



Vela Luka, Croatia, 23 - 25 June 2016

International Conference  
**MATRIB 2016**  
MATERIALS, TRIBOLOGY, RECYCLING

## OJAČANE ALUMINIJSKE PJENE

### REINFORCED ALUMINIUM FOAMS

**Ivan Primorac, Krešimir Grilec, Suzana Jakovljević**

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Republika Hrvatska

<sup>2</sup> University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Croatia

#### **Sažetak**

Pjene općenito, kao i aluminijske pjene imaju mnoga povoljna svojstva zahvaljujući njihovoj poroznoj strukturi što ih čini pogodnima za mnoge primjene. Mogućnost apsorpcije energije je jedno od najznačajnijih uporabnih svojstava pjena. Aluminijske pjene se sve češće koriste kao različiti apsorberi kinetičke energije (odbojnici automobila, vlakova, tramvaja). Primjena aluminijskih pjena unutar ploča, cijevi ili drugih kompleksnijih oblika sve je zanimljivija kao konstrukcijski materijal male mase. Pjenaste ploče mogu se ojačati metalnim žicama ili mrežama, slično kao i kod betona. U tom se slučaju ojačala (najčešće čelična) stavljaju u kalup zajedno s prekursorom za upjenjavanje.

***Ključne riječi:*** ojačane aluminijske pjene, apsorpcija energije, tlačno ispitivanje

#### **Abstract**

Foamed materials in general, and aluminium foams in particular, demonstrate a number of interesting properties due to their porous structure, which makes them usable in a wide range of applications. Recently, foamed aluminium is frequently used in various absorbers of kinetic energy (buffers of automobiles, trains, trams). The use of aluminium foams together with dense materials, such as sheets, tubes or more complex hollow shaped structures, is interesting in the field of lightweight structural applications. The foamed panels can be reinforced by metallic wires or nets like a concrete. In this case the reinforcing components (made of steel) are inserted in the mould together with foamable PM-precursor before foaming.

***Keywords:*** aluminium foam, absorption of energy, compression test

## 1. UVOD

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

Tijekom proizvodnje metalnih pjena formiraju se slučajne raspodjele šupljina različitih oblika, a neizbježno je i nastajanje guste površinske kore, koja značajno poboljšava savojnu krutost i izgled pjene. S druge strane, ta kora sadrži često nevidljive napukline i praznine koje mogu inicirati prijevremeni lom pjene, naročito pri vlačnom opterećenju kada su povoljni uvjeti za stvaranje napuklina u visokoporoznom materijalu. Zbog toga je vlačna čvrstoća aluminijskih pjena nedovoljna za jače opterećene konstrukcijske dijelove, iako je omjer krutosti i mase odličan. Rast napuklina u stijenkama ćelija može se spriječiti ojačanjem pjena, slično kao kod ojačanja betona. Za ojačanje Al pjena rabe se različiti oblici mreža od nehrđajućih čelika. Ako materijal ojačanja ima viši modul elastičnosti i dovoljnu granicu razvlačenja, naprezanja se prenose s pjene na ojačavajući element i postojeća napuklina u ćeliji postaje neaktivna, [2].

## 2. APSORPCIJA ENERGIJE UDARA

Primjena lakih poroznih materijala visoke čvrstoće u transportnoj industriji je sve zanimljivija u pogledu povećanja sigurnosti, [3]. Aluminijske pjene se sve češće koriste kao različiti apsorberi kinetičke energije (odbojnici automobila, vlakova, tramvaja), [4].

Način na koji su ćelije oblikovane u metalnim pjenama omogućava apsorpciju energije udara u svim smjerovima. Oblik ćelije približno je definiran matematičkim modelom poliedra tetraekaidkahedrona i to je čini neosjetljivom na smjer naprezanja, tj. izotropnom. Ta geometrija omogućava metalnim pjenama da apsorbiraju udarnu energiju iz bilo kojeg smjera i omogućava prijenos topline, toplinsku otpornost i protjecanje fluida također u svim smjerovima. Važno je naglasiti da se pjene s jednakom veličinom i periodičnom raspodjelom ćelija i porozitetom mogu idealizirano smatrati izotropnim; doduše prilikom obrade i proizvodnje, uvijek se javljaju nepravilnosti u raspodjeli ćelija kada se one same orijentiraju u određenom smjeru (obično je to smjer agensa za pjenjenje), povećava im se volumen i to rezultira nejednakim veličinama ćelija, [5].

