

# METALNE PJENE

---

**Puškaric, Marija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:022335>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-31**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# METALNE PJENE

---

**Puškaric, Marija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:022335>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2023-02-15**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PROIZVODNO STROJARSTVO**

**MARIJA PUŠKARIĆ**

**METALNE PJENE**

**ZAVRŠNI RAD**

**Karlovac, 2020.**

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PROIZVODNO STROJARSTVO**

**MARIJA PUŠKARIĆ**

**METALNE PJENE**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Tomislav Božić, dipl.ing.stroj.

**KARLOVAC, 2020.**

## **IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja – studentica Marija Puškarić, OIB: 67533407461, matični broj: 0110613001, upisana kao apsolvent akademske godine 2019./2020., radila ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentora Tomislava Božića dipl.ing.stroj., kojem se ovim putem zahvaljujem. Također, zahvaljujem se i svojoj obitelji na podršci tijekom studiranja.

Marija Puškarić

U Karlovcu 06.05.2020.

---

# **SAŽETAK**

## **METALNE PJENE**

Tema završnog rada je „Metalne pjene“. U radu su objašnjeni postupci proizvodnje metalne pjene, svojstva metalnih pjena i primjena. Postupak proizvodnje metalne pjene ovisi o vrijednosti veličine ćelije i relativnoj gustoći. Ispitivanja svojstava metalnih pjena još su u razvoju, a zbog nepredvidive mikrostrukture provode se strožim režimima. Metalne pjene imaju veliki potencijal u primjeni jer oponašaju strukturu prirodnih ćelijastih materijala.

Ključne riječi: Metalne pjene, proizvodnja, svojstva, primjena

## **SUMMARY**

### **METAL FOAMS**

The topic of the final paper is "Metal foams". The paper describes the methods of production of metal foam, properties of metal foams and applications. The process of production of metal foam depends on the value of cell size and relative density. Tests on the properties of metal foams are still under development, and due to unpredictable microstructures, more rigorous modes are being implemented. Metal foams have great potential for application because they mimic the structure of natural cellular materials.

Keywords: Metal foams, production, properties, application

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	1
POPIS TABLICA.....	3
POPIS OZNAKA.....	4
1. UVOD.....	5
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA.....	7
2.1. Ubrizgavanje plina u taljevinu.....	9
2.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini.....	10
2.3. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi.....	11
2.4. Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera.....	13
2.5. Taloženje metala na ćelijaste praoblake.....	15
2.6. Ekspanzija plina u taljevini.....	16
2.7. Građe s kuglastim šupljinama.....	17
2.8. Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv.....	20
2.9. Eutektičko skrućivanje plin-metal.....	21
2.10. Selektivno lasersko srašćivanje.....	23
3. SVOJSTVA METALNIH PJENA.....	25
3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena.....	25
3.1.1. Krutost.....	27
3.1.2. Tlačna čvrstoća.....	29
3.1.3. Vlačna čvrstoća.....	32
3.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju-umor.....	34
3.1.5. Ponašanje pri puzanju.....	37
3.1.6. Apsorpcija energije udara.....	38
3.1.7. Sendvič-konstrukcije.....	39
3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena.....	40
3.3. Zvučna svojstva metalnih pjena.....	41
3.4. Prigušivanje vibracija metalnih pjena.....	42



3.5. Spajanje metalnih pjena.....	43
3.5.1. Spajanje ljepilima.....	43
3.5.2. Stvaranje rastavljivih spojeva.....	43
3.5.3. Zavarivanje.....	45
4. USPOREDBA METALNIH PJENA SA SLIČNIM ĆELIJASTIM MATERIJALIMA.....	46
4.1. Polimerne pjene.....	46
4.2. Drvo.....	47
5. PRIMJENA METALNIH PJENA.....	48
5.1. Automobilaska industrija.....	49
5.2. Željeznička industrija.....	52
5.3. Brodogradnja.....	53
5.4. Zrakoplovna industrija.....	53
5.5. Građevinska industrija.....	53
5.6. Industrija namještaja.....	55
5.7. Izmjenjivači topline i rashladni uređaji.....	55
5.8. Medicina.....	56
6. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	58

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prirodni ćelijasti materijali: a) pluto, b) balza, c) spužva, d) kost, e) koralj, f) riblja kost, g) list irisa, h) stabljika biljke.....	5
Slika 2. "Obiteljsko stablo" metalnih pjena.....	7
Slika 3. Vrijednosti veličine ćelija i relativne gustoće koje se mogu dobiti određenim proizvodnim postupkom.....	8
Slika 4. Proces nastanka metalne pjene ubrizgavanjem plina u taljevinu.....	9
Slika 5. Poteškoće uzrokovane loše odabranom količinom čestica.....	10
Slika 6. Proces nastajanja metalne pjene ALPORAS pjene.....	11
Slika 7. Proces nastajanja FOAMINAL-ALULIGHT metalne pjene.....	12
Slika 8. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene.....	13
Slika 9. Proces nastajanja ERG DUOCEL metalne pjene.....	14
Slika 10. Proces nastajanja Ni metalne pjene (tzv. INCO pjena).....	15
Slika 11. Proces nastajanja metalne pjene procesom širenja internog plina.....	16
Slika 12. Proces nastajanja metalne pjene razvijen na Georgia Tech-u.....	18
Slika 13. Proces nastajanja metalne pjene s kuglastim šupljinama IFAM postupkom.....	19
Slika 14. Metalna kuglasta pjena od nehrđajućeg čelika AISI 316 L.....	20
Slika 15. Nastajanje metalne pjene povezivanjem dvaju materijala od kojih je jedan topljiv: a) rastaljeni metal (npr. aluminij i njegove legure) infiltrira se u sloj topljivih čestica; b) čestice se otapaju u prikladnom otapalu (npr. voda) čime nastaju otvorene ćelije.....	20
Slika 16. Binarni dijagram stanja metal-vodik.....	21
Slika 17. Proces nastajanje metalne pjene eutektičkim plinom-metal skrućivanjem.....	22
Slika 18. Konačna struktura ćelija.....	22
Slika 19. Princip rada procesa (selektivno lasersko srašćivanje).....	23
Slika 20. a) zatvorena ćelija metalne pjene; b) otvorena ćelija metalne pjene.....	25
Slika 21. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena.....	28
Slika 22. Tipični dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje realnih Al pjena.....	29
Slika 23. Krivulje "naprezanje-deformacija" pod tlačnim opterećenjem aluminijskih pjena; a) do deformacije od 5 % b) pri većim deformacijama.....	31
Slika 24. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći.....	31

Slika 25. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja materijala ćelija ( $R_e$ ).....	32
Slika 26. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti.....	32
Slika 27. Dijagram naprezanja-istezanje Al pjena.....	33
Slika 28. Krivulja naprezanje-istezanje s udjelom lomne površine ALPORAS pjene (uzorci bez ureza).....	33
Slika 29. Odnos transverzalnog i longitudinalnog istežanja.....	34
Slika 30. Vrste dinamičkih opterećenja.....	35
Slika 31. Skraćenje Duocel Al-6101-T6 pjene u uvjetima umora izazvanog tlačnim opterećenjima.....	35
Slika 32. Tip 2 ponašanje metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja.....	36
Slika 33. Tip 3 ponašanje metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja.....	36
Slika 34. Omjer između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće.....	38
Slika 35. Krivulje koje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju (a) i tlaku (b).....	39
Slika 36. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od metalne pjene.....	40
Slika 37. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al.....	42
Slika 38. Proces povezivanja umetaka i metalne pjene.....	44
Slika 39. Komadi metalne pjene s bakrenim umetkom.....	44
Slika 40. Rastavljivo spajanje metalnih pjena.....	44
Slika 41. Lasersko zavarivanje metalne pjene.....	45
Slika 42. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena.....	45
Slika 43. Zone primjene metalne pjene kod automobila.....	49
Slika 44. Naplatak automobila s jezgrom od ALULIGHT pjene (ušteda u masi do 2 kg po kotaču).....	50
Slika 45. Primjeri dijelova motora.....	51
Slika 46. a) Al pjenasti dio za Ferrari 360; b) mali element koji apsorbira pad sustava za Audi Q7.....	51
Slika 47. Prototip njemačkog vlaka izrađenog od Al pjene zavarene sendvič konstrukcije.....	52
Slika 48. Objekt izrađen od fasadnih obloga od Al metalne pjene.....	54
Slika 49. Filteri od metalne pjene.....	54
Slika 50. Stol od Al pjene.....	55
Slika 51. Zubni implantat temeljen na Ti pjeni.....	56

## POPIS TABLICA

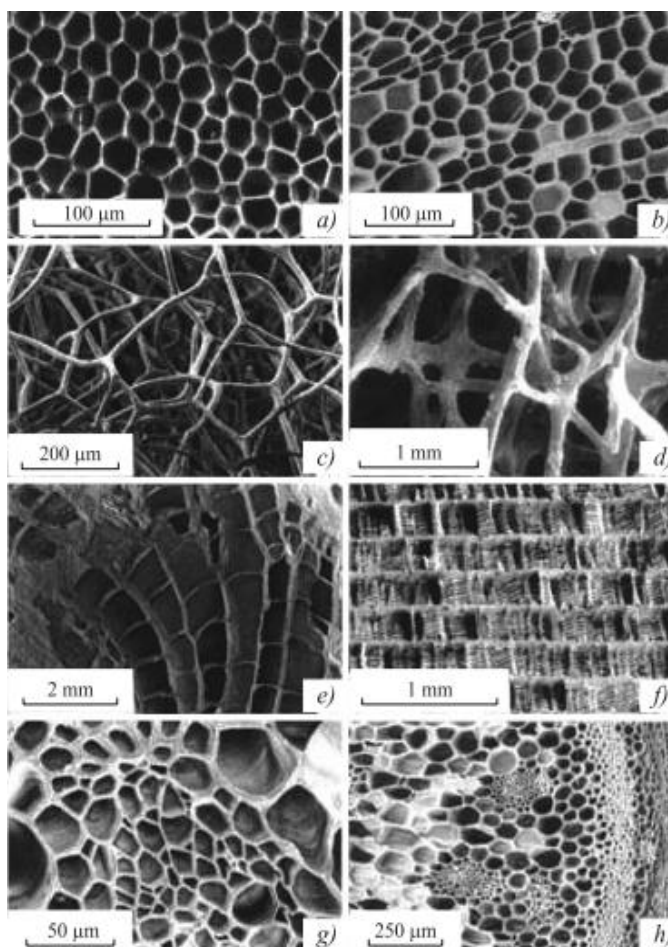
Tablica 1. Mehanička svojstva metalnih pjena.....	26
Tablica 2. Izrazi za proračun svojstava metalnih pjena.....	27
Tablica 3. Moguća primjena metalnih pjena.....	48
Tablica 4. Zona primjene metalne pjene kod automobila.....	50

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\rho/\rho_s$	-	relativna gustoća
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	gustoća
E	Pa	modul elastičnosti
G	Pa	modul smičnosti
$E_f$	Pa	modul savitljivosti
$\nu$	-	poissonov faktor
$R_{mt}$	Pa	tlačna čvrstoća
$R_e$	Pa	granica razvlačenja
$R_m$	Pa	vlačna čvrstoća
$R_d$	Pa	dinamička izdržljivost
$\epsilon_D$	-	deformacija pri zgušnjavanju
$\epsilon_f$	-	vlačna duktilnost
$\eta^c$	%	faktor gubitka
H	%	tvrdoća
$K_{IC}$	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	lomna žilavost
K	Pa	modul volumena
m	-	eksponent koji za metalne pjene iznosi od 1,5 do 2
$\alpha_1$	-	koeficijent koji iznosi od 1,4 do 2,0
$\sigma$	Pa	naprezanje
W	-	širina ispitivane ploče
D	mm	promjer provrta
$\epsilon^*$	$\text{s}^{-1}$	brzina puzanja u drugom stadiju
$\epsilon_0^*$	$\text{s}^{-1}$	početna brzina puzanja
n	-	eksponent puzanja
$R_{et}$	Pa	granica stlačivanja
C	-	konstanta
U	J	deformacijska energija

# 1. UVOD

Do nastanka metalnih pjena došlo je s razvojem tehnologije i uporabom novih oblika poznatih materijala. Metalne pjene su pokušaj oponašanja građe i strukture za tehničke uvijete primjene ćelijastih materijala kao što su drvo, kamen, kost, koralj i sl. Svojstva metalnih pjena određuje visoka poroznost 40% do 90%, veličina ćelije (otvorene i zatvorene), vrsta osnovnog materijala, način proizvodnje, niska gustoća, prilagodljiva toplinska svojstva, vatrootpornost, dobra električna vodljivost, odlično prigušivanje energije udara, vibracija i zvuka, visoka krutost kod sendvič-konstrukcija.



Slika 1. Prirodni ćelijasti materijali:

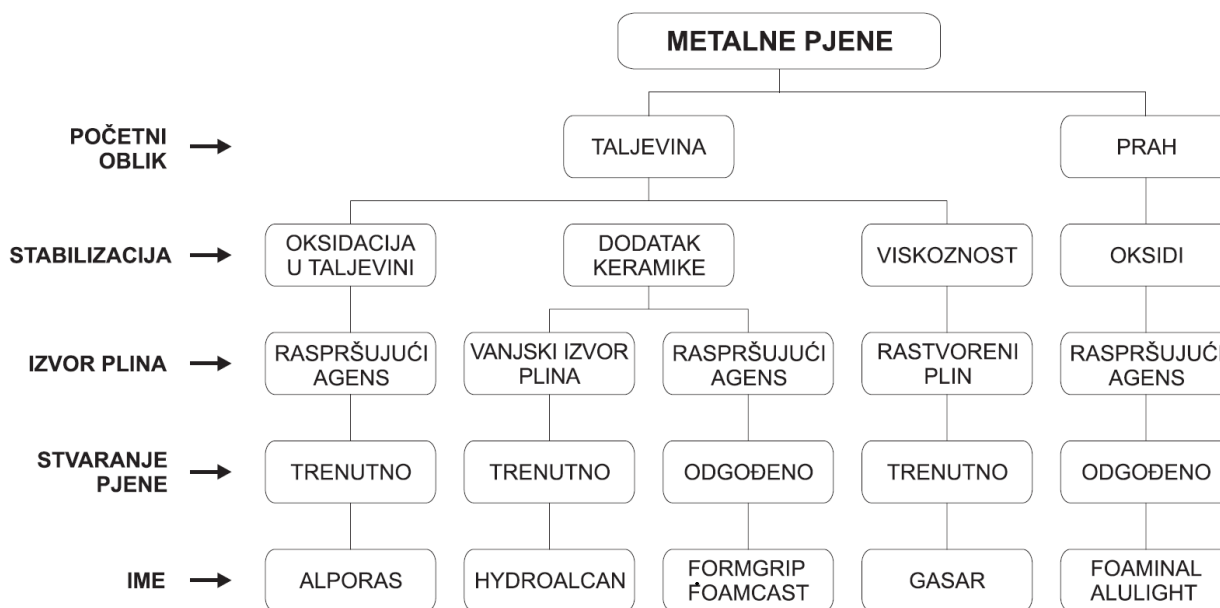
a) pluto, b) balza, c) spužva, d) kost, e) koralj, f) riblja kost, g) list irisa, h) stabljika biljke [1]

Metalne pjene predstavljaju interesantno i nedovoljno istraženo područje na kojem je moguć razvoj i napredak. Izvode se brojni pokušaji pjenjenja metala ili proizvodnje porozne metalne strukture. Zbog visoke cijene i proizvodnje lošeg pjenastog materijala metalne pjene nisu u širokoj primjeni.

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). Po posebnoj narudžbi proizvode se i pjene na bazi olova (Pb), magnezija (Mg), cinka (Zn), bakra (Cu), titana (Ti), čelika, bronce i zlata (Au).

## 2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

Početne sirovine za proizvodnju metalnih pjena mogu biti u obliku praha ili taljevine. Metalne taljevine se mogu pod određenim uvjetima pjeniti stvaranjem mjehurića plina u tekućini. Mjehurići plina u metalnoj taljevini brzo se uzdižu na njegovu površinu zbog velike sile uzgona u tekućini visoke gustoće. Upjenjivanje je moguće jedino iz tekuće faze tako da se i prah mora rastaliti. Izvor plina je neophodan za stvaranje šupljina unutar rastaljenog metala. U taljevini se može dodati raspršujući agens koji pospješuje pjenjenje ili je moguće dodavanje agensa u metalni prah. Kombinacijom više metala može se dobiti širok raspon svojstava, pa je moguće prilagoditi materijal za točno određeni proizvod.



