

# SUSTAVI

časopis za razumijevanje naše okoline / broj 8 / godina 7. / travanj 2022. / ISSN 1864 5080 / besplatni primjerak

**METALNE PJENE  
SVOJSTVA, PROIZVODNJA I  
PRIMJENA**

**KONSTRUIRANJE 3-BRZINSKOG  
PRIJENOSNIKA U GLAVINI  
STRAŽNJEG KOTAČA BICIKLA**

**ZMAJ: ISTRAŽIVANJE POMOĆU  
VJETRA**

**PRIMJER ANALIZE SUSTAVA**

## IMPRESSUM

Izdavač

Hrvatsko interdisciplinarno društvo  
Lučića 1, 10 000 Zagreb  
e-mail: ured@idd.hr  
web: http://idd.hr

Glavni i odgovorni urednik  
prof. dr. sc. Josip Stepanić

Urednica broja  
dr. sc. Jelena Ćosić Lesičar

Urednički odbor:  
prof.dr.sc. Josip Kasać  
prof.dr.sc. Biserka Runje  
prof.dr.sc. Giuliana Verbanac  
mr.sc. Nikica Viličić

Tehnička priprema  
Igor Cerin

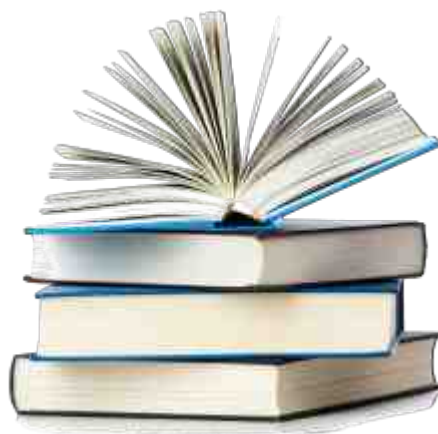
ISSN 1864-5080

Mišljenjima Agencije za odgoj i obrazovanje te Agencije za strukovno obrazovanje, časopis Sustavi se preporuča kao neobvezno, dodatno obrazovno sredstvo

# Sadržaj

- |    |  |
|----|--|
| 3  | RIJEČ UREDNICE   |
| 4  | METALNE PJENE – SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA<br>Tomislav Rodinger, Danko Ćorić   |
| 12 | KONSTRUIRANJE 3-BRZINSKOG PRIJENOSNIKA U GLAVINI STRAŽNJEG KOTAČA BICIKLA<br>Doris Stavljenić, Josip Hoster, Aleksandar Sušić, Ivica Skozrit |
| 22 | ZMAJ: ISTRAŽIVANJE POMOĆU VJETRA<br>Saša Iskrić  |
| 29 | PRIMJER ANALIZE SUSTAVA<br>Josip Stepanić  |

# Riječ urednice!



## **Drage čitateljice i čitatelji,**

pozdravljam Vas kao urednica ovog broja časopisa Sustavi. Protekle godine postavile su nam razne izazove što na kreativnom i istraživačkom, što na izdavačkom a posebno osobnom putu. Situacija u kojoj smo se iznenada našli otvorila nam je brojne mogućnosti razvoja i promišljanja kako i na koji način možemo unaprijediti istraživanja. Kako sav naš trud i požrtvovnost približiti čitateljima i u konačnici pobuditi interes za sveobuhvatni razvoj tehnike i tehnologije što ovim brojem časopisa Sustavi i činimo.

Ovim brojem časopisa želimo Vam predstaviti i približiti teme iz područja materijala, konstrukcije bicikala te fotografiranja iz zraka pomoću zmajeva. Ujedno donosimo i primjer rješenja jednog od zadataka s Državnog natjecanja i smotre Opisujemo sustave.

Članak Metalne pjene – Svojstva, proizvodnja i primjena, autora Rodingera i Ćorića, predstavlja karakteristične primjene metalnih pjena koje su zbog svojih specifičnih svojstava i izgleda sve više zastupljene na globalnom tržištu, a sukladno tome broj komercijalnih primjena im svakodnevno raste.

Autori Stavljenić, Hoster, Sušić i Skozrit, u članku Konstruiranje 3-brzinskog prijenosnika

u glavini stražnjeg kotača bicikla iznose detaljan prikaz konstruiranja 3-brzinskog prijenosnika u glavini stražnjeg kotača bicikla uz prikaz različitih rješenja zupčaničkog prijenosnika zatvorenog tipa u glavini.

Članak Zmaj: istraživanje pomoću vjetra nas uvodi u područje fotografiranja iz zraka članova društva KAP Jasa iz Slovenije.

