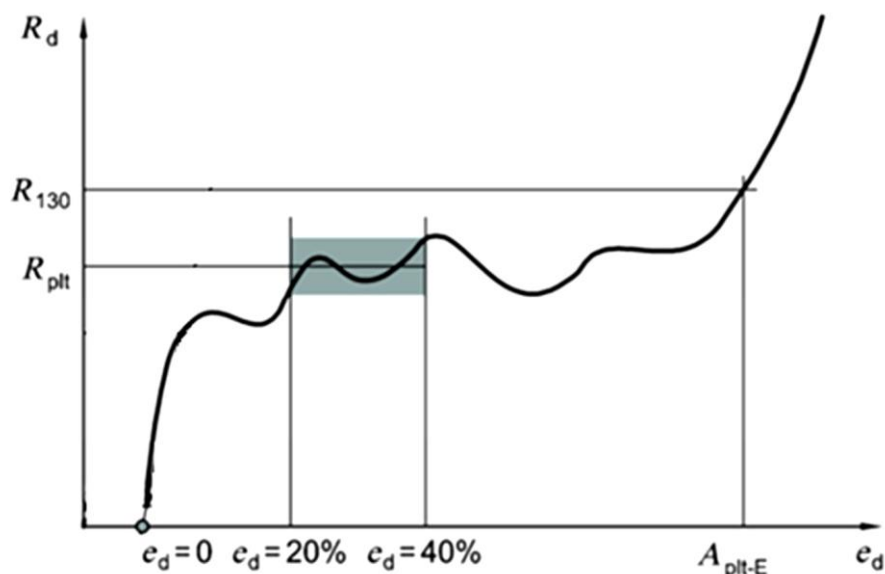
Slika 6.3.8 Dijagram sila – skraćenje, uzorak 6

Na uzorke metalnih pjena djelovala je tlačna sila koja je narušila izvornu upjenjenu strukturu. Otpor koji pružaju metalne pjene pri tlačnom opterećenju, odnosno energija koja se utroši na lom predstavljena je površinom ispod krivulje dijagrama sila-skraćenje i ona ukazuje na apsorpcijsku sposobnost pjene. Specifična apsorpcija energija  $E_v$  izračunava se iz dijagrama naprezanje-deformacija kako je to predočeno slikom 6.3.10.



**Slika 6.3.9** Dijagram naprezanje-deformacija sa specifičnom apsorpcijom energijom kao površinom ispod krivulje [24]

U dijagramu naprezanje-deformacija na slici 6.3.11 prikazano je određivanje vrijednosti naprezanja  $R_{plt}$  koje predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti naprezanja pri deformaciji 20 % i 40 % te određivanje naprezanja  $R_{130}$  i vrijednosti deformacije pri tom naprezanju ( $A_{plt-E}$ ).



**Slika 6.3.10** Dijagram naprezanje-deformacija s karakterističnim svojstvima tlačnog ispitivanja ćelijastih materijala [24]

U tablici 6 sažete su vrijednosti specifičnih naprezanja  $R_{plt}$ ,  $R_{130}$ , te deformacije pri završetku platoa ( $A_{plt-E}$ ), specifične apsorpcije energije ( $E_v$ ) te efikasnosti specifične apsorpcije energije ( $E_{eff}$ ).

**Tablica 7. Rezultati tlačnog ispitivanja**

Uzorak	$R_{plt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_{130}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A_{plt-E}$ (%)	$E_v$ (MJ/m <sup>3</sup> )	$E_{eff}$ (%)
1	12,373	16,084	70,375	7,736	68,35
2	12,191	15,848	51,509	6,028	73,84
3	12,192	15,850	51,850	6,373	77,55
4	9,943	12,926	58,726	5,394	71,06
5	16,421	21,348	64,166	9,668	70,58
6	15,560	20,228	67,648	10,588	77,37

Vrijednosti navedene u ovoj tablici izračunate su na osnovi jednadžba (5), (6) i (7) [24]:

$$R_{130} = 1,3 \cdot R_{plt} \quad (5)$$

gdje je:

$R_{plt}$ , N/mm<sup>2</sup> – aritmetička sredina naprezanja pri deformaciji  $e_d = 20\%$  i  $e_d = 40\%$ ,  
 $R_{130}$ , N/mm<sup>2</sup> – 30 % veće naprezanje od  $R_{plt}$ ,

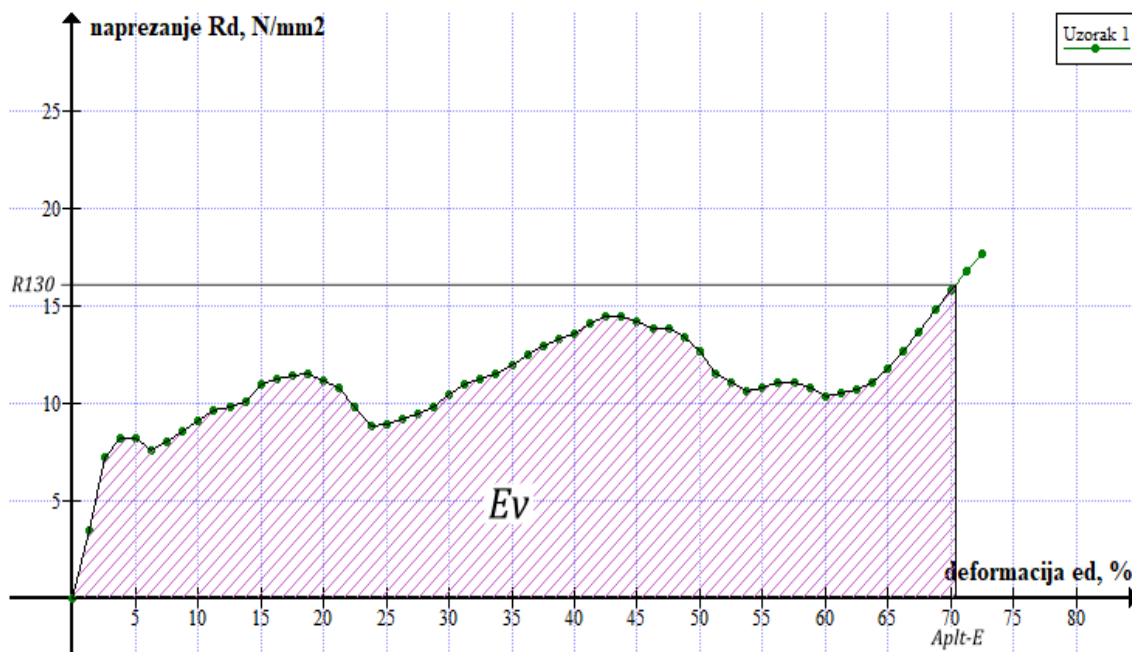
$$E_v = \int_{e=0}^{A_{plt-E}} R(e) de_d \tag{6}$$