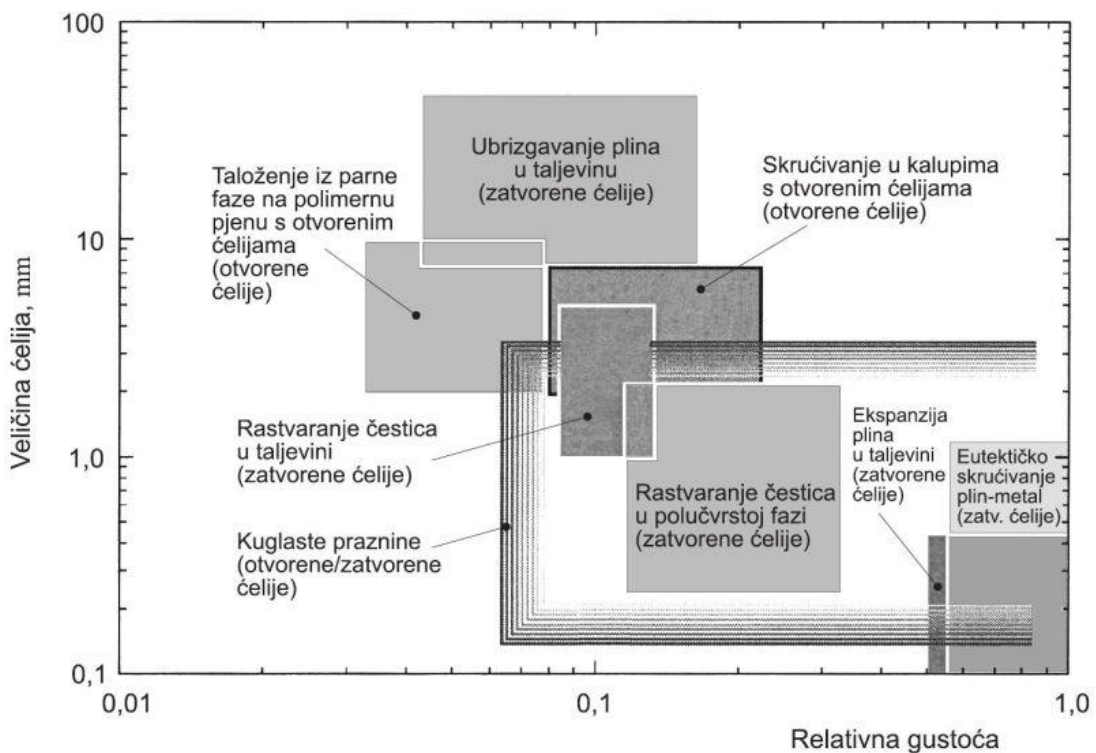
Slika 2. "Obiteljsko stablo" metalnih pjena [2]



Za proizvodnju pjena potrebno je pronaći novi ujedno i učinkovitiji proces kako bi se na temelju prethodno zadanih elemenata postignula točno određena svojstva. Proizvodnja metalnih pjena dijeli se na četiri šira područja:

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

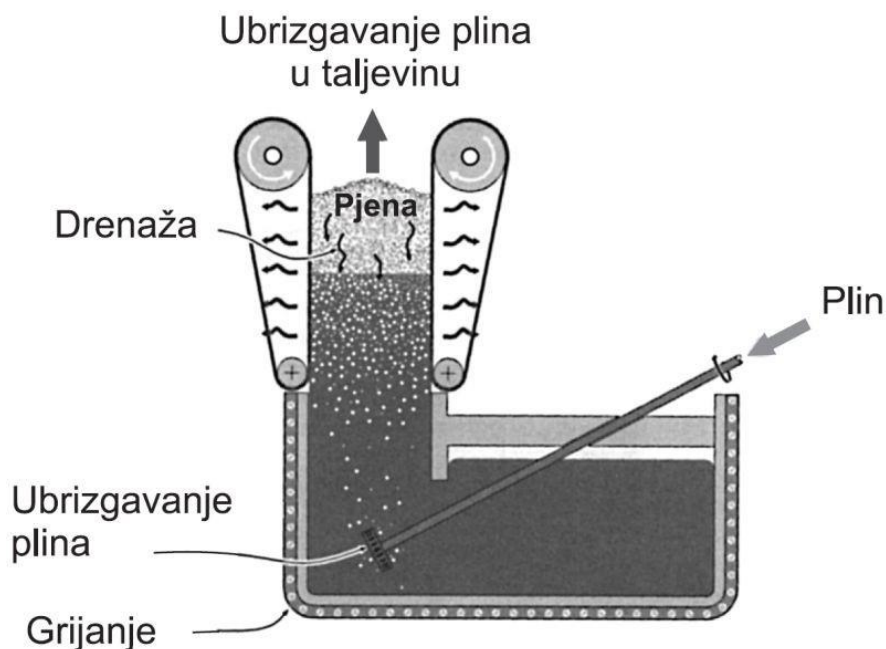
Svakim od ovih postupaka može se utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija te na relativnu gustoću. [1]



Slika 3. Vrijednosti veličine ćelija i relativne gustoće koje se mogu dobiti određenim proizvodnim postupkom [1]

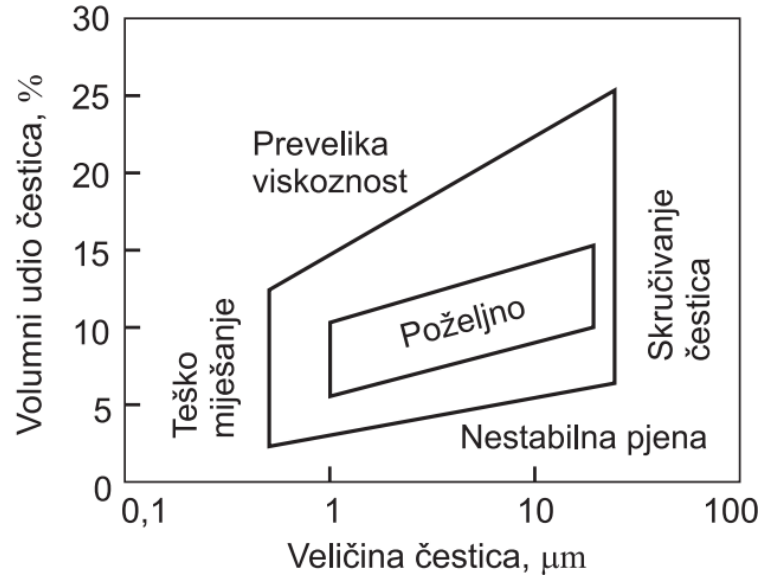
## 2.1. Ubrizgavanje plina u taljevinu

U taljevinu se dodaju nerastvorljive čestice. Najčešće se koriste SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, MgO ili TiB<sub>2</sub> promjera 0,5 μm do 25 μm čiji volumni udio najčešće iznosi 10-20%. U svrhu postizanja jednolike raspodjele kod unošenja tih čestica u aluminij koristi se tehnika miješanja. U taljevinu se upuhuje plin rotirajućim ubrizgavalicama i vibrirajućim raspršivačima. Plinovi koji se koriste su zrak, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, inertni plinovi (npr. argon), N<sub>2</sub>, pa čak i vodena para. Mješavina metala i mjehurića ispliva na površinu gdje se metal suši. Pjena izlazi na površinu pomoću pomičnih traka (konvejskih remena). Ovim postupkom dobivaju se pjene gustoće od 69 kg/m<sup>3</sup> do 540 kg/m<sup>3</sup>, pore su promjera 3-25 mm, a debljina stjenke iznosi 50-85 μm. Na veličinu ćelija utječe se protokom plina, brzinom ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača i ostalim parametrima.



Slika 4. Proces nastanka metane pjene ubrizgavanjem plina u taljevinu [1]

Mogu se pojaviti određene poteškoće ako je sadržaj čestica prevelik ili premalen, te zbog sila pomičnih traka prilikom vučenja na površinu.



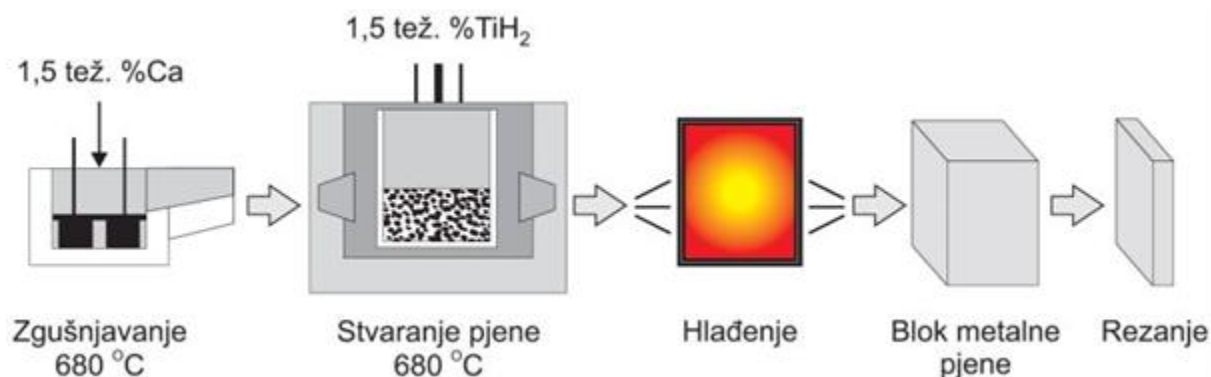
Slika 5. Poteškoće uzrokovane loše odabranom količinom čestica [1]

Prednost ovog postupka je u tome što se mogu proizvoditi komadi velikih dimenzija i niske je cijene, a nedostatak ovog procesa je mogućnost dijagonalnog formiranja ćelija što negativno utječe na mehanička svojstva.

## 2.2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini

U ovom se postupku taljevini dodaje agens za poboljšanje upjenjivanja. Pod utjecajem povišene temperature on se rastvara i tako tvori plin. U početnoj fazi procesa pri temperaturi tališta aluminija u rasponu od 670-690°C, taljevini se dodaje oko 1,5% Ca. Nakon nekoliko minuta vođenja procesa viskoznost se znatno povećava zbog spojeva CaO, CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ili intermetalnog spoja Al<sub>4</sub>Ca. Kao raspršujući agens dodaje se otprilike 1-2% TiH<sub>2</sub> koji se iznad temperature 465 °C rastvara na Ti i plinoviti H<sub>2</sub>.

H<sub>2</sub> stvara mjehuriće koji služe za stvaranje metalne pjene sa zatvorenim ćelijama ako je sušenje dovoljno sporo. Promjer dodanih čestica kreće se u rasponu 5-20 μm. Poslije hlađenja ispod temperature tališta stvorena je aluminijska metalna pjena koja se može dalje obrađivati. Cijeli proces traje otprilike 15 minuta i odvija se pod konstantnim tlakom. [1]

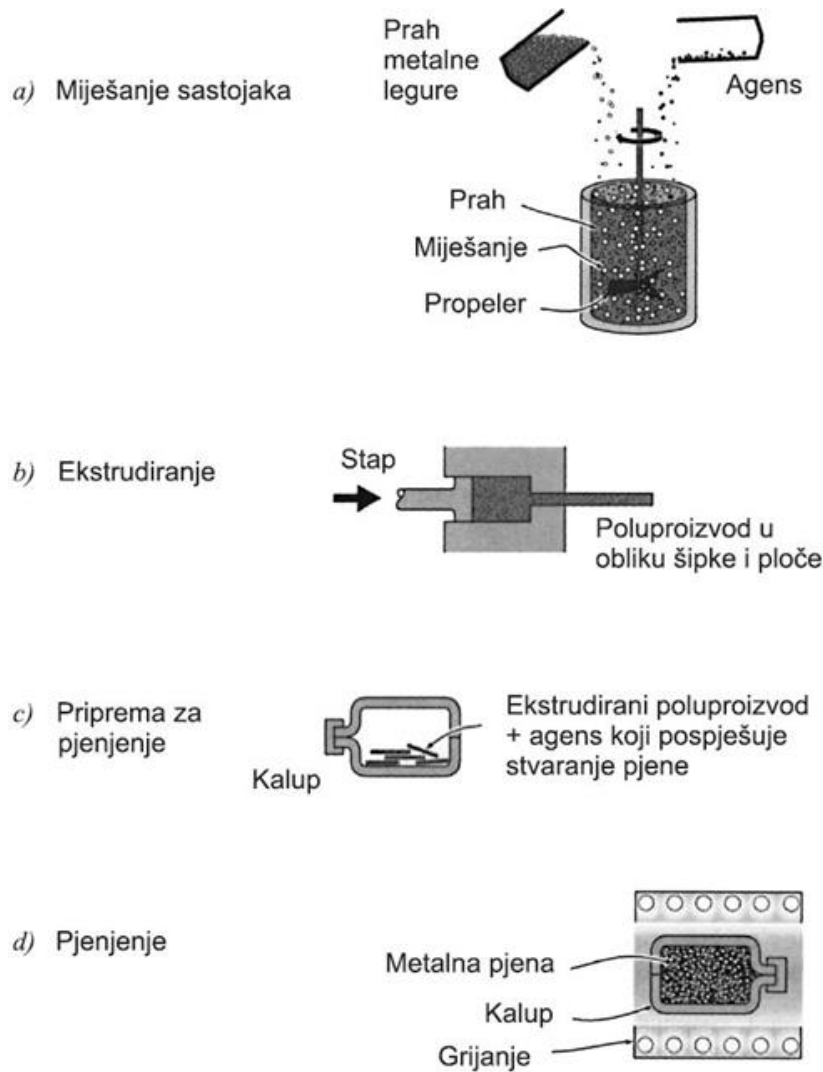


Slika 6. Proces nastajanja metalne pjene ALPORAS pjene [2]

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

Pjenasti materijali mogu se izrađivati i od metalnog praha. Na samom početku procesa miješa se prah čistog metala ili legure te agens koji pospješuje pjenjenje. Kao agens se najčešće rabi TiH<sub>2</sub>. 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<sub>2</sub> 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. [3]

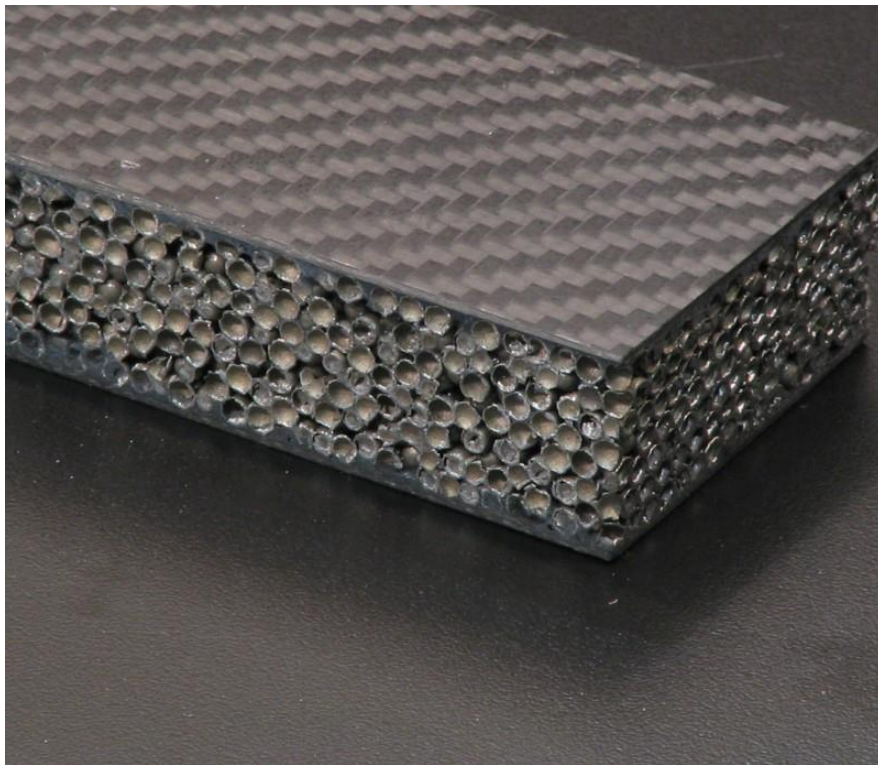


Slika 7. Proces nastajanja FOAMINAL-ALULIGHT metalne pjene [1]

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  $465^\circ C$  što je mnogo niže od tališta aluminija ( $660^\circ C$ ). 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) koje su ljepilom povezane 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. [3]