Ako Vas zanimaju ovakve i srodne teme te želite saznati više ili želite svojim radom doprinijeti popularizaciji znanosti kontaktirajte nas pomoću adrese elektroničke pošte [ured@idd.hr](mailto:ured@idd.hr) te pratite naše aktivnosti na mrežnoj stranici našeg izdavača, Hrvatskog interdisciplinarnog društva, <http://idd.hr>.

Srdačan pozdrav i ugodno čitanje!

dr.sc. Jelena Ćosić Lesičar



# *Metalne pjene*

## *Svojstva, proizvodnja i primjena*

*Tomislav Rodinger, mag. ing. mech.*

*prof. dr. sc. Danko Ćorić*

*Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu*

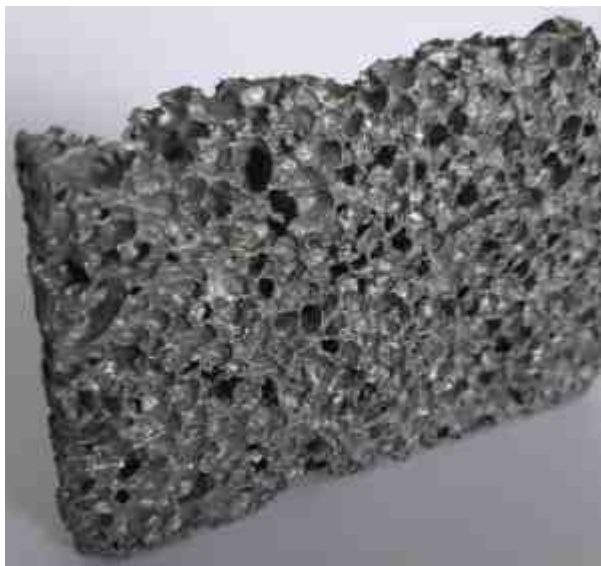
### **Općenito o metalnim pjenama**

Brojni prirodni materijali, poput drva, lista ili kosti imaju poroznu strukturu koja rezultira njihovom manjom masom i svojstvima optimalno prilagođenim određenoj zadaći. Kako bi se ovakva građa preslikala na tehničke materijale poput metala razvijena je posebna skupina materijala pod nazivom metalne pjene (upjenjeni metali). Iako prvi patent potječe iz 50-ih godina prošlog stoljeća, metalne pjene započinju intenzivni razvoj tek u posljednjih tridesetak godina. Radi se o poroznim metalima koji mogu imati udio šupljina 90 % i više što značajno doprinosi smanjenju mase. Metalne pjene mogu biti napravljene od različitih metala, ali zbog niske temperature tališta, niske gustoće i općenito dobrih svojstava, najčešće se koristi aluminij i njegove legure. Od ostalih metala, prisutne se još bakrene, magnezijeve, niklene ili primjerice čelične pjene. Ukoliko se radi o upjenjenim lakim metalima gustoća takvih pjena može biti manja od gustoće vode. Tako se u slučaju primjene aluminija gustoće 2700 kg/m<sup>3</sup> za pjenu poroznosti 65 % postiže gustoća od samo 945 kg/m<sup>3</sup>, što je manje od gustoće vode (997 kg/m<sup>3</sup>) pa takva pjena može i plutati. S druge strane, ako se upjenjuju metali veće gustoće, kao npr. čelik (gus-

toća oko 7850 kg/m<sup>3</sup>), pjena mora sadržati veću poroznost od barem 88 % kako bi plivala na vodi.

### **Svojstva i primjena**

Primjena metalnih pjena može se podijeliti na konstrukcijsku, funkcionalnu i estetsku. Konstrukcijska primjena temelji se na njihovoj maloj masi i specifičnim mehaničkim svojstvima, tako da se najčešće koriste kao jezgre kompozitnih sendvič konstrukcija. Porozna i lagana jezgra osigurava relativno visoku specifičnu krutost i visoku sposobnost apsorpcije energije udara što je presudno u određenim konstrukcijskim primjenama. Funkcionalna primjena zasniva se specifičnoj funkcionalnosti ovih materijala, ovisno već o tome sadrži li pjena otvorene ili zatvorene pore odnosno je su li njihove ćelije otvorenih ili zatvorenih stjenki. Tako se na primjer pjene sa zatvorenim ćelijama rabe za toplinske izolatore, a ukoliko se radi o otvorenim ćelijama pjene se koriste kao izmjenjivači topline ili filteri. Ovisno o materijalu iz kojeg su napravljene i morfologiji ćelija metalne pjene mogu imati dobru električnu vodljivost, odličnu sposobnost prigušenja zvuka i vibracija, a mogu biti i vatrootporne. Estetska primjena počiva se na njihovom karakterističnim izgledu, pa neki dizajneri i umjetnici danas ih primjenjuju