Apsorpcija energije udara po jedinici volumena ( $W$ ) može se prikazati sljedećom relacijom:

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

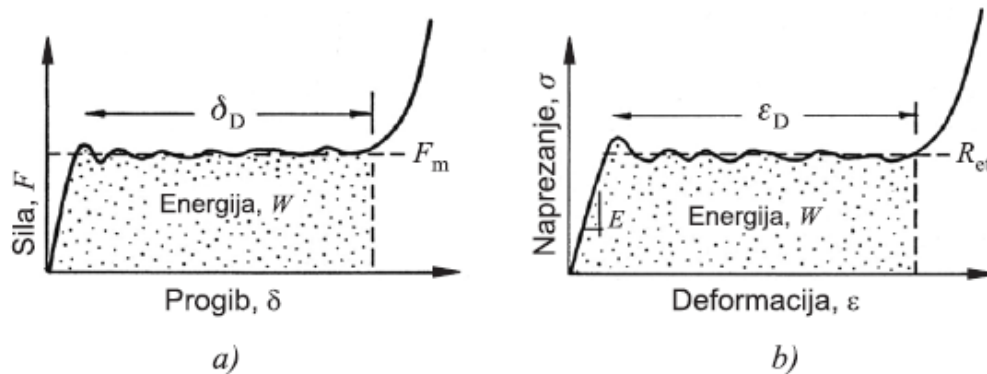
gdje je:

$W$  – apsorbirana energija udara po jedinici volumena (MJ/mm<sup>3</sup>)

$\sigma$  – tlačno naprezanje (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  – deformacija (%)

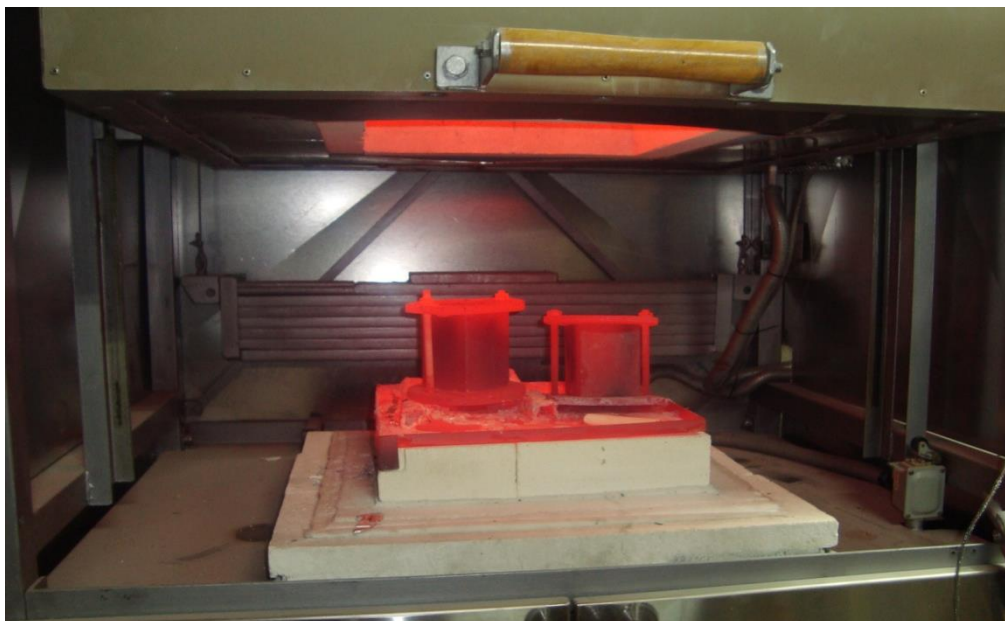
Granica stlačivanja ( $R_{et}$ ) mora biti tek nešto manja od naprezanja pri kojem dolazi do loma materijala, odnosno do dostizanja kritične deformacije zgušnjavanja ( $\epsilon_D$ ). Površina ispod krivulje  $R_{et} - \epsilon_D$  pokazuje kolika se količina energije udara može apsorbirati (slika 1).