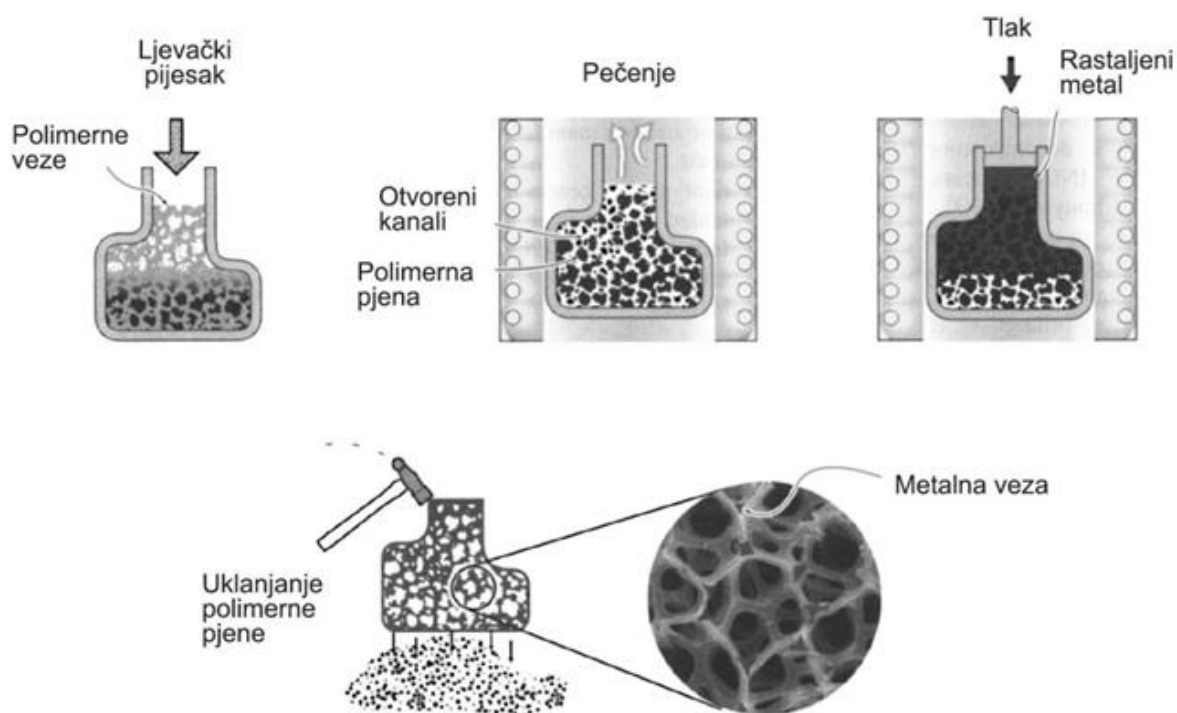


*Slika 8. Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [4]*

## 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 duodekaedra. Gustoća im iznosi od 3% do 50% gustoće čvrstih metala, dok im je gustoća ćelija 5, 10, 20 ili 40 pora/mm. Za izradu pjene se najčešće koriste aluminijske legure 6101 i A356. Za izradu kalupa mogu se koristiti aditivne tehnologije, te rabiti polimerne pjene s otvorenim ćelijama raznih veličina i oblika. [1]

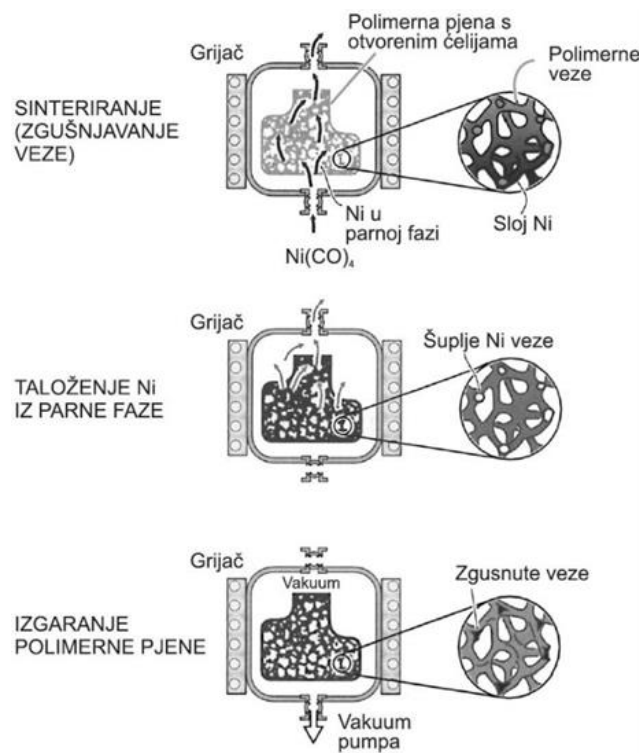
Prvo se odabire polimerna pjena odgovarajuće veličine ćelija i relativne gustoće koja se zatim premazuje s keramičkim prahom koji se suši i ugrađuje u lijevani pijesak. Kalup se peče da bi kalupni materijal očvrsnuo, a polimerna pjena isparila uz stvaranje negativ oblika pjene. Sljedeći postupak je punjenje kalupa rastaljenom metalnom legurom koja se zatim hladi. Ovim procesom izrađuju se metalne pjene na bazi svih vrsta metala koji se mogu precizno lijevati. Veličine šupljina metalnih pjena s otvorenim ćelijama iznose od 1 do 5 mm, dok im relativna gustoća iznosi više od 0,05. [1]



Slika 9. Proces nastajanja ERG DUOCEL metalne pjene [1]

## 2.5. Taloženje metala na ćelijaste praobljke

Polimerne pjene s otvorenim ćelijama također mogu poslužiti kao baza na koju se postupkom kemijskog taloženja iz parne faze (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  $100^\circ\text{C}$   $\text{Ni}(\text{CO})_4$  se raspada na čisti nikal (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. [1]

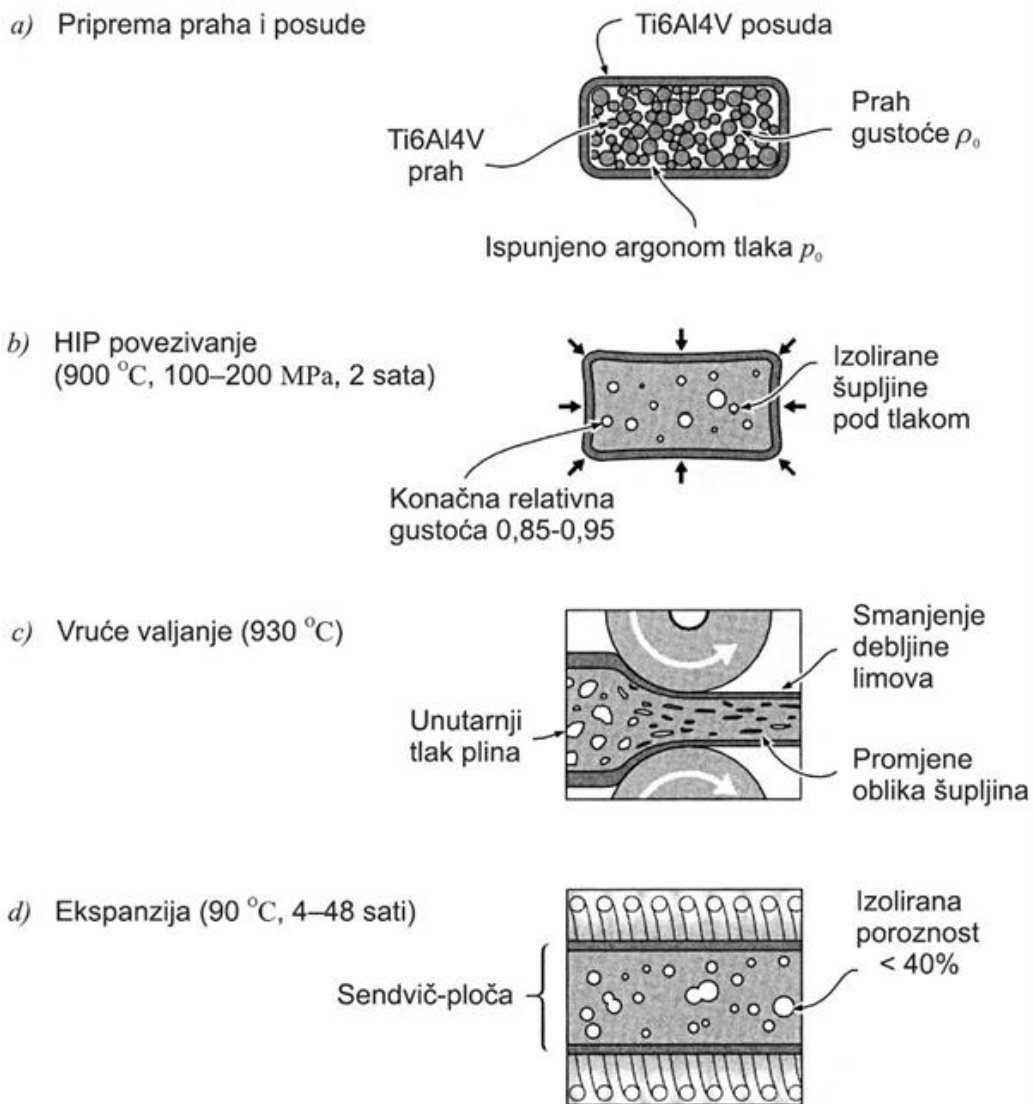


Slika 10. Proces nastajanja Ni metalne pjene (tzv. INCO pjena) [1]



## 2.6. Ekspanzija plina u taljevini

Postupci metalurgije praha koriste se za proizvodnju materijala koji u svojoj građi imaju male šupljine ispunjene internim plinom. Argon je najčešće korišten interni plin koji ima vrlo nisku topljivost u metalima. Do visokog tlaka uzrokovanog visokom temperaturom dolazi do širenja šupljina i puzanja materijala. Promjenom temperature i tlaka može se utjecati na svojstva i građu metalnih pjena. U prvom koraku procesa prah legure  $Ti_6Al_4V$  stavlja se u posudu napravljenu od istog materijala (slika 11).



Slika 11. Proces nastajanje metalne pjene procesom širenja internog plina [1]

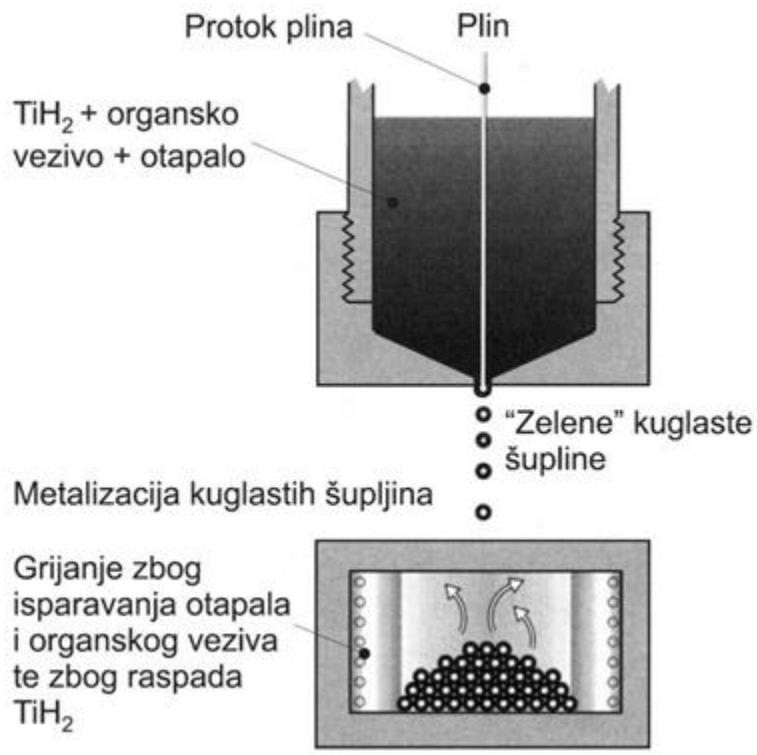
Iz posude je izvučen sav kisik jer bi on inače na sebe vezao titan, te je potom napunjena argonom pod tlakom od 0,3 do 0,5 MPa. Sadržaj posude potom se zgušnjava na relativnu gustoću 0,9 do 0,98 postupkom vrućeg izostatičkog prešanja. Sljedeći korak je valjanje titanove legure pri temperaturi od približno 900-940°C. Zbog tlaka valjanja šupljine u leguri postaju spljoštene i izdužene u smjeru valjanja. Sve to rezultira strukturom koja sadrži mnogo jednoličniju raspodjelu šupljina i stvaranje veza između plinom ispunjenih šupljina. Do širenja plina dolazi u posljednjoj fazi procesa pri temperaturi od 900°C uz trajanje i do 48 sati. Zbog visoke temperature tlak u ćelijama raste pa se one šire, što dovodi do smanjenja gustoće. [1]

Ovim postupkom uglavnom se izrađuju sendvič-konstrukcije na bazi Ti-legura koje imaju poroznost jezgre i do 50% i veličinu ćelija od 10 do 300 µm. Ovo je prva iskoristila tvrtka BOEING za izradu sendvič ploča s jezgrom niske gustoće. Ovaj postupak također je nešto skuplji zbog procesa vrućeg valjanja Ti legura. [1]

## 2.7. Građe s kuglastim šupljinama

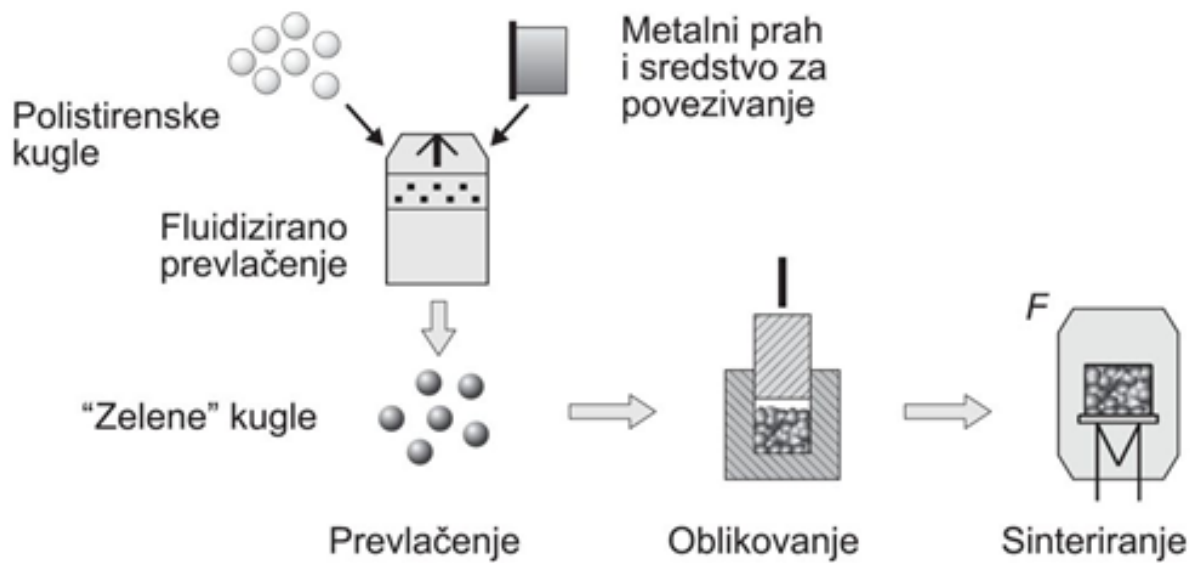
U zadnje vrijeme razvija se čitav niz procesa za proizvodnju metalnih ćelijastih materijala s kuglastim oblikom šupljina. Smatra se kako amortizacija internog plina s malim udjelom (1 do 5%) uzrokuje stvaranje legura s prethodno opisanom građom. Šupljine imaju relativno velik promjer, od 3 do 1 mm, te relativnu gustoću 0,1. Šupljine se prvo raspoređuju u materijalu raznim specijalnim postupcima, a zatim se zgušnjavaju vrućim izostatičkim prešanjem, postupkom sinteriranja u vakuumu ili postupkom sinteriranja s tekućom fazom. Zadnji navedeni postupak smatra se najprikladnijim za neke legure jer se kod njega izbjegavaju tlačne deformacije kuglastih čestica praha s tankim stijenkama, koje bi nastale vrućim izostatičkim prešanjem. Također nije potrebna naknadna visoko temperaturna obrada za učvršćivanje veza između čestica koja je nužna kod sinteriranja u vakuumu. Ovim postupkom danas se proizvodne metalne pjene od Ni superlegura i legure  $Ti_6Al_4V$  s relativnom gustoćom 0,06. [1]