Metalne pjene zatvorenih ćelija

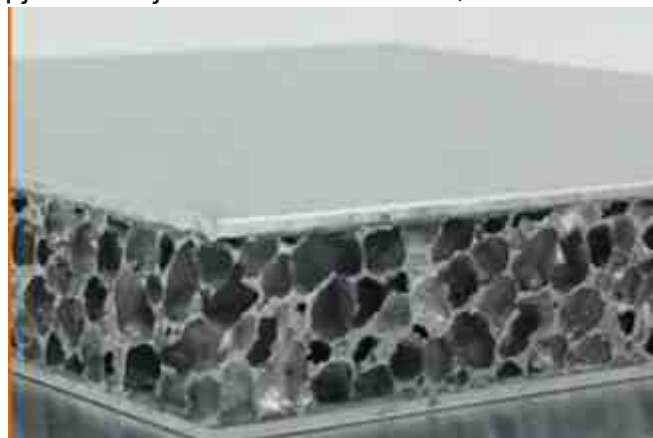
za izradu skulptura dok ih arhitekti koriste kao



Metalne pjene otvorenih ćelija

obloge za unutarnju i vanjsku dekoraciju.

U cilju smanjenja potrošnje goriva te posljedično i smanjenja emisija štetnih plinova, automobilska industrija teži primjeni lakih materijala među kojima se metalne pjene nameću kao logičan izbor. Još više to dolazi do izražaja kod električnih vozila, koja zbog težnje za velikim dometom moraju imati velike baterije za pohranu električne energije koje mogu težiti i po 700 kg, pa je lagana konstrukcija od presudne važnosti. Zbog niskog modula elastičnosti i male čvrstoće metalne pjene se rijetko koriste zasebno, već se radi o



Sendvič konstrukcija s jezgrom od metalne pjene

kompozitnim sendvičima čije su vanjske stijenke načinjene od čeličnog ili aluminijevog lima koji preuzima statička i dinamička opterećenja dok porozna jezgra povećava krutost takvog sendviča uz zadržavanje male mase. Budući da imaju vrlo dobru apsorpciju energije udara od ovih pjena se izrađuju dijelovi poput primjerice branika koji povećavaju sigurnost putnika. U vozilima se mogu primjenjivati i za izradu nosača motora kao i dijelova za smanjenje buke, budući da vrlo dobro upijaju vibracije i zvuk.

Osim u cestovnim vozilima, metalne pjene su prisutne u tračničkim vozilima, brodovima i zrakoplovima. Sva ova prometalna moraju imati dovoljno čvrstu i krutu konstrukciju uz što manju masu.

Zbog dobre apsorpcije zvuka ovi se materijali mogu koristiti kao zaštitne barijere koje smanjuju buku uz prometnice te kao sigurnosne barijere uz ceste u slučaju izljetanja vozila (zaštitne ograde) jer su u mogućnosti velik dio udarne energije pretvoriti u deformaciju i tako zaštititi putnike i smanjiti razmjere oštećenja prilikom sudara. Zbog ovog potonjeg primjerene su i za balističku zaštitu vojnih vozila



Dio od Al-pjene za Ferrari 360 i 430 spider



Mali udarno-apsorbirajući element za Audi Q7

i vozila za prijevoz novca ili zaštitu osoba. Također, u ratom pogođenim područjima mogu se koristiti za zaštitu vojnih objekata od udarnih valova prouzročenih eksplozivnim napravama.

Biokompatibilni metali, poput titanija i magne-



Prototip njemačkog brzog vlaka ICE od zavarenog sendviča s upjenjenom aluminijevom jezgrom

zija, koji se često rabe za izradu implantata



pogled iznutra

imaju krutost veću od ljudske kosti pa ne predstavljaju optimalan izbor koji jamči zadovoljavajuće ponašanje implantata. Međutim, ukoliko se umjesto monolitnog metala primijeni upjenjena verzija biokompatibilnog materijala, može se uspješno prilagoditi krutost (reguliranjem stupnja poroznosti) tako da im-



plantat i kost imaju slična svojstva čime se omogućuje njihova bolja povezanost i sraščivanje.