$$E_{eff} = \frac{E_v}{R_{130} \cdot A_{plt-E}} \cdot 100\% \tag{7}$$

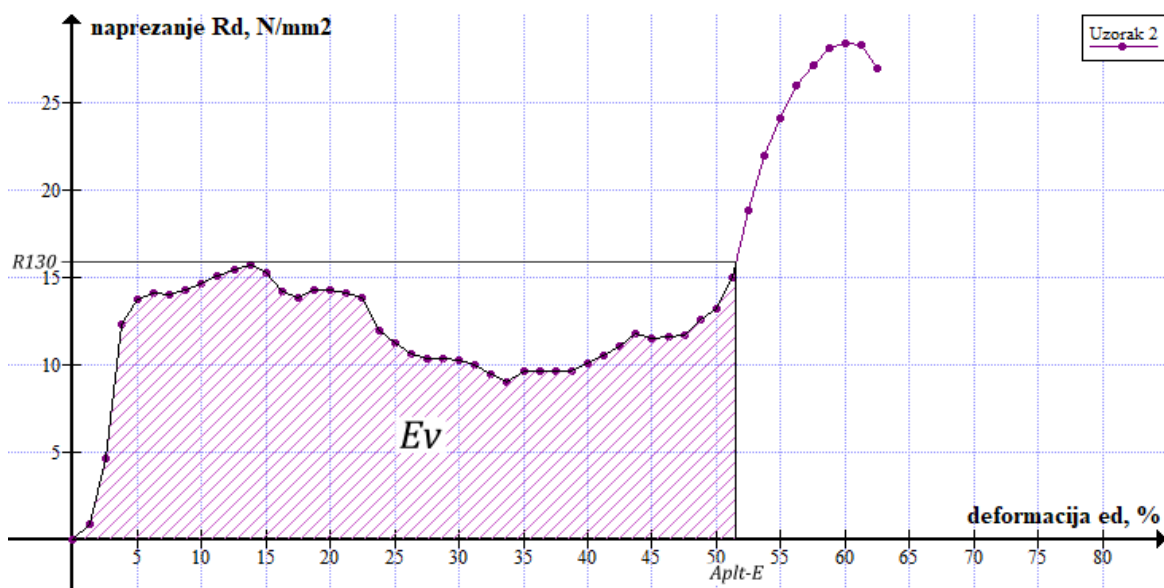
gdje je:

- $A_{plt-E}$ , % – deformacija pri završetku platoa (deformacija pri naprezanju  $R_{130}$ ),
- $E_v$ , MJ/m<sup>3</sup> – specifična apsorpcija energije (površina ispod krivulje naprezanje-deformacija do vrijednosti  $A_{plt-E}$ ),
- $E_{eff}$ , % – efikasnost specifične deformacije energije.

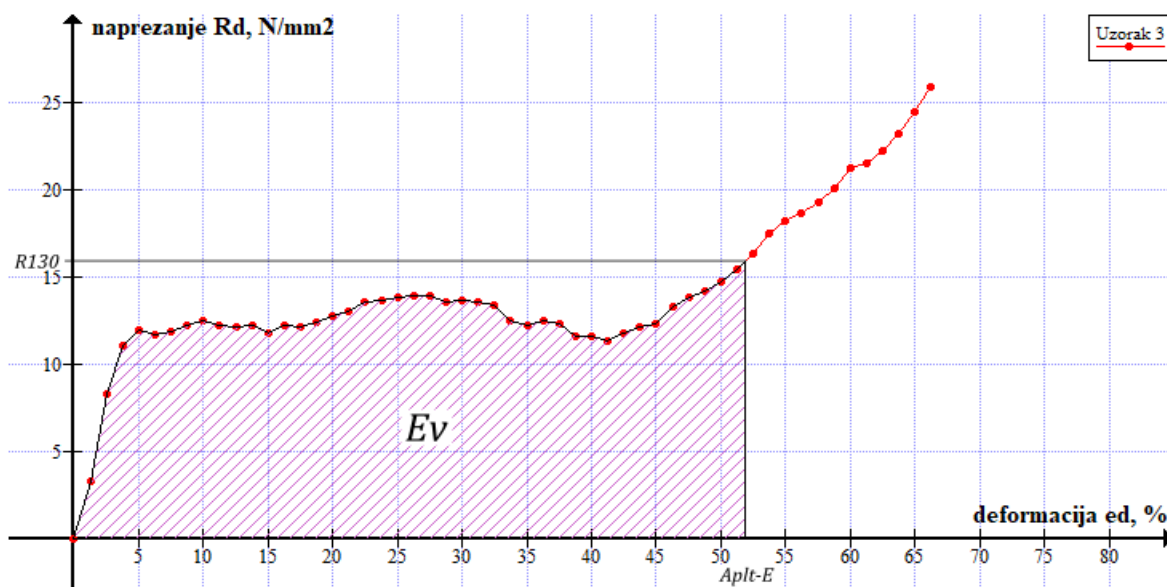
Da bi mogli izražunati površinu ispod krivulje naprezanje-deformacija, a time i specifičnu apsorpciju energije, dijagrami sila – sabijanje snimljeni na kidalici prilikom tlačenja uzoraka prevedeni su u programu *Graph 4.4.2* u dijagrame naprezanje – deformacija i izračunata je površina ispod krivulje tlačenja, slike 6.3.12 do 6.3.17.