Kuglasta građa tvori se pomoću dodataka kao što su  $TiH_2$  pomiješana s organskim dodacima koji pospješuju povezivanje s otapalom. Povišena temperatura uklanja otapalo i sredstvo za bolje povezivanje. Ovim postupkom može se proizvesti niz metalnih pjena, tako da se npr. od  $Fe_2O_3$  i  $Cr_2O_3$  može napraviti metalna pjena od nehrđajućeg čelika. [1]



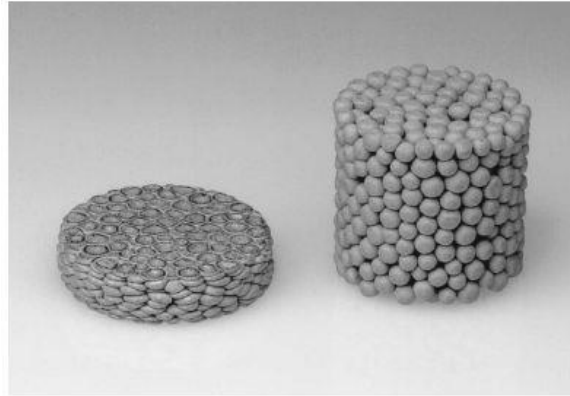
Slika 12. Proces nastajanja metalne pjena razvijen na Georgia Tech-u [1]

Treći postupak razvio je Fraunhoferov institut u Bremenu (IFAM) – slika 13. Kugle od polistirena prevučene su metalom i sinterirane kako bi se dobila metalna građa s kuglastim šupljinama visokog stupnja jednoličnosti. Sinteriranje i spajanje stijenki kugala se obavlja u jednom koraku što znatno smanjuje troškove proizvodnje. Kasnije spajanje šupljina dovodi do građe s otvorenim i zatvorenim ćelijama što se, kao i relativna gustoća, može mijenjati kombinacijom različitih parametara proizvodnje. Iznosi relativnih gustoća kreću se od 0,05 naviše, a veličina šupljina od 100  $\mu\text{m}$  do nekoliko milimetara. [1]



Slika 13. Proces nastajanja metalne pjene s kuglastim šupljinama IFAM postupkom [1]

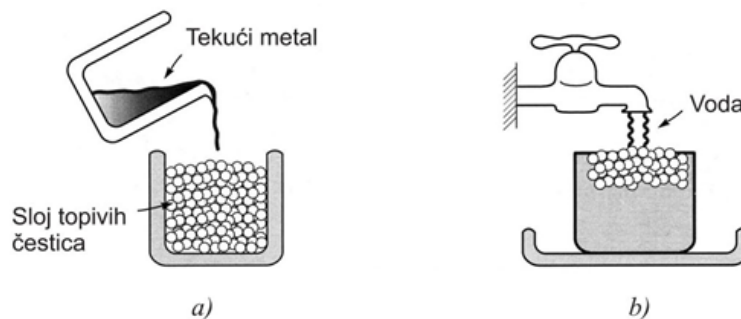
IFAM nastoji proizvesti pjenu i od nehrđajućeg čelika X2CrNiMo18-10 (AISI-316L). Proizvedena je pjena od te vrste čelika poroznosti 80 do 97 %. Slika 14. prikazuje oblik takve pjene. [1]



Slika 14. Metalna kuglasta pjena od nehrđajućeg čelika AISI 316 L [10]

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

Dva praha, od kojih niti jedan nije u manjem udjelu od 25%, miješaju se i stvaraju čvrstu tvorevinu koja je dvostruko povezana s obje faze. Nakon povezivanja jedan se prah (npr. sol) topi (rastvara) u odgovarajućem otapalu. Pjene bazirane na mješavini prahova aluminijskih legura s natrijevim kloridom uspješno se primjenjuju za velike presjeke s jednoličnom građom, a kao otapalo se najčešće koristi voda. [1]



Slika 15. Nastajanje metalne pjene povezivanjem dvaju materijala od kojih je jedan topljiv:  
a) rastaljeni metal (npr. aluminij i njegove legure) infiltrira se u sloj topljivih čestica;  
b) čestice se otapaju u prikladnom otapalu (npr. voda) čime nastaju otvorene ćelije [1]

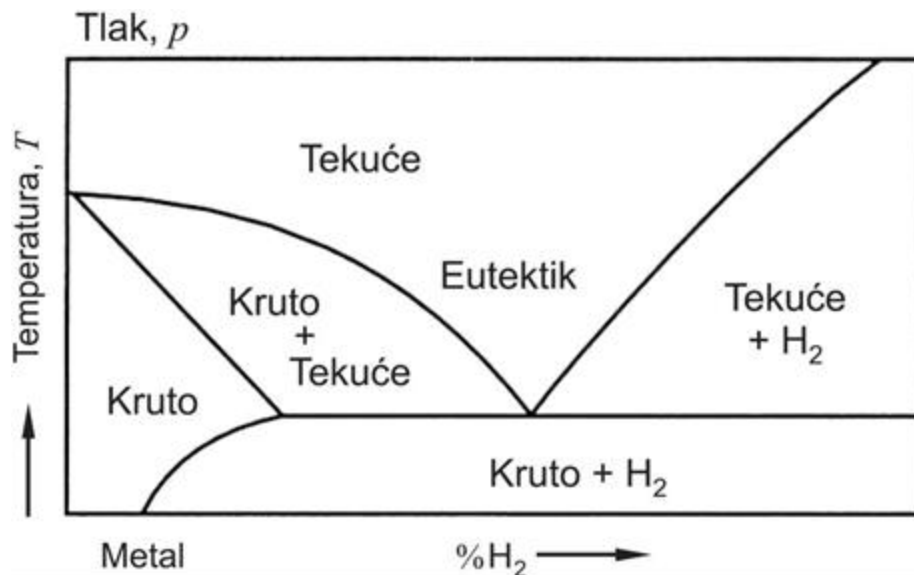
Veličina ćelija ovisi o promjeru čestica praša (od 10  $\mu\text{m}$  do 10 mm) s najčešće otvorenim oblikom, te relativnom gustoćom od 0,3 do 0,5.

Metalna taljevina se pod tlakom infiltrira u nakupinu čestica od topljivog materijala, te se hladi. Čestice se otapaju i ostaje metalna pjena uravnotežene građe ćelija.

## 2.9. Eutektičko skrućivanje plin-metal

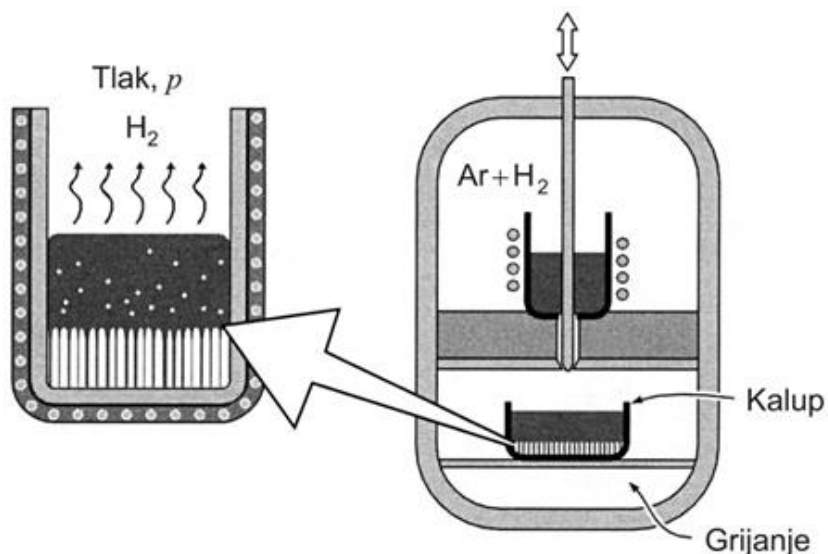
U ovom postupku neki metali i njihove legure tvore s vodikom eutektički sustav. Ti metali su: Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn i Ni te njihove legure. Legure se vrlo brzo brzim snižavanjem tlaka skrućuju, a pod visokim tlakom otapaju u vodikovoj atmosferi.

Rezultat je homogena taljevina ispunjena vodikom. Porozni materijal nastaje eutektičkom reakcijom plina i metala. Taljevina će doživjeti eutektičku pretvorbu u heterogeni dvofazni sustav plina i metala, ako se temperatura snizi. Na određenoj temperaturi događaju se reakcije segregacije i plinske šupljine ostaju zatvorene u metal. [3]

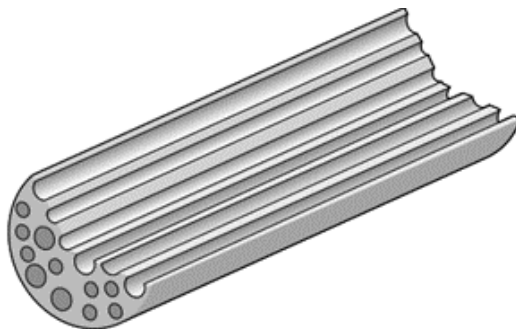


Slika 16. Binarni dijagram stanja metal-vodik [1]

Na slici 17. prikazan je proces nastajanja metalne pjene eutektičkim plinom (metal skrućivanjem). Peć smještena unutar tlačne posude koristi se za taljenje legura pod odgovarajućim tlakom vodika (od 0,5 do 5 MPa). Talina se izlije u kalup u kojem se događa eutektičko skrućivanje. Rezultat je velik sadržaj (do 30%) volumenskog udjela pora. Volumni udio i orijentacija ćelija utječu na kemijski sastav legure, tlak taline, zagrijavanje taline, temperaturu i brzinu tekućine za vrijeme skrućivanja. Materijali nastali ovim postupkom u literaturi se nazivaju "GASAR" ili "GASERIT". To je jedna od prvih proizvedenih metalnih pjena sa visokom poroznošću, no takve pjene se još komercijalno ne primjenjuju. [3]



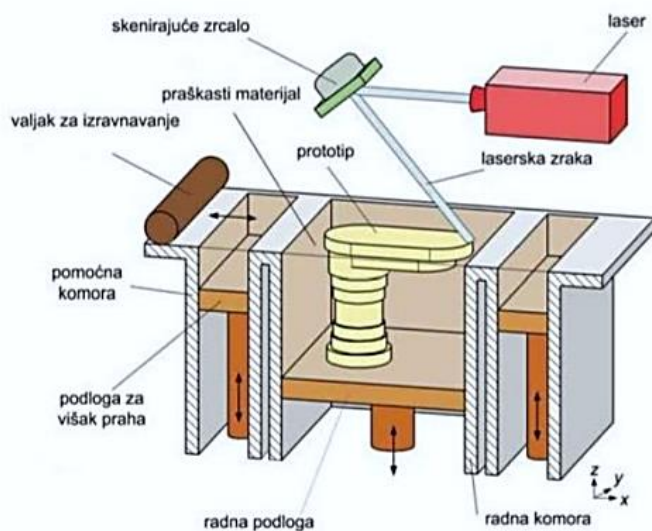
Slika 17. Proces nastajanje metalne pjene eutektičkim plinom-metal skrućivanjem [1]



Slika 18. Konačna struktura ćelija [3]

## 2.10. Selektivno lasersko srašćivanje

Selektivno lasersko srašćivanje jedno je od najvažnijih tehnologija aditivne proizvodnje i moguće je prerađivati gotovo sve materijale u praškastom obliku. Kod izrade metalnih proizvoda koriste se metalni prahovi s polimernim i metalnim vezivima te jednokomponentni prahovi za koje nije potrebno koristiti veziva. Prilikom korištenja materijala s vezivom, vezivo se odstranjuje kod naknadne obrade čime se dobivaju porozni proizvodi, a gustoća se povećava dodatnom naknadnom obradom. [17]



Slika 19. Princip rada postupka (selektivno lasersko srašćivanje) [18]

Radna komora ispunjena je inertnim plinom poput dušikovog plina kako bi se smanjio stupanj oksidacije i degradacije praškastog materijala. Prah je zagrijan i održavan na temperaturi koja je ispod granice taljenja i/ili staklastoj tranziciji temperature praškastog materijala. Infracrveni grijači smješteni su iznad radne komore kako bi održavali temperaturu u okruženju proizvoda te iznad samih pomoćnih komora gdje se nalazi višak praha.



Takvo predgrijavanje praha i održavanje visoke temperature potrebno je kako bi se minimizirala potrošnja energije samog lasera u procesu izrade i kako bi se smanjile deformacije proizvoda. Kada je prašak formirao zadovoljavajući sloj te je predgrijan, fokusirana CO<sub>2</sub> laserska zraka usmjerena je u materijal te se pomiče uz pomoć galvanometra te na taj način srašćuje samo one čestice materijala na koje je usmjerena. Ostatak praška ostaje u početnom stanju i služi kao podupor za idući sloj. Samim time nepotrebno je koristiti drugačiji model podupora. Pri završetku sloja, radna platforma spušta se za visinu idućeg sloja, idući sloj praška potom je niveliran i spreman za ponavljanje procesa u daljnjem dijelu izrade proizvoda, te nastavlja do završetka izrade proizvoda. Potreban je period hlađenja kako bi se dozvolilo pravilno formiranje dijelova te adaptacija na temperaturu ambijenta i atmosfere. Ukoliko se ne dozvoli period hlađenja može doći do degradacije, oksidacije i deformacija uslijed neravnomjerne i nagle promjene temperatura.

[19]

### 3. SVOJSTVA METALNIH PJENA

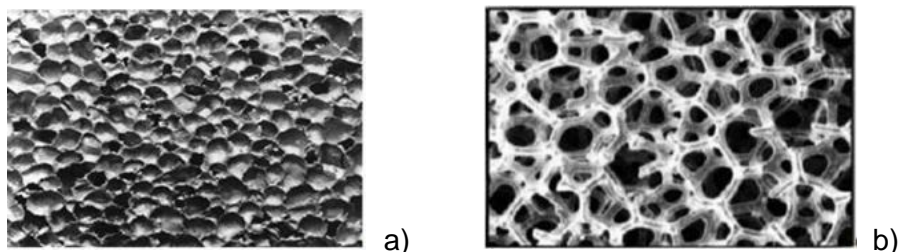
Kod odabira materijala za neki proizvod neophodni su podaci o svojstvima materijala koji utječu na građu (strukturu), kemijski sastav te način izrade i obrade. Prilikom ispitivanja vrlo su bitne dimenzije i način pripreme uzorka. Postupci ispitivanja metalnih pjena još se razvijaju, a zbog svoje nepredvidive građe rezultati ispitivanja često variraju. Stoga se ispitivanja provode sa strožim režimima kako bi rezultat ispitivanja bio precizniji.

#### 3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena

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

Glavna prednost metalnih pjena u primjeni je njihova mala masa što omogućuje izradu lakih konstrukcija. S obzirom da kod metalnih pjena veliku ulogu ima stupanj nepravilnosti i nehomogenost građe pjene poželjno je što točnije odrediti tlačnu i vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i modul smičnosti, dinamičku izdržljivost, tvrdoću te otpornost na umor ili puzanje.