Od pjena s otvorenim ćelijama proizvode se filtri za odvajanje krutih čestica iz tekućina i plinova ili za uklanjanje onečišćenja iz kapljevine.

Zbog specifičnog izgleda, metalne pjene su



Filtri od poroznog metala za funkcionalne primjene

vrlo atraktivne za arhitektonske i dekorativne svrhe. Tako je fasada bioenergane u Virovitici izrađena od panela aluminijske pjene koji su dodatno obojeni u različite nijanse zelene boje kako bi se istaknula proizvodnja energije iz obnovljivih izvora.

Suvremeni umjetnici koriste metalne pjene za izradu umjetničkih dijela, a zbog vizualnog



Implantat od pjene biokompatibilnog metala

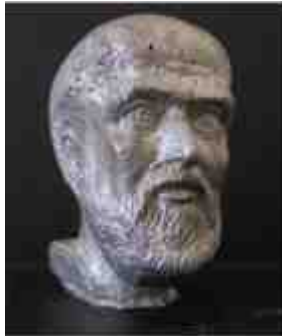


Fasadne obloge bioenergane

dojma kojeg pružaju paneli s otvorenim ćelijama isti su prikladni za dekorativnu rasvjetu koja stvara ugodnu ambijentalnu atmosferu. Bivši student Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Josip Lukač, fokusirao se na akustična i estetska svojstva aluminijskih pjena pa je



Postolje skulpture načinjeno od Al-pjene



Glava Pitagore izrađena od upjenjenog aluminija



Obloga od metalne pjene za ambijentalnu rasvjetu



Gitara od drveta i aluminijeve pjene, Josip Lukač

u diplomskom radu izradio električnu gitaru koristeći se aluminijevom pjenom. Zahvaljujući tome ova gitara lakša je za više od jednog kilograma (oko 30 % ukupne mase) od identične Fender Telecaster električne gitare s drvenim tijelom. Ispitivanje zvučnih svojstava pokazalo je da njegova gitara nimalo ne zaostaje za drvenom, već dapače ima bogatiji zvuk i dulji ton te jače izražen bas.



## Proizvodnja

Za proizvodnju metalnih pjena razvijeno je više postupaka, a svaki od njih bitno utječe na morfologiju ćelija, a time i na primjenu. U nekim tehnološkim postupcima kao polazni materijal koristi se rastaljeni metal, dok se u drugim rabe metalni prahovi u elementarnom stanju ili njihove mješavine. Također, postupci se razlikuju po tome lijeva li se rastaljeni metal u kalup ili na praoblake, ili se za upjenjivanje koristi plin odnosno odgovarajući dodatak za upjenjivanje.

Rastaljeni metal može se lijevati u kalup izrađen od polimerne pjene na koju je nanesen keramički prah. Zagrijavanjem polimerna pjena izgara, a keramički prah očvršne pri čemu se formira negativ oblika pjene. Kalup se zatim puni rastaljenim metalom te nakon ohlađivanja formira se pjena identične strukture polaznoj polimernoj pjenu.

S druge strane metal se može lijevati u praškasti materijal netopljiv u talini, ali topljiv u nekoj drugoj tekućini čime opet nastaju pore. Ovaj se postupak može modificirati na način da se umjesto rastaljenog metala koristi me-