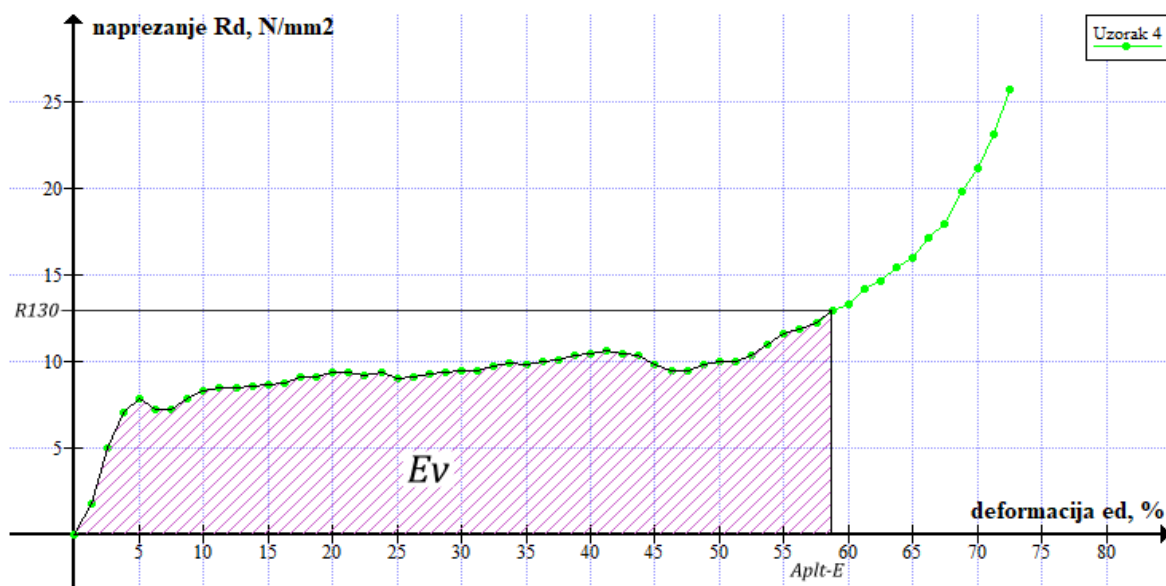
Slika 6.3.11 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 1



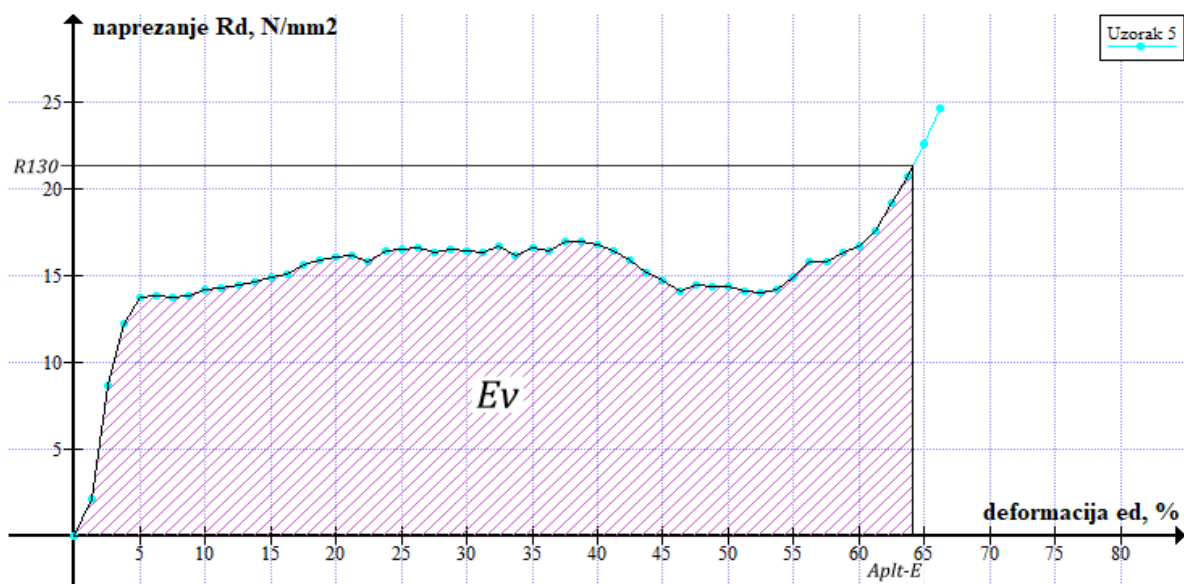
Slika 6.3.12 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 2