Metalne pjene imaju širok raspon svojstava tako da im je i veliko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja. Kada se usporede pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama, vidljivo je da su im mehanička svojstva uglavnom na jednakoj razini, no otvorene ćelije imaju ipak nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće. [1]



Slika 20. a) zatvorena ćelija metalne pjene

b) otvorena ćelija metalne pjene [6]

SVOJSTVO	SIMBOL	JEDINICA	MATERIJAL				
			CYMAT AL-SIC	ALULIGHT AL	ALPORAS AL	ERG AL	INCO NI
Relativna gustoća	$\rho/\rho_s$		0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Građa			Zatvorene ćelije			Otvorene ćelije	
Gustoća	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	0,07-0,56	0,3-1,0	0,2-0,25	0,16-0,25	0,26-0,37
Modul elastičnosti	E	GPa	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti	G	GPa	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti	$E_f$	GPa	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor	$\nu$		0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Tlačna čvrstoća	$R_{mt}$	MPa	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Granica razvlačenja	$R_e$	MPa	0,04-7,0	2,0-20	1,6-1,8	0,9-2,7	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća	$R_m$	MPa	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Dinamička izdržljivost	$R_d$	MPa	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zgušnjavanju	$\varepsilon_D$	%	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost	$\varepsilon_f$		0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka	$\eta^c$	%	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
Tvrdoća	H		0,05-10	2,4-35	2,0-22	2,0-3,5	0,6-1,0
Lomna žilavost	$K_{IC}$	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0

Tablica 1. Mehanička svojstva metalnih pjena [1]

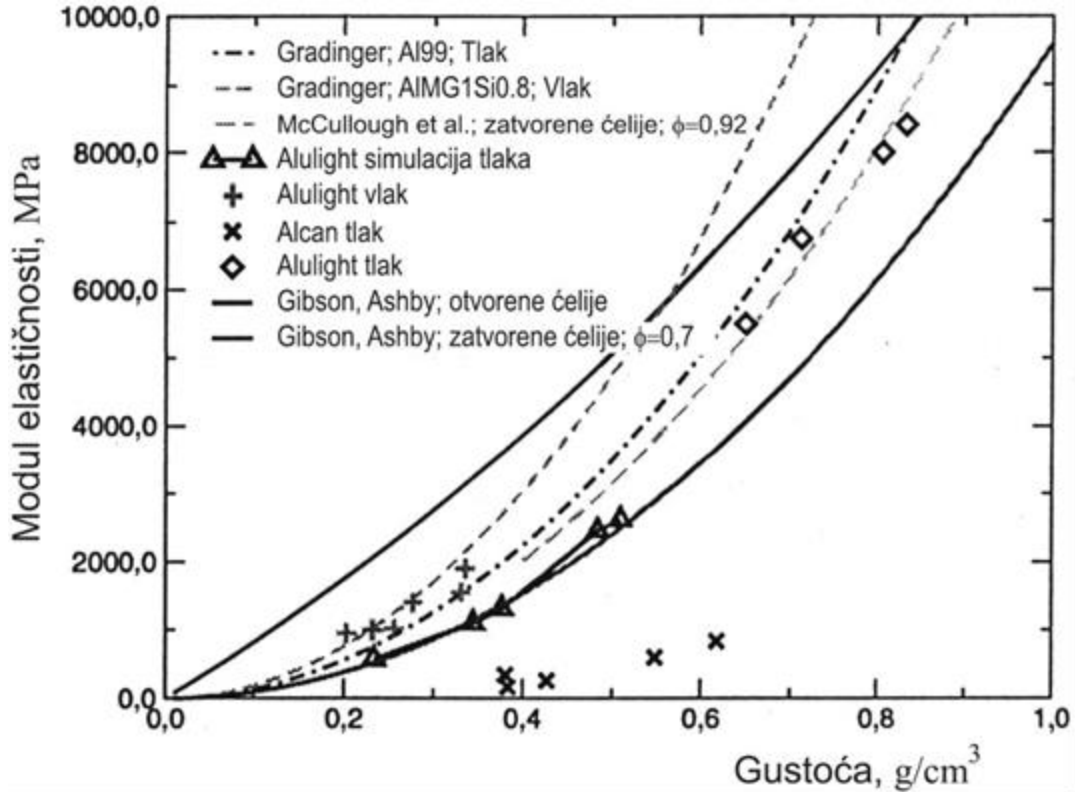
Mehaničko svojstvo	Otvorene ćelije	Zatvorene ćelije
Modul elastičnosti, (GPa), E	$E=(0,1-4) \cdot E_s \cdot (\rho/\rho_s)^2$	$E=(0,1-1) \cdot E_s \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^2+0,3(\rho/\rho_s))$
Modul smičnosti, (GPa), G		$G \approx (3/8) \cdot E$
Modul volumena, (GPa), K		$K \approx 1,1 E$
Modul savitljivosti, (GPa), $E_f$		$E_f \approx E$
Poissonov omjer		0,32-0,34
Tlačna čvrstoća, (MPa), $R_{mt}$	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{mts} \cdot (\rho/\rho_s)^{3/2}$	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{mts} \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^{2/3}+0,3(\rho/\rho_s))$
Vlačna čvrstoća, (MPa), $R_m$		$R_m \approx (1,1-1,4) \cdot R_{mt}$
Dinamička izdržljivost, (MPa), $R_d$		$R_d \approx (0,5-0,75) \cdot R_{mt}$
Deformacija pri zgušćivanju, $\varepsilon_D$		$\varepsilon_D = (0,9-1) \cdot (1-1,4\rho/\rho_s+0,4(\rho/\rho_s)^3)$
Koeficijent gubitaka, $\eta$		$\eta \approx (0,95-1,05) \cdot \eta_s / (\rho/\rho_s)$
Tvrdoća, H		$H = R_{mt} (1+2\rho/\rho_s)$

Tablica 2. Izrazi za proračun svojstava metalnih pjena [9]

### 3.1.1. Krutost

Krutost i čvrstoća ćelijastih (poroznih) materijala ovise o njihovoj gustoći. Teorijske pretpostavke, koje su postavili Gibson i Ashby o mehaničkim svojstvima ćelijastih materijala, zasnivaju se na vezi između morfologije ćelija i svojstava stijenki ćelija. Kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama takve pretpostavke odgovaraju podacima utvrđenim ispitivanjem, dok kod pjena sa zatvorenim ćelijama to nije slučaj. [1]

Pri vlačnom i tlačnom opterećenju kod aluminijske pjene uočava se različit modul elastičnosti. Vrijednosti modula elastičnosti početne krutosti ispitivanog uzorka iznosi 20% , a dobiva se na osnovi krivulja opterećivanje/rasterećivanje uzorka nakon dosezanja granice stlačivanja ( $R_{et}$ ).



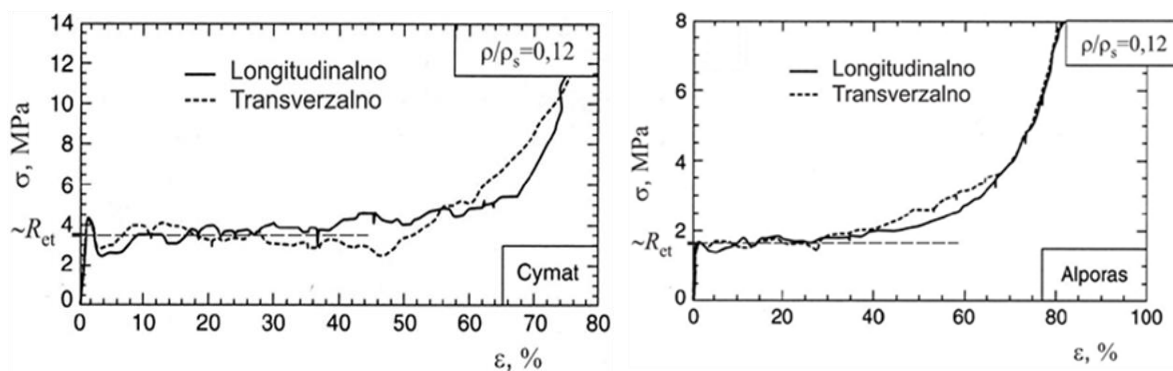
Slika 21. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena [1]

Iz prethodne slike 21. vidljivo je kako krutost materijala ovisi o njegovoj gustoći. Rezultati ispitivanja Al pjena sa zatvorenim ćelijama manji su od očekivanih teorijskih proračuna. Pjene sa zatvorenim ćelijama niske gustoće pokazuju niže vrijednosti krutosti od očekivanih zbog mikrostrukture materijala. Krutost aluminijskih pjena raste s povećanjem pravilnosti mezostrukture, a snižava se zbog nepravilnosti kao što su zavojite stijenke ćelija i nehomogenost (nejednolika veličina čvorova i velike napukline). Aluminijske pjene proizvedene postupcima metalurgije praha potvrđuju malen stupanj anizotropije.

### 3.1.2. Tlačna čvrstoća

Početo opterećenje izaziva elastičnu deformaciju. Polazna linija je manjeg nagiba od nagiba koji odgovara stvarnom modulu elastičnosti i nije pravac. Neke ćelije počinju teći pri vrlo malim opterećenjima. Modul elastičnosti kod vlačnog opterećenja je za oko 10% viši od modula kod tlačnog opterećenja. Anizotropija oblika ćelija pokazuje razliku (30%) između elastičnosti u različitim smjerovima.

Pjene s otvorenim ćelijama imaju vrlo dobro definiranu granicu stlačivanja ( $R_{et}$ ) i pri tom naprezanju ćelije počinju teći uslijed savijanja, dok zatvorene ćelije pokazuju složenije ponašanje. Konačna deformacija zgušnjavanja ( $\varepsilon_D$ ) posljedica je naprezanja veličine granice stlačivanja koja izaziva zgušnjavanje pjene.



Slika 22. Tipični dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje realnih Al pjena [1]

Jednadžbe (1) i (2) prikazuju empirijske veze između granica stlačivanja, deformacije zgušnjavanja i relativne gustoće:

$$R_{et} = (0,25 - 0,35) \cdot R_e \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^m \quad (1)$$

$$\varepsilon_D \approx \left( 1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (2)$$

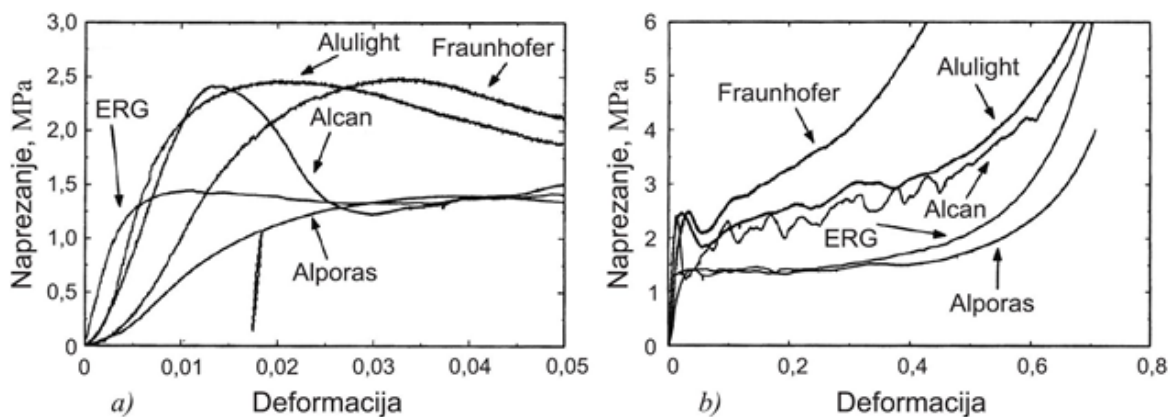
$R_e$  – granica tečenja metalne pjene

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

$\alpha_1$  – koeficijent koji iznosi od 1,4 do 2,0

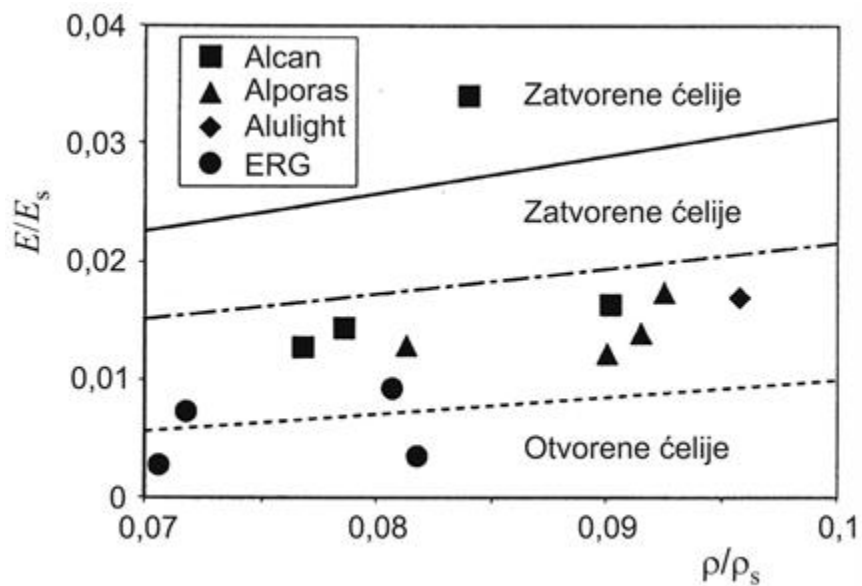
S obzirom da su aluminijske ili nikal pjene uglavnom prisutne u primjeni ispitivanja se provode na njima. Od aluminijskih pjena proučavaju se: CYMAT, ALPORAS, ERG Duocel, ALULIGHT i IFAM. Da bi se izbjegao utjecaj veličine uzorka na rezultate ispitivanja omjer veličine uzorka i veličine ćelije mora biti veći od 7, a omjer visine i debljine uzorka mora biti veći od 1,5. Vrlo je važan način na koji se rezanjem dobiva manji uzorak od većeg komada materijala. To su: rezanje tračnom pilom nakon kojeg slijedi obrada površine, rezanje dijamantnom oštricom i odvajanje elektroerozijskom obradom.

Ispitivanja se provode na kockastim uzorcima duljine brida 25, 40, 45 ili 50. Ovisno o vrsti metalnih pjena uzorci su opterećeni okomito ili paralelno na os izduženja ćelija. Uzorak se opterećuje silom od 50 kN između dvije ploče. Deformacija uzorka mjeri se ekstenzimetrima i na temelju njih se izračunava Poissonov faktor. Brzina iznosi od 0,01 mm/s do 0,05 mm/s.



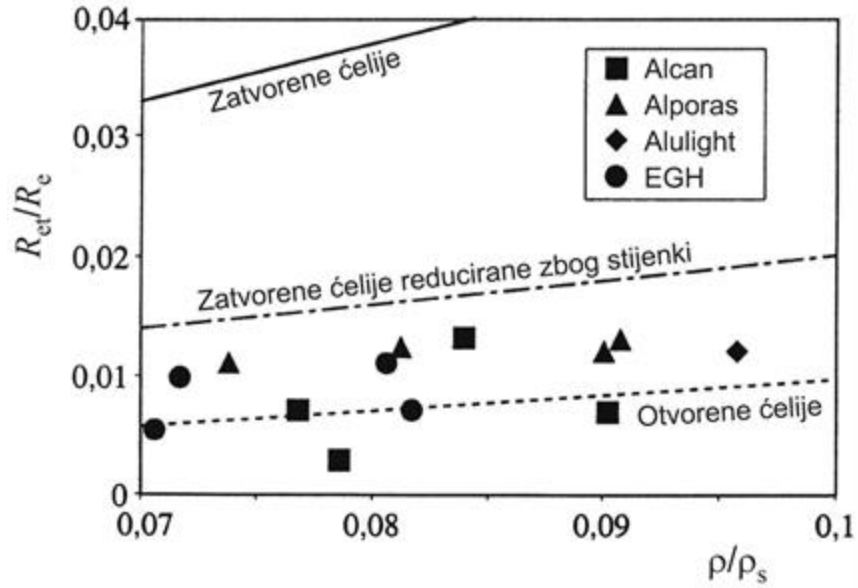
Slika 23. Krivulje “naprežanje-deformacija” pod tlačnim opterećenjem aluminijskih pjena;  
 a) do deformacije od 5 %    b) pri većim deformacijama [1]

Vrlo je zanimljiva ovisnost relativne gustoće o modulu elastičnosti ili o omjeru granica stalčivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granica tečenja materijala ( $R_e$ ), kao što je prikazano na slikama 24. i 25.



Slika 24. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći [1]





Slika 25. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja materijala ćelija ( $R_c$ ) [1]

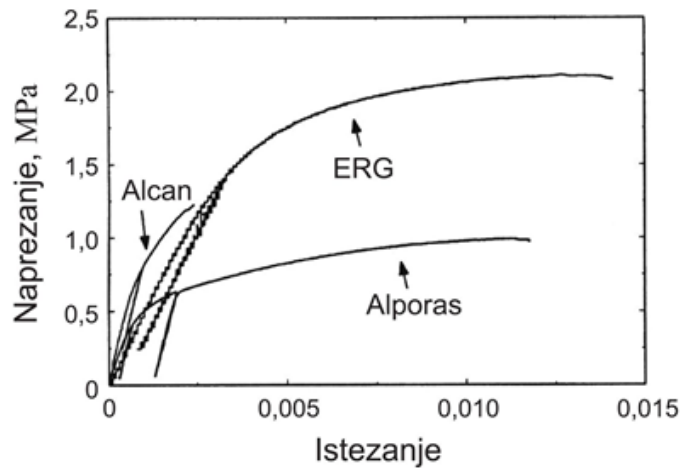
### 3.1.3. Vlačna čvrstoća

Ispitivanja vlačnim opterećenjem provode se na cilindričnim uzorcima ili na uzorcima u obliku kosti. Normom ASTM E8-96a potpisani su obrada i odvajanje uzoraka.