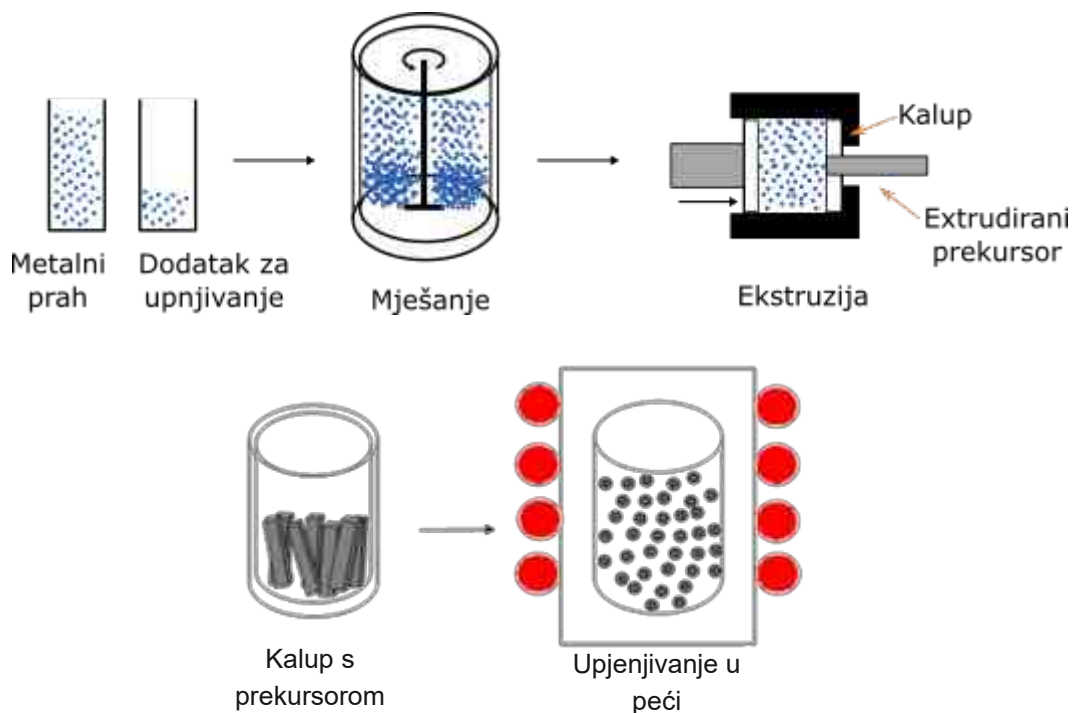
talni prah koji se miješa s određenim topljivim prahom i potom kompaktira nekim od poznatih postupaka, najčešće prešanjem. Kao topljivi prah može se koristiti primjerice sol ili šećer koji se dobro rastvaraju u vodi.

U talinu se vrlo često ubrizgava plin ili se koriste različiti praškasti dodaci za upjenjivanje (najčešće hidridi ili karbonati) koji pri povišenim temperaturama otpuštaju plinoviti sastojak koji u talini stvara mjehuriće.

U postupcima koji polaze od smjese praha metala i aditiva za upjenjivanje, potrebno je mješavinu prahova isprva dobro homogenizirati miješanjem te potom postupkom prešanja ili ekstrudiranja kompaktirati u poluproizvod poznat kao prekursor. Ovakav prekursor stavlja se u kalup željenog oblika i zatim zagrijava u peći čemu dolazi do rastvaranja dodatka za upjenjivanje, a oslobođeni plin stvara pore u polučvrstom stanju.

## Zaključno

U tekstu su navedene samo neke karakteristične primjene metalnih pjena koje su zbog svojih specifičnih svojstava i izgleda sve više zastupljene na globalnom tržištu tako da broj



komercijalnih primjena svakodnevno raste. Kao najveći nedostaci trenutno se ističu relativno visoka cijena proizvodnje, pogotovo ako se radi o pjenama izrađenim od skupih materijala visokog tališta te neujednačenost mehaničkih svojstava kao rezultat slučajne raspodjele veličina i oblika ćelija. Ovladavanje postupcima proizvodnje i razumijevanje

utjecaja procesnih parametara na dobivenu strukturu zasigurno će doprinijet daljnjem unaprjeđenju svojstava metalnih pjena te potaknuti i nove mogućnosti primjene.



Tim istraživača na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zavodu za materijale već dugi niz godina aktivno se bavi istraživanjima na području metalnih pjena. Aktivnosti su usmjerene prema što boljem ovladavanju tehnološkim procesima upjenjivanja te mogućnostima ispitivanja svojstva ovih materijala. Dizajniranjem morfologije i razmatranjem utjecaja veličine, oblika i raspodjele ćelija na ponašanje metalnih pjena uz dodatno ojačavanje ćelijaste građe nastoji se unaprijediti njihovu konstrukcijsku i funkcionalnu primjenu. Zahvaljujući suvremenoj opremi, znanju i zalaganju studenata i istraživača te uspješnoj suradnji s međunarodnim institucijama produbljene su spoznaje o ovom novom obliku metalnih materijala karakteristične strukture i svojstava iz čega su proizašli i brojni znanstveni i stručni radovi kao i završni i diplomski radovi studenata preddiplomskog i diplomskog studija strojarstva, smjera Inženjerstvo materijala.

### **Dodatna literatura**

1. T. Filetin, I. Kramer, G. Marić, Metalne pjene: proizvodnja, svojstva i primjena, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
2. I. Bunjan, K. Grilec, D. Ćorić, Investigation and Statistical Evaluation of Reinforced Aluminum Foams, Processes 9 (2021) 2, 1-16
3. M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, Woburn, 2000.
4. J. Banhart, Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, Progress in Materials Science, 46 (2001), 559 – 632
5. F. Garcia-Moreno, Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production, Metals, 9 (2016) 2