Slika 1: Krivulje apsorpcije energije pri savojnom a) i tlačnom opterećenju b), [2]

### 3. TLAČNO ISPITIVANJE OJAČANIH ALUMINIJSKIH PJENA

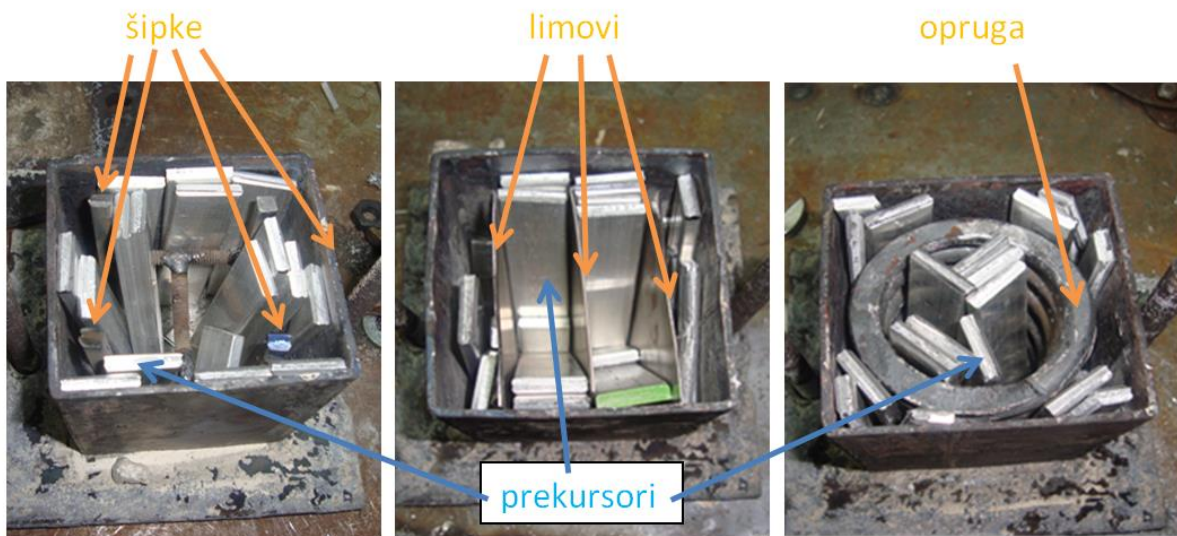
U nastavku su dani rezultati ispitivanja uzoraka aluminijskih pjena dobivenih iz prekursora oznake Alulight. Prekursor je poluproizvod koji se proizvodi na način da se prah metalne legure, pomiješan s agensom za upjenjavanje, ekstrudira u profile pravokutnog presjeka. Materijal od kojeg je prekursor izrađen sastoji se od praha AlMgSi 0,6 legure pomiješanog sa 0,4% titan hidrida ( $TiH_2$ ). Za izradu uzoraka korištena je elektrootporna zvonasta peć bez zaštitne atmosfere snage 7,5 kW (slika 2).



Slika 2: Komora elektro-peći s kalupima za upjenjavanje

Aluminijske pjene mogu se ojačati metalnim žicama, mrežama, šipkama, limovima i dr. oblicima. U tom se slučaju ojačala (najčešće čelična) stavljaju u kalup zajedno s prekursorom za upjenjavanje.