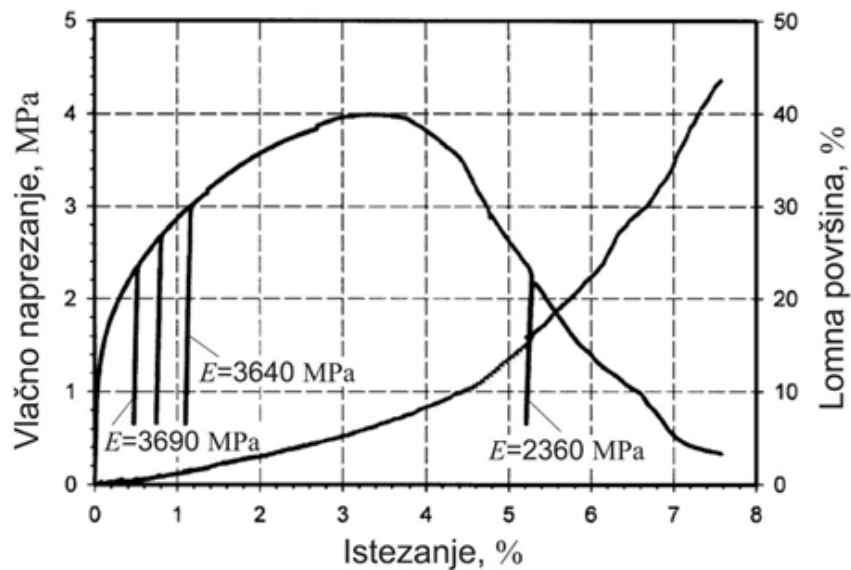


Slika 26. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti [6]

Za dimenzije uzorka uzimaju se promjer kod cilindričnog i debljina kod uzorka u obliku kosti. Omjer dimenzija i veličine ćelija mora biti veći od 7. Ekstenzimetrom koji je pričvršćen na dio uzorka gdje dolazi do lomova mjeri se istežanje. Opterećenje je zadano u okomitom i paralelnom smjeru na duljinu os ćelija, brzinom opterećenja 0,01 mm/s. Modul elastičnosti može se izračunati iz nagiba krivulje "naprežanje-istežanje", dok se Poissonov faktor računa pomoću izmjerenih vrijednosti istežanja. Rezultati vlačnog ispitivanja za Al pjene vidljivi su na slici 27.



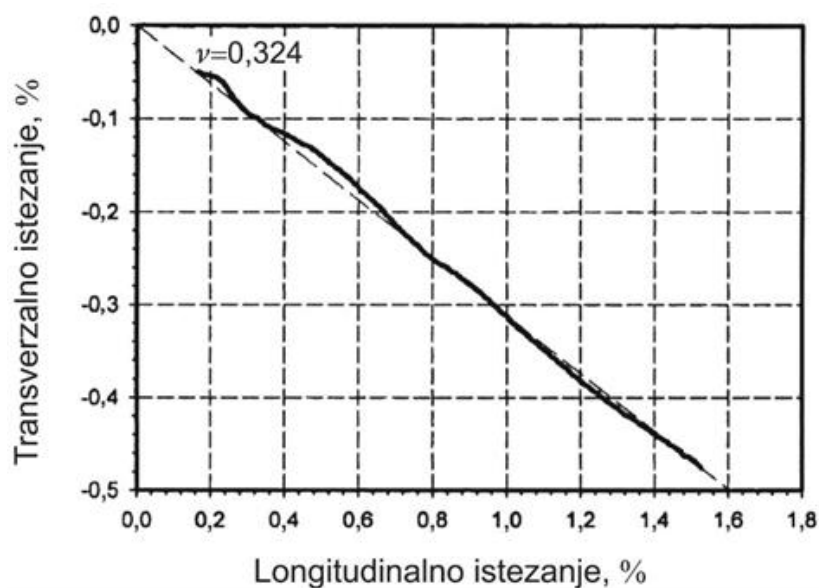
Slika 27. Dijagram naprežanja-istežanje Al pjena [1]



Slika 28. Krivulja naprežanje-istežanje s udjelom lomne površine ALPORAS pjene (uzorci bez ureza) [1]

Aluminijske pjene ponašaju se kao žilavi materijal. To vidimo iz krivulja koje pokazuju ponašanje uzoraka bez ureza na slici 28. Linearno-elastični dio krivulje vrlo je malen nakon kojeg slijedi veći dio u području plastičnosti. Rezultat je nehomogena raspodjela deformacija koja uzrokuje vrlo 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.

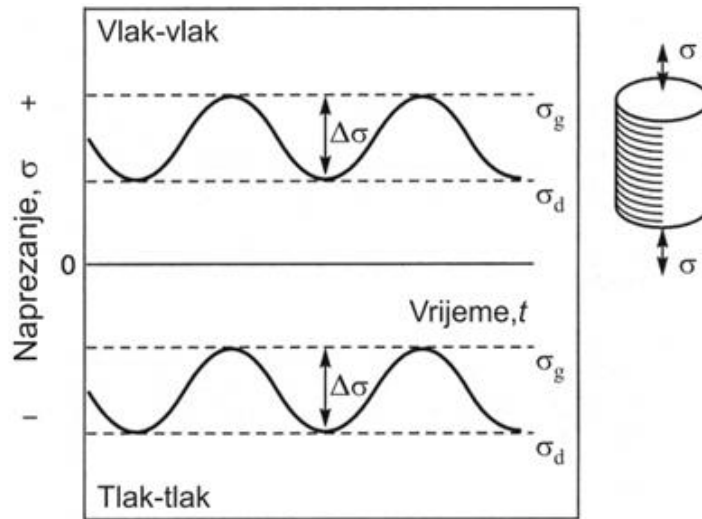
Poissonov faktor se može izračunati iz izmjerenih istezanja prikazanih na slici 29. Prosječni Poissonov faktor u uvjetima vlačnog opterećenja iznosi 0,35.



Slika 29. Odnos transverzalnog i longitudinalnog istezanja [1]

### 3.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju-umor

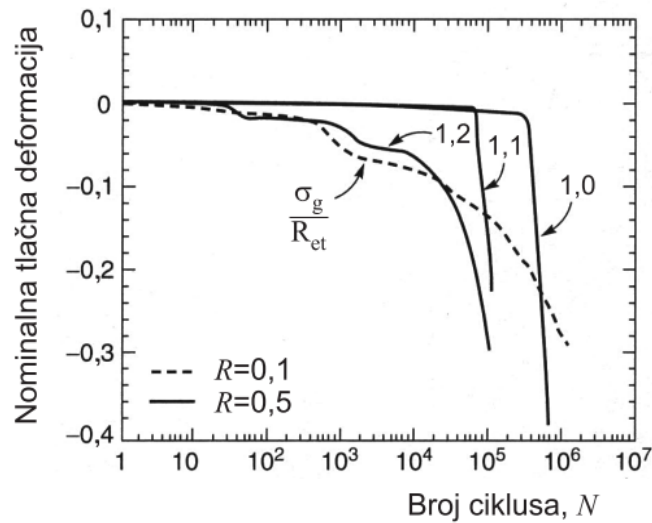
Uzrok umoru materijala veliki je broj ciklusa opterećenja koje se neprestano ponavlja. Nakon nekog vremena izloženosti dolazi do stvaranja inicijalne napukline, širenja napuklina u materijalu i konačno do loma. Dinamička izdržljivost pokazuje otpornost materijala na umor. Umoru su izložene i metalne pjene. Ciklička opterećenja mogu biti tlačnog i vlačnog karaktera i oba načina variraju od minimalne  $\sigma_d$  do maksimalne  $\sigma_g$  vrijednosti. Na slici 30. prikazan je uzorak u cilindričnom obliku. [1]



Slika 30. Vrste dinamičkih opterećenja [1]

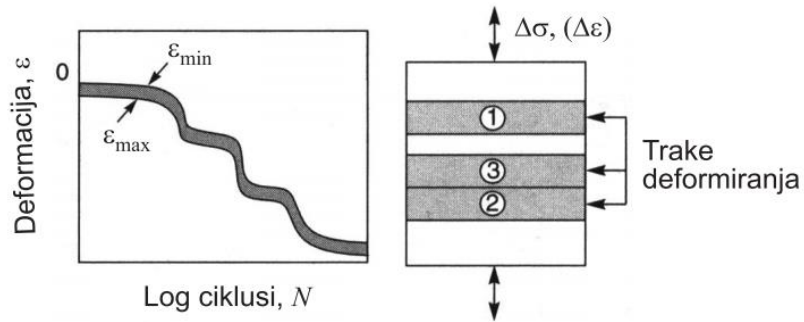
Poznata su tri tipa ponašanja metalnih pjena:

1. U materijalu se akumuliraju deformacije, ali nisu vidljivi znaci širenja lomnog područja. Na slici 31. prikazana je ovisnost deformacije izazvana tlačnim opterećenjima o broju ciklusa ponavljanja.



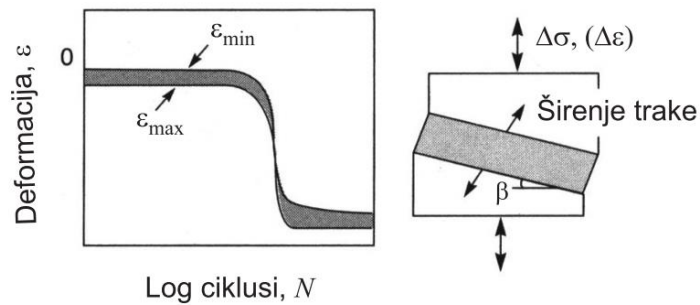
Slika 31. Skraćenje Duocel Al-6101-T6 pjene u uvjetima umora izazvanog tlačnim opterećenjima [1]

2. Lomna područja stvaraju se na nepredvidivim unutarnjim stranama materijala. Napukline prvo nastaju na najslabijem dijelu, a trajanjem opterećenja lomna područja se razvijaju po cijelom materijalu. Ovaj tip ponašanja prikazuje slika 32.



Slika 32. Tip 2 ponašanje metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [1]

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



Slika 33. Tip 3 ponašanje metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [1]

### Osjetljivost na ureze

Vrlo je važno utvrditi kako se metalne pjene ponašaju u slučajevima postojanja ureza ili provrta kako bi se potpuno mogla definirati njihova konstrukcijska primjena. Ako je opterećenje statički tlačno, pjene nisu osjetljive na ureze ili provrte. Jednadžbom (3) se to može izračunati:

$$\sigma = R_{mt} \cdot \left(1 - \left(\frac{D}{W}\right)\right) \quad (3)$$

gdje je:  $\sigma$ -nominalno naprezanje

$R_{mt}$ -tlačna čvrstoća

$W$ -širina ispitivane ploče

$D$ -promjer provrta [1]

### 3.1.5. Ponašanje pri puzanju

Pri visokim temperatura dolazi do sniženja granica razvlačenja, modula elastičnosti i dinamičke izdržljivosti te do povišenja istežljivosti, žilavosti i puzanja materijala. Puzanje materijala se pojavljuje na temperaturama višim od 1/3 tališta promatranog materijala koji je izložen opterećenju. Puzanje pjena oblikovano je saznanjima o izobličenju i istezanju stijenki ćelija zbog puzanja. Jednadžba (4) opisuje puzanje metalnih pjena:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0^* \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (4)$$

gdje je:  $\varepsilon^*$ -brzina puzanja u drugom stadiju

$\sigma$ -primijenjeno naprezanje

$\varepsilon_0^*$ -početna brzina puzanja [1]

$n$ -eksponent puzanja

$\sigma_0$ -referentno naprezanje svojstava materijala

### 3.1.6. Apsorpcija energije udara

Gibson i Ashby pretpostavili su da do plastičnog kolapsa ćelija dolazi kada moment izazvan tlačnim opterećenjem prekorači moment plastičnosti čvorova ćelija. Odnos između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće prikazan je jednačinom (5):

$$\frac{R_{et}}{R_e} = C \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2} \quad (5)$$

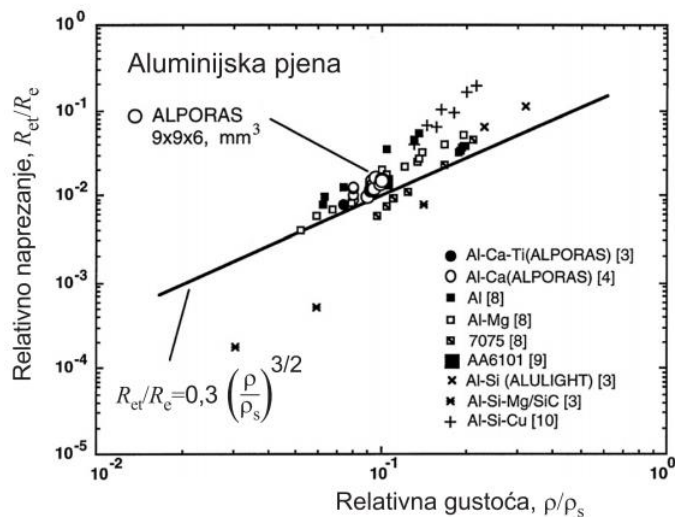
gdje je:  $R_{et}$ -granica stlačivanja pjene

$\rho$ -gustoća pjene

$\rho_s$ -gustoća materijala stijenki ćelija [1]

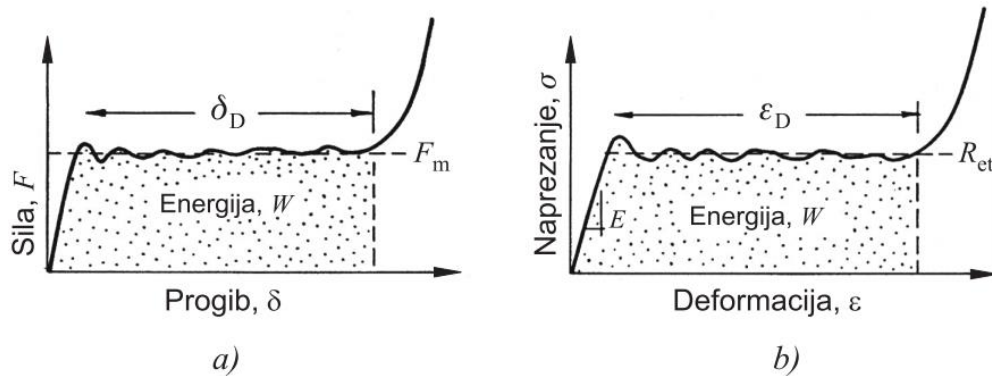
$R_e$ -granica tečenja materijala ćelije

C-konstanta



Slika 34. Omjer između relativnog naprezanja tečenja i relativne gustoće [1]

Apsorpcija energije udara važna je kod izbora materijala za izradu elemenata koji mogu biti izloženi udarnim opterećenjima. Bitno je da granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) bude manja od naprezanja pri kojem dolazi do loma materijala (dostizanja kritične deformacije zgušnjavanja- $\varepsilon_D$ ).



Slika 35. Krivulje koje prikazuju apsorpciju energije pri savijanju (a) i tlaku (b) [1]

### 3.1.7. Sendvič-konstrukcije

Metalne pjene su novi materijal koji je idealan za sendvič-konstrukcije. Jezgre metalnih pjena posebno su važne kada se od konstrukcije zahtijeva višestruka funkcionalnost tako da se one, osim kao konstrukcijski dio, mogu koristiti kao ležište sustava cijevi za grijanje ili hlađenje, kao zvučna izolacija itd. Jezgra na sebe prima sva opterećenja kao i vanjske površine zato što je ona konstrukcijski dio sendvič-ploče. Nužno je ispitati čitav niz mehaničkih svojstava kako bi se moglo predvidjeti ponašanje sendvič-konstrukcija u eksploataciji. [1]

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. [11]





*Slika 36. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od metalne pjene [11]*

### 3.2. Toplinska svojstva metalnih pjena

Osim male mase potrebno je postići i toplinsko-izolacijska svojstva kako bi se pjene primjenjivale u eksploatacijskim uvjetima gdje su zastupljene povišene ili snižene temperature. Metalne pjene u ovom području primjene su konkurentne konvencionalnim materijalima.

Toplinska vodljivost ( $\lambda$ ) najbolje pokazuje izolacijske sposobnosti materijala. Vrijednost  $\lambda$  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 do 100 puta manja od toplinske vodljivosti čistog aluminijskog. S dovoljnom točnošću može se izračunati minimalna i maksimalna vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti.