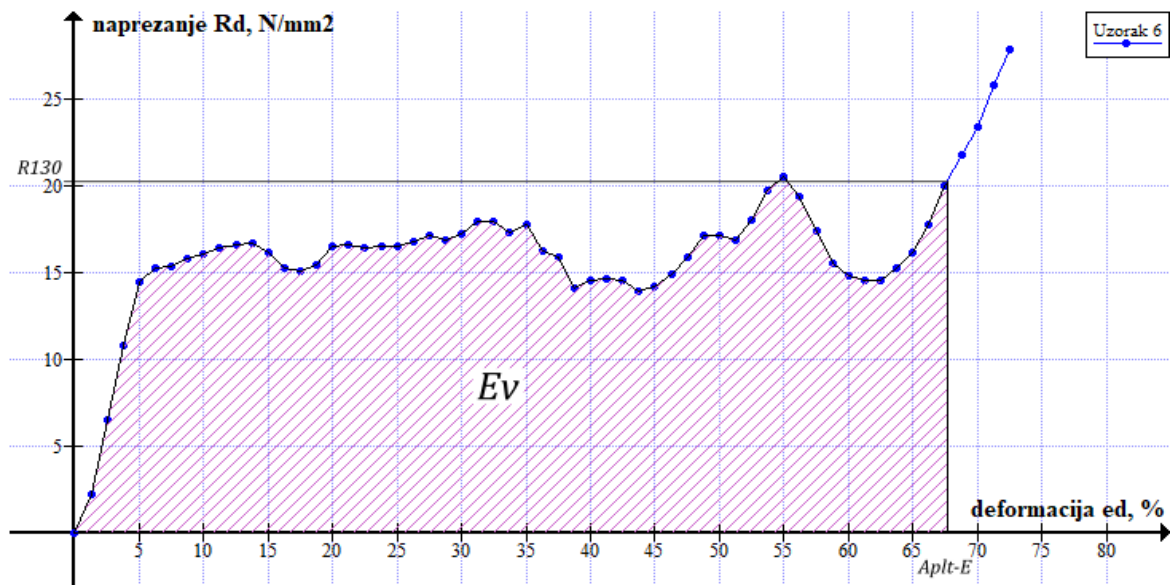
Slika 6.3.13 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 3



Slika 6.3.14 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 4



Slika 6.3.15 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 5



Slika 6.3.16 Dijagram naprezanje – deformacija, uzorak 6



## ZAKLJUČAK

Metalne pjene imaju odlična svojstva kao što su: velika apsorpcija udara, visoka krutost, negorivost, izolacijska i toplinska svojstva te mala masa. Trenutno najveći problemi, osim još uvijek visoke cijene su i nedovoljno istraženi tehnološki procesi proizvodnje, nepoznavanje utjecaja ćelijaste građe na mehanička svojstva i veliko rasipanje rezultata te kad je riječ o aluminijskim pjnama još ne istraženi mehanizmi očvrnuća koji bi efikasno povećali mehaničku otpornost pjene i unaprijedili druga specifična svojstva karakteristična za ove materijale.

Postupkom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi u ovom su radu uspješno proizvedeni uzorci aluminijske pjene relativne gustoće od 0,149 do 0,213 te velike poroznosti koja se kretala u rasponu od 78,7 % do 85,1 %. U daljnjim ispitivanjima razmatrao se utjecaj toplinskog očvrnuća putem rastopnog žarenja i dozrijevanja na ostvareni iznos specifične apsorpcije energije. Iz navedenih rezultata jasno proizlazi da se dozrijevanjem u trajanju od 8 sati može značajno povećati sposobnost specifične apsorpcije energije toplinski obrađene pjene i to za 71,8 % u odnosu na uzorke dozrijevanje kraće vrijeme (1 sat), ali također i veća apsorpcija energije od nedozrijevanog, samo rastopno žarenog stanja, te onog toplinski neobrađenog.