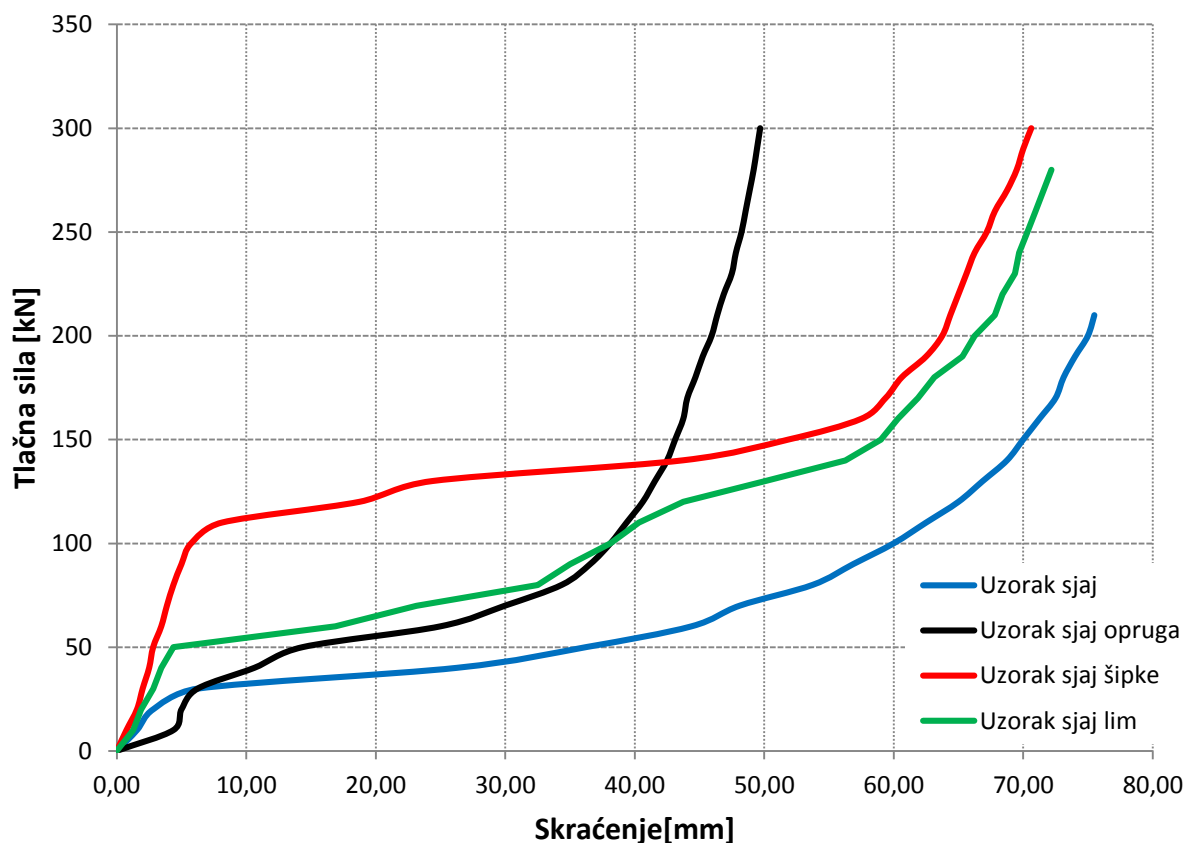
Na slici 3 prikazana su različita ojačanja koja su ispitivana u ovom radu [6]. Izrađeno je 12 uzoraka aluminijskih pjena kvadratnog presjeka dimenzija  $74 \times 74$  mm i dužine 100 mm, od kojih su tri ojačane čeličnim šipkama (4 čelične šipke kvadratnog presjeka  $6 \times 6$  mm, dužine 95 mm, međusobno zavarene kako bi stajale okomito u kalupu), tri čeličnim limovima (svaki sa po 3 lima dimenzija  $62 \times 95$  mm, debljine 0,75 mm) i tri s čeličnom oprugom (opruga dimenzija  $\phi 66$  mm, dužine 95 mm i promjera žice 9 mm). Relativna gustoća metalne pjene bila je 0,27 (apsolutna gustoća  $729 \text{ kg/m}^3$ ).



Slika 3: Kalupi s prekursorom i različitim ojačanjima

Ispitivanja su provedena na kidalici nazivne sile 400 kN, proizvođač: WPM, Njemačka; vrsta EU40mod. Brzina ispitivanja iznosila je 60 mm/min. Rezultati tlačnog ispitivanja uzoraka prikazani su na slici 4.

Iz slike 4 vidljivo je da uzorci ojačani šipkama zadržavaju oblik krivulje pogodan za apsorpciju energije uz izraženu konstantnu tlačnu silu koju obilježava značajna deformacija čime se postiže velika apsorpcija energije. Jednako tako ta sila se pomiče u područje viših vrijednosti te se na taj način povećava apsorbirana energija. Dodavanje opruge smanjilo je mogućnost tlačenja uzoraka. Dodatak lima u uzorak aluminijske pjene također povećava ukupnu apsorbiranu energiju, ali oblik krivulje nije tako povoljan kao u slučaju ojačanja šipkama.