Za prijenos topline kombiniraju se provođenje i zračenje. Potrebno je odrediti koeficijent prijelaza topline ( $\alpha_c$ ) i težiti da on bude što veći. Na prijelaz topline utječu: oblik ćelija, relativna gustoća, koeficijent toplinske vodljivosti itd. Vrijednost koeficijenta prijelaza topline nije potpuno precizna jer su prisutne varijacije vrijednosti veličina koje su korištene za njegovo izračunavanje.

Talište aluminija je na oko 600°C, a aluminijske pjene otporne su na temperature i do 780°C na kojim dolazi do deformacije samo ako su izložene većim mehaničkim opterećenjem. Za otpornost na visoku temperaturu zaslužan je sloj Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

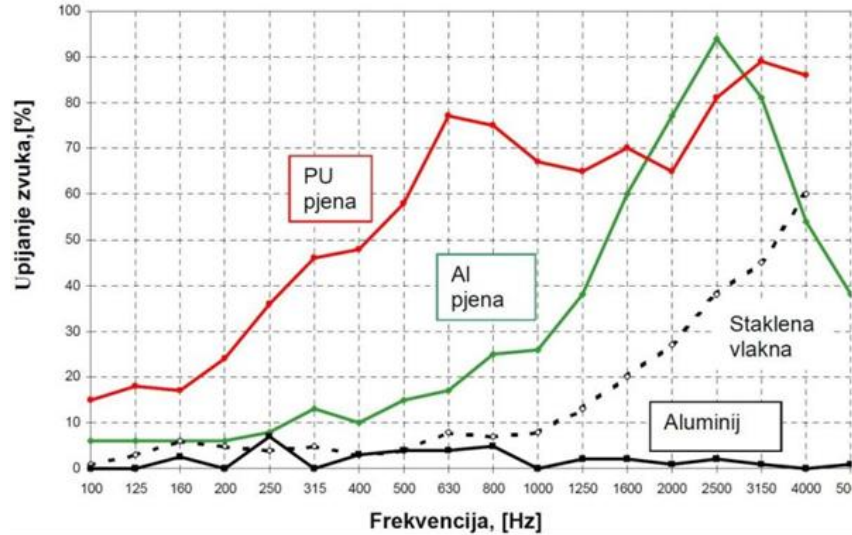
### 3.3. Zvučna svojstva metalnih pjena

Metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije što dolazi od dobrih zvučnih svojstava. Zbog vibriranja materijala nastaje zvuk. Brzina širenja vala u čeliku i aluminiji iznosi oko 5000 m/s, a 343 m/s kroz zrak. Dobro upijanje zvuka znači da je zvučni val upijen u materijal (nije reflektiran i ne prenosi se kroz materijal). Mehanizmi za upijanje zvuka su: viskozni gubici koji se događaju kada tlačni val pumpa zrak iz šupljine i u šupljinu, toplinsko-elastično prigušivanje, Helmholtzovi rezonatori.

Zvučna svojstva određuju se pomoću koeficijenta upijanja zvuka  $\alpha$  koji pokazuje koliki udio zvučne energije materijal upija. Za metalne pjene  $\alpha$  se kreće od 0,8 do 0,95 (upija se od 80% do 95% energije). Bušenjem provrta promjera od 1-2 mm u metalnoj pjeni može se poboljšati upijanje zvuka, a na tankim uzorcima od 5 mm i 9 mm dokazano je da bušenje provrta nije učinkovito.

Prednosti ALPORAS pjena kod upijanja buke:

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora stabilizirati s metalnom armaturom, što nije slučaj kod ALPORAS pjene
- vlakna staklene vune mogu biti uništena pod utjecajem vibracija i vjetra
- staklena vuna puno brže upija vlagu što nije dobro
- ALPORAS pjena puno se lakše montira zbog svoje male mase



Slika 37. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al [11]

### 3.4. Prigušivanje vibracija metalnih pjena

Prigušivanje je vrlo važno svojstvo dijelova konstrukcija koji su tijekom eksploatacije izloženi vibracijama (npr. dijelovi strojeva za preciznu obradu). Konstrukcijsko prigušivanje temelji se na pretvorbi vibracijske energije u toplinu unutrašnjim trenjem. Princip ispitivanja je takav da se materijal izloži vibracijama te se proučava ponašanje u rezonanciji nakon prestanka rada izvora vibracije. Kao i kod drugih ispitivanja i ovdje je problem nehomogena struktura uzoraka. Na rezultate utječe stupanj poroznosti, veličina i oblik ćelija, način obrade uzorka, itd.

Procesi prigušivanja u materijalu najbolje su karakterizirani bezdimenzijskim koeficijentom gubitka,  $\eta$ . Jednadžba (6) prikazuje gubitak energije po radjanu podijeljen s maksimalnom elastičnom deformacijskom energijom:

$$\eta = \frac{\Delta U}{2 \pi U} \quad (6)$$

Faktor gubitka  $\eta$  najviše ovisi o frekvenciji cikličkog ponavljanja opterećenja, temperaturi, amplitudi opterećenja i deformaciji kojoj je materijal izložen.

Jedan red veličine više vrijednosti faktora gubitka od faktora gubitka materijala pune gustoće od kojih su napravljeni pokazuju ćelijasti materijali. Rezultat trenja između površina ćelija i nastajanje mikro pukotina je rasipanje vibracija. Prigušivanje se može povećati smanjenjem debljine stijenki ćelija, uvođenjem strukturnih nepravilnosti (dodavanjem netopljivih keramičkih čestica-SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ili grafitom). Faktor gubitaka tipičnih ćelijastih metala je premalen za razliku od standardnih materijala za prigušivanje vibracija ( $\eta$  se kreće od 0,001 do 0,1).

### 3.5. Spajanje metalnih pjena

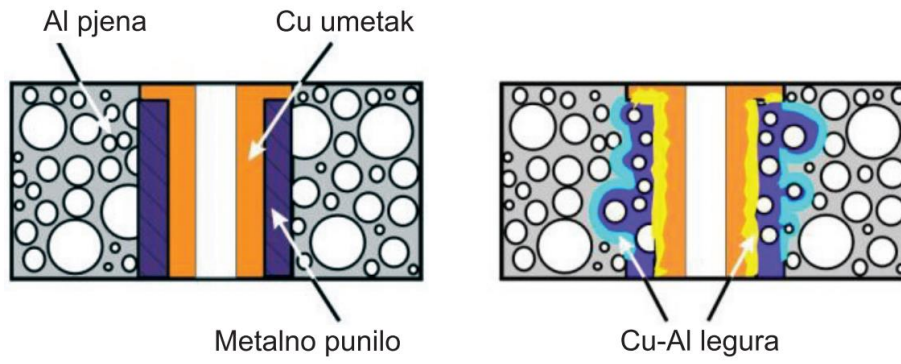
Svojstva spoja moraju biti jednaka ili bolja od svojstava osnovnih materijala koji se spajaju. Porozna struktura otežava spajanje metalnih pjena. Tri načina spajanja: spajanje ljepilima, stvaranje rastavljivih spojeva, spajanje zavarivanjem.

#### 3.5.1. Spajanje ljepilima

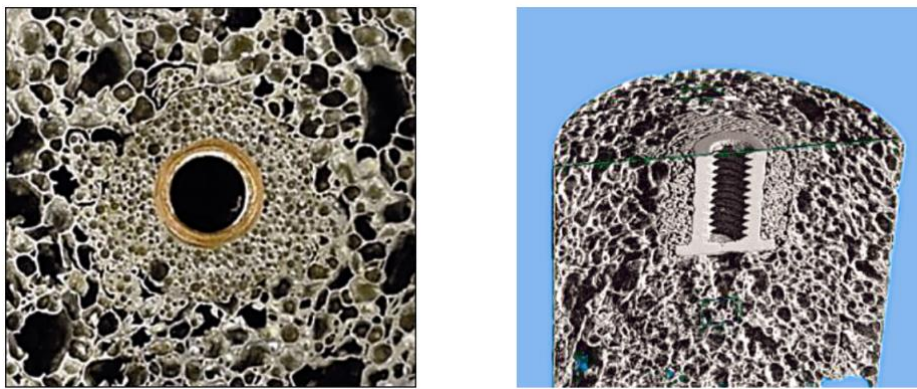
Epoksidne smole najčešće se rabe kao ljepilo. Ljepila imaju jednaka ili bolja svojstva od osnovnog materijala. Problemi koji se mogu pojaviti su: smanjenje toplinske stabilnosti i koeficijenta širenja topline i povećanje toplinske ili električne izolacije. Ovaj način spajanja najčešće se upotrebljava kod stvaranja sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene.

#### 3.5.2. Stvaranje rastavljivih spojeva

Pomoću drvenih vijaka ili metalnih umetaka u koje je urezan navoj ostvaruju se rastavljivi spojevi. Ako se koristi umetak (najčešće od bakra) potrebno je postići dobro spajanje s metalnom pjenom. To se može postići upotrebom ljepila, umetanjem spojnica tijekom proizvodnog procesa ili korištenjem punila. Umetanjem spojnica tijekom proizvodnog procesa ne osiguravaju se željena svojstva spoja (rjetko se koristi). Kao punilo se koristi materijal koji se može upjeniti i ima niže talište od metalne pjene u koju se stavlja umetak. Kada se punilo uloži cijeli sklop treba zagrijati. Prilikom zagrijavanja dolazi do upjenjavanja punila koje povezuje umetak i osnovnu metalnu pjenu.



Slika 38. Proces povezivanja umetaka i metalne pjene [1]



Slika 39. Komadi metalne pjene s bakrenim umetkom [1]



Slika 40. Rastavljivo spajanje metalnih pjena [10]

### 3.5.3. Zavarivanje

Metalne pjene mogu se spojiti postupcima lemljenja i zavarivanja. Zavarivanje neporoznog aluminija otežano je zbog tankog sloja  $Al_2O_3$  na površini koja ima više talište od aluminija. Najčešće se zavaruje laserom, a zavarivanje se izvodi u atmosferi zaštitnog plina kako se sloj oksida ne bi obnovio. Gustoća energije iznosi  $10^6 \text{ W/cm}^2$ . Laserska zraka je fokusirana, a zona utjecaja topline puno uža nego kod drugih postupaka. Kod metalnih pjena smanjuje se mogućnost urušavanja ćelijaste strukture. Do urušavanja dolazi zbog prijelaza čvrste faze u tekuću što se može spriječiti upotrebom dodatnog materijala koji se dodaje u obliku šipke ili ploče na mjesto zavarivanja. Za postizanje ćelijaste strukture zavara koristi se dodatni materijal koji se pod utjecajem topline pretvara u metalnu pjenu.



Slika 41. Lasersko zavarivanje metalne pjene [1]



Bild: A02

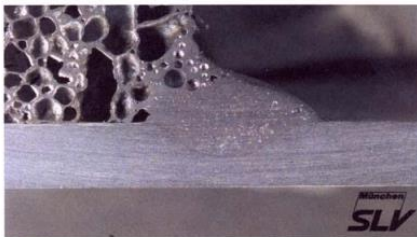


Bild: A02s

Slika 42. Primjeri zavarenih spojeva metalnih pjena [10]

## 4. USPOREDBA METALNIH PJENA SA SLIČNIM ĆELIJASTIM MATERIJALIMA

Svojstva metalnih pjena biti će uspoređena sa svojstvima polimernih pjena i drva zato što ti materijali imaju ćelijastu strukturu koja je slična strukturi metalnih pjena. Svojstva metalnih pjena u primjeni moraju biti bolja od svojstava materijala koji su mu konkurentni kako bi se plasirao na tržište.

### 4.1. Polimerne pjene

Usporedba metalnih pjena s polimernim pjenama:

- gustoća polimernih pjena je i do desetak puta manja od gustoće metalnih pjena, što znači da će konstrukcija od polimerne pjene imati puno manju masu;
- metalne pjene imaju puno bolja mehanička svojstva. Njihova vlačna čvrstoća kreće se od 0,05 do 30 MPa, a tlačna čvrstoća od 0,04 do 14 MPa. Kod polimernih pjena  $R_m$  može biti najviše oko 0,26 MPa, a  $R_{mt}$  oko 0,21 MPa;
- polimerne pjene izložene su maksimalnim temperaturama od oko 100°C, dok se metalne pjene mogu primijeniti čak i do 780°C. S tim su povezana i mehanička svojstva koja su kod metalnih pjena puno bolja pri povišenim temperaturama;
- koeficijent toplinske vodljivosti polimernih pjena kreće se od 0,027 do 0,12 W/mK, dok isti kod metalnih pjena iznosi od 0,2-11 W/mK. Iz toga se zaključuje kako polimerne pjene imaju bolja toplinsko-izolacijska svojstva, no razlika ipak nije toliko izražena;
- vatrootpornost metalnih pjena vrlo je dobra, dok je kod polimernih pjena vrlo loša;
- procesi izrade polimernih pjena bolje su upravljivi zato što je to stariji i mnogo proučeniji proces;
- metalne pjene još su uvijek značajno skuplje. [1]

## 4.2. Drvo

Usporedba svojstava drva i metalnih pjena:

- drvo ima 1,5-3 puta veću gustoću od metalnih pjena, što znači da će konstrukcije od drva imati veću masu;
- mehanička svojstva, prije svega tlačna i vlačna čvrstoća drva bolja su kada je opterećenje paralelno sa smjerom vlakana. Kada su opterećenja okomita na smjer vlakana, metalne pjene pokazuju bolja mehanička svojstva;
- metalne pjene su otporne na puno više temperature. One podnose temperature čak i do 780°C, dok drvo pokazuje dobra svojstva do temperature od 100°C. Ako temperatura prijeđe tu vrijednost, dolazi do trajnog smanjenja mehaničkih svojstava;
- električni otpor drva puno je veći nego kod metalnih materijala, tako da je ono izvrstan električni izolator. Drvo također ima jako dobra toplinsko-izolacijska svojstva;
- vatrootpornost drva zanemariva je u odnosu na metalne pjene. Drvo je također podložno različitim agresivnim medijima i vlazi iz okoline koji uzrokuju brže propadanje;
- drvo pokazuje izrazitu nestabilnost dimenzija;
- nabava i prerada drva puno je jeftinija od procesa proizvodnje metalnih pjena, što znači da je i konačna cijena proizvoda puno manja. [1]



## 5. PRIMJENA METALNIH PJENA

Metalne pjene su relativno novi oblik materijala te njihova primjena još uvijek nije u potpunosti raširena. Svojstva metalnih pjena su povoljnija od ostalih materijala i mogu uspješno zamijeniti druge ćelijaste materijale kao npr. drvo i polimerne pjene. Negativna strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no i ona se postupno smanjuje.

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

Tablica 3. Moguća primjena metalnih pjena [1]

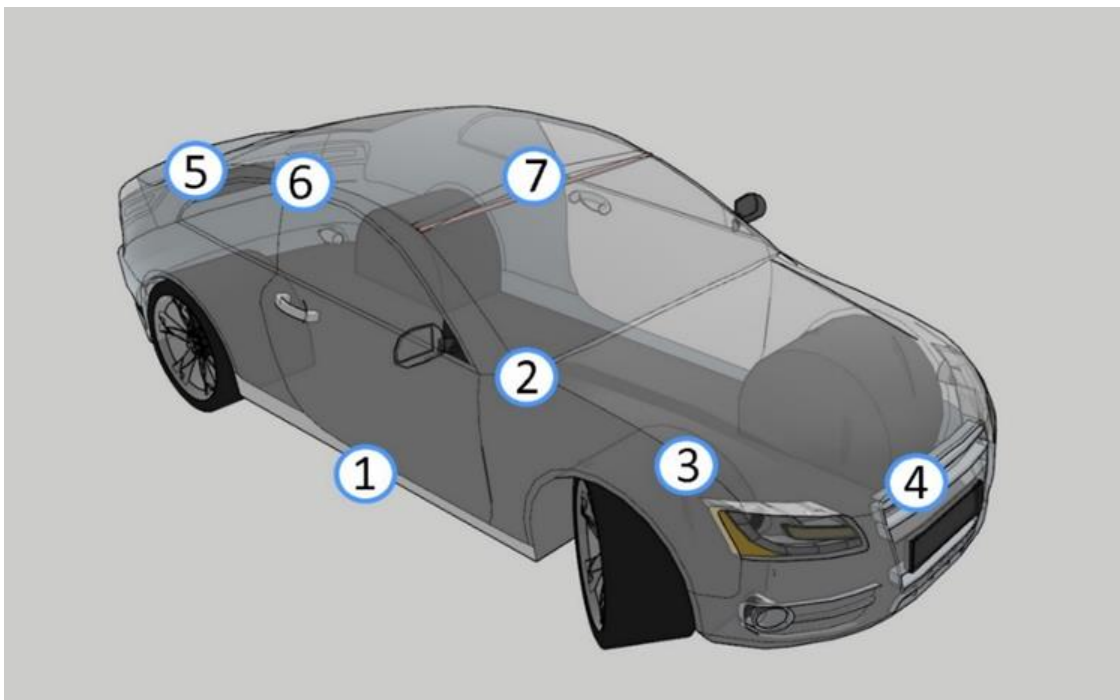
Moguća primjena metalnih pjena je vrlo raznovrsna i to u brojnim područjima, kao što su: prijevozna sredstva (automobili, vlakovi, tramvaji itd.), brodogradnja, zrakoplovna industrija, strojogradnja, građevinarstvo, arhitektura, proizvodnja namještaja, medicina itd. Najveći dio primjena se odnosi na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

## 5.1. Automobilska industrija

Automobilska industrija je jedna od najvećih svjetskih industrija te je omogućila da automobil bude sastavni dio života velikog broja ljudi.