## LITERATURA

- [1] M. Vesenjāk, M. Borovinšek, Z. Ren, S. Irie, S. Itoh, Behavior of Metallic Foam under Shock Wave Loading, *Metals - Open Access Metallurgy Journal* 2(4) (2012), 258-264
- [2] M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley: *Metal Foams - A Design Guide*, Butterworth Heinemann, 2000.
- [3] John Banhart: Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Material Science* 46 (2001), 559 – 632
- [4] T. Filetin, I. Kramer, G. Marić: *Metalne pjene - proizvodnja, svojstva i primjena*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [5] Dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Incofoam-sample-made-via-nickel-carbonyl-process-20-ppi-245\\_fig22\\_216045978](https://www.researchgate.net/figure/Incofoam-sample-made-via-nickel-carbonyl-process-20-ppi-245_fig22_216045978) , pristupljeno: 22.11.2021.
- [6] M. Larner, J. Acker, L.P. Dávila, The Random Porous Structure and Mechanical Response of Lightweight Aluminum Foams, *Materials Research Society symposia proceedings*, Materials Research Society 1662(1), 2014.
- [7] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson: Compressive and tensile behaviour of aluminium foams, *Materials Science and Engineering A270* (1999.), 113-124
- [8] W. Krach, T. Daxner, F.G. Rammerstorfer: *Metallic Foams versus Human Bones*, Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000.
- [9] T.Matsushita, S.Fujibayashi, T.Kokubo, Titanium foam for bone tissue engineering, *Processing, Modification and Characterization and Properties 2017*, 111-130
- [10] Dostupno na: <https://www.bangscience.org/2015/05/floating-metal-and-unsinkable-ships/>, pristupljeno: 12.10.2021.
- [11] H. Xu, C. Zhao, L. Gong, Y.H. Yang, Z.G. Xu, Analytical considerations of local thermal non-equilibrium conditions for thermal transport in metal foams, *International Journal of Thermal Sciences* 95 (2015), 73-87

- [12] Dostupno na: [https://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/metallic\\_foam.html](https://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/metallic_foam.html), pristupljeno: 25.11.2021.
- [13] S. Bao, Filtration of aluminium-experiments, wetting and modelling, doctoral thesis, 2011.
- [14] S. Rybandt, C. Lies, T. Hipke, Train Front Module in Aluminium-foam-sandwich Design, *Lightweight Design worldwide* 10 (2017), 12-17
- [15] Dostupno na: <http://casopis-gradjevinar.hr/archive/article/1395> , pristupljeno: 29.11.2021.
- [16] M. Franz, Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1998.
- [17] V Rede, Autorizirana predavanja iz kolegija Posebni metalni materijali, Fakultet strojarstva i brodogranje Sveučilišta u Zagrebu, 2019.
- [18] D. Ćorić, T. Filetin, Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012
- [19] M. Novosel, D. Krumes, Posebni čelici, Slavonski Brod, 1998.
- [20] D. Iljkić, Prilog razvoju procjene mehaničkih svojstava poboljšanog čelika i čeličnog lijeva, Doktorski rad, Tehnički fakultet u Rijeci, 2010.
- [21] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [22] Dostupno na: <https://www.imetllc.com/training-article/mechanisms-strengthening-aluminum/>, pristupano:12.11.2021
- [23] V. Rede, Autorizirana predavanja iz kolegija Izbor materijala, Označivanje Al i Al-legura, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2018.
- [24] DIN 50134:2008 Prüfung von metallischen Werkstoffen - Druckversuch an metallischen zellularen Werkstoffen

- [25] I. Bunjan, K. Grilec, D. Ćorić, Investigation and Statistical Evaluation of Reinforced Aluminum Foams, *Processes* 9 (2021) 2, 1-16