Automobilski svijet se mijenja brže nego ikad zahvaljujući stalnom rastu tržišta, razvoju tehnologije i strožim ekološkim propisima. Potrošači širom svijeta žele sigurnije i autentičnije iskustvo putovanja, zbog čega se automobilska industrija suočava s velikim tehnološkim i ekonomskim promjenama. [7]

### Konstrukcija automobila-zone primjene metalne pjene



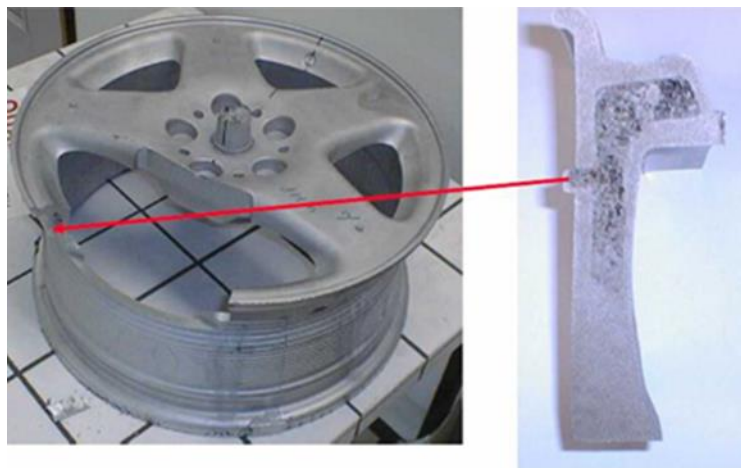
*Slika 43. Zone primjene metalne pjene kod automobila*

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

*Tablica 4. Zona primjene metalne pjene kod automobila [5]*

Metalne pjene se u automobilskoj industriji 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. Aluminijska pjena primjenjuje se kod apsorpcije vibracija i udaraca te se koristi na dijelovima automobila koji su predviđeni za deformaciju kod sudara. Metalne pjene pružaju veći stupanj apsorpcije udarca u odnosu na klasične čelične kutijaste profile i imaju dobra toplinska i zvučna izolacijska svojstva. [1]

Prednosti: smanjenje mase vozila, ublažavanje vibracija motora, povećanje torziona krutosti karoserije i može se u potpunosti reciklirati.



*Slika 44. Naplatak automobila s jezgrom od ALULIGHT pjene (ušteda u masi do 2 kg po kotaču) [1]*



Slika 45. Primjeri dijelova motora [14]



Slika 46. a) Al pjenasti dio za Ferrari 360 b) mali element koji apsorbira pad sustava za Audi Q7 [12]

## Primjena kod električnih automobila

Električni automobil je automobil koji se pokreće elektromotorom, koristeći električnu energiju pohranjenu u akumulatoru ili u drugim uređajima za pohranu energije. Prednosti električnih automobila u odnosu na klasična vozila su: energetska učinkovitost, smanjenje onečišćenja zraka, smanjenje energetske ovisnosti te smanjenje buke motora. Nedostatak električnih automobila je autonomija vožnje i vrijeme punjenja baterije. Električni automobili su znatno skuplji od klasičnih vozila međutim s masovnom proizvodnjom očekuje se pad cijene. [8]

Za proizvodnju električnih automobila bitna je upotreba što lakših komponenata zbog efikasnosti. Kod proizvodnje kućišta baterija najbitnije prednosti primjene aluminijske pjene su mala težina, apsorpcija pri sudaru, toplinska vodljivost i mogućnost recikliranja. [5]

## 5.2. Željeznička industrija

Posljednjih godina razvijao se prototip za serijsku proizvodnju metalnih pjena za željezničku industriju. Ploče od pjene AFS koriste se za podlogu vagona metroa. Vlak je sprijeda zavaren s zakrivljenim AFS pločama od pjene. Smanjenjem težine od 18% postignuta je ista krutost i poboljšano prigušivanje vibracija. Proizvode se blok pjene postavljene iza branika za apsorpciju energije u slučaju udara u automobil. [13]



*Slika 47. Prototip njemačkog vlaka izrađenog od Al pjene zavarene sendvič konstrukcije [13]*

### 5.3. Brodogradnja

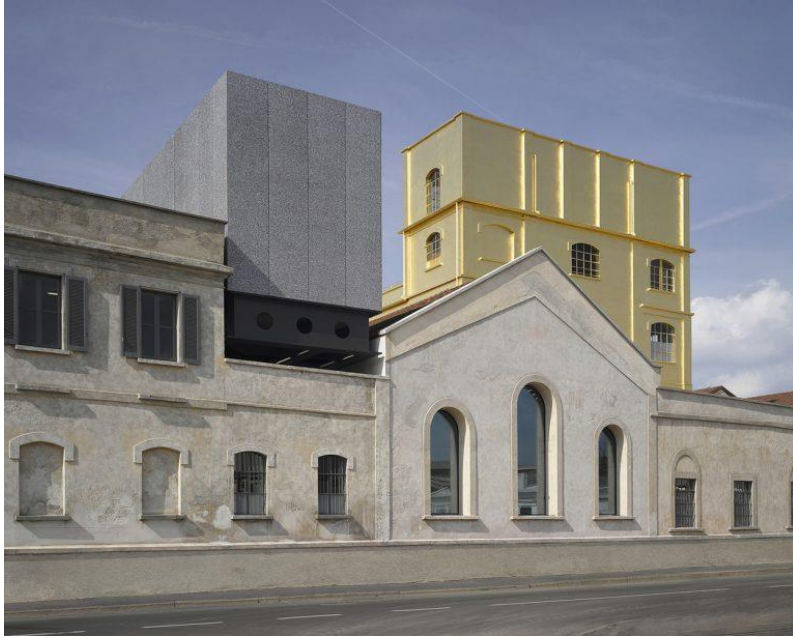
Primjenom metalne pjene u brodogradnji želi se postići smanjenje težine i distribucija. Gornja struktura broda bi trebala biti što lakša kako bi se povećala nosivost broda. U slučaju oštećenja zbog kontakta s brodom ili ledom oštećeni dio i dalje pluta što predstavlja važnu prednost iz sigurnosnih razloga.

### 5.4. Zrakoplovna industrija

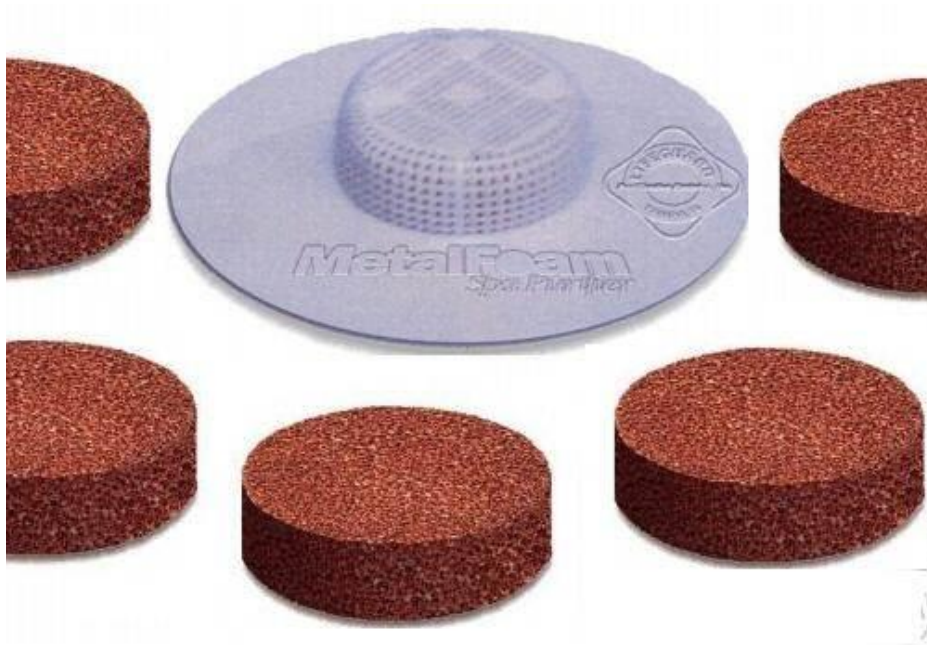
Zrakoplovna industrija metalne pjene primjenjuje u izradi krila zrakoplova, za smanjenje buke mlaznih motora zrakoplova i smanjene potrošnje goriva za oko 20%. Bitno je svojstvo male mase i zamjena sačastih struktura s aluminijskim pjenama ili sendvič konstrukcijama metalnih pjena. Prednost metalnih pjena u zrakoplovnoj industriji je izotropnost mehaničkih svojstava, a nedostatak velika otpornost na izvijanje. U svemirskoj industriji metalne pjene se upotrebljavaju za platforme na koje slijeću svemirska vozila i kao konstrukcijski elementi za apsorpciju udara.

### 5.5. Građevinska industrija

Metalne pjene mogu se koristiti i u građevinskoj industriji gdje dolazi do izražaja njihova dobra moć upijanja zvuka. Imaju bolja mehanička i toplinska svojstva od staklene vune, a njihova krutost omogućuje lakšu montažu. Metalne pjene su vatrootporne te se od njih izrađuju filteri za odvajanje dviju tekućina ili odvajanje krutih čestica od plinova ili tekućina.



Slika 48. Objekt izrađen od fasadnih obloga od Al metalne pjene [15]



Slika 49. Filteri od metalne pjene [14]

## 5.6. Industrija namještaja

Mala masa metalnih pjena vrlo je poželjna u industriji namještaja. Porozna građa različite teksture ima izrazito zanimljiva estetska svojstva. Komadi namještaja od pjene se lako prenose i privlačnog su izgleda. [1]



*Slika 50. Stol od Al pjene [14]*

## 5.7. Izmjenjivači topline i rashladni uređaji

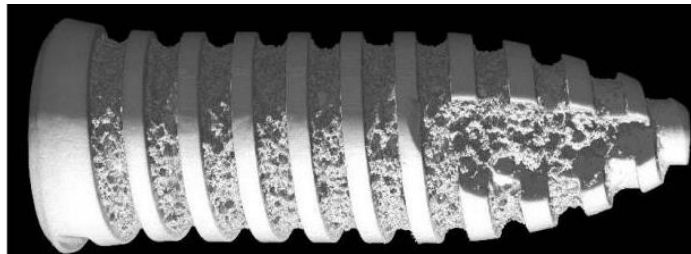
Ako pjena ima otvorene ćelije, ona će dobro provoditi toplinu, a ako su ćelije zatvorene, ona je vrlo dobar toplinski izolator. Pjene s otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stijenki, dobro provode toplinu i mogu se primijeniti za izradu izmjenjivača topline, hladnjaka itd. [1]

Toplina se može dovoditi ili odvoditi tekućinama i plinovima tako da hladimo ili grijemo metalnu pjenu dok fluid prolazi kroz nju. Tlak pada je minimalan zbog velike poroznosti.



## 5.8. Medicina

Metalne pjene su dobar kandidat za primjenu u izradi implantata ako razina poroznosti, veličina, oblik, čvrstoća i bio-kompatibilnost zadovoljavaju karakteristike implantata. Svojstva metalne Ti pjene pružaju odličnu bio-kompatibilnost što osigurava bolju povezanost s kostima, a nedostatak mu je teško pjenjenje zbog visoke točke tališta. Na slici 51. prikazan je zubni implantat temeljen na Ti pjenu koji pokazuje njegovu poroznu strukturu.



*Slika 51. Zubni implantat temeljen na Ti pjenu [16]*

Metalne pjene su idealne za izradu umjetnih kostiju i kukova. Modul elastičnosti metalnih pjena prilagođava se razini poroznosti koja odgovara prirodnoj kosti, dok kod čvrstih metalnih implantata i kosti postoji visok stupanj elastične neusklađenosti. Metalna pjena se pod pritiskom može savijati te se vratiti u prvobitni položaj. Gruba površina metalne pjene podržava rast kosti u implantatu pojačavajući na taj način njegovu snagu bez rizika od odbacivanja ili propadanja. Istraživanjem se dokazalo da bi se metalne pjene mogle koristiti kao zaštita od zračenja kod rendgenskog snimanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Iako su skup materijal, metalne pjene pokazuju veliki potencijal. One oponašaju strukturu i svojstva prirodnih ćelijastih materijala. Ovisno o procesu proizvodnje mogu biti otvorene ili zatvorene, okruglog ili poliedarskog oblika. Nedostatak primjene metalne pjene u industriji je nedovoljno poznavanje proizvodnih postupaka i neistražene mogućnosti primjene. Kada se proizvodni postupci u potpunosti istraže metalnim pjenama će porasti potražnja, a cijena će se prilagoditi tržištu. Primjenom metalnih pjena ostali materijali neće biti konkurenti, jer su one sa svojim karakteristikama idealan materijal u više grana industrije.

# LITERATURA

1. [http://titan.fsb.hr/~tfiletin/hr/data/\\_uploaded/file/radovi/Metalne%20pjene.pdf](http://titan.fsb.hr/~tfiletin/hr/data/_uploaded/file/radovi/Metalne%20pjene.pdf)
2. <https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>
3. <http://ceb.ac.in/knowledge-center/E-BOOKS/Metal%20Foams%20-%20A%20Design%20Guide%20-%20M.F.%20Ashby.pdf>
4. <https://wonderfulengineering.com/lightweight-composite-metal-foam-turns-bullets-into-dust/>
5. <https://en.havel-mf.com/Industrysolutions/Automobile-construction>
6. <https://core.ac.uk/download/pdf/34005959.pdf>
7. <https://www.bureauveritas.hr/vasa-industrija/automobilska-industrija-i-transport>
8. <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>
9. W. Krach, T. Daxner, F.G. Rammerstorfer: Metallic Foams versus Human Bones, Proceedings of the EUROMAT Conference, Rimini, 2000., Paper No. 1160
10. [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20\\_06\\_2007\\_7396\\_Magistarski\\_rad\\_Denis\\_Prusac.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20_06_2007_7396_Magistarski_rad_Denis_Prusac.pdf)
11. [http://repozitorij.fsb.hr/991/1/06\\_07\\_2010\\_Josip\\_Lukac-Zavrsni\\_rad\\_.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/991/1/06_07_2010_Josip_Lukac-Zavrsni_rad_.pdf)
12. <https://www.pinterest.com/pin/525936062736646776/visual-search/>
13. [https://www.researchgate.net/publication/292336507\\_Commercial\\_Applications\\_of\\_Metal\\_Foams\\_Their\\_Properties\\_and\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/292336507_Commercial_Applications_of_Metal_Foams_Their_Properties_and_Production)
14. [https://www.academia.edu/5743843/B\\_PRODUCTION\\_AND\\_APPLICATION\\_OF\\_METAL\\_FOAMS\\_IN\\_CASTING\\_TECHNOLOGY\\_Proizvodnja\\_i\\_primjena\\_metalnih\\_pjena\\_u\\_ljevarstvu](https://www.academia.edu/5743843/B_PRODUCTION_AND_APPLICATION_OF_METAL_FOAMS_IN_CASTING_TECHNOLOGY_Proizvodnja_i_primjena_metalnih_pjena_u_ljevarstvu)
15. <https://m-kvadrat.ba/arhitektura-bogate-teksture-poroznosti-i-svjetline-fasade-od-aluminijske-pjene/>
16. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5456484/>
17. Godec D., Šercer M.; Aditivna proizvodnja; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 86.
18. Horvat, M; Pregled aditivnih postupaka proizvodnje; Završni rad br 188/PS/2016; str 15.
19. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; Additive Manufacturing Technologies; Springer Science; New York; 2010. str. 104-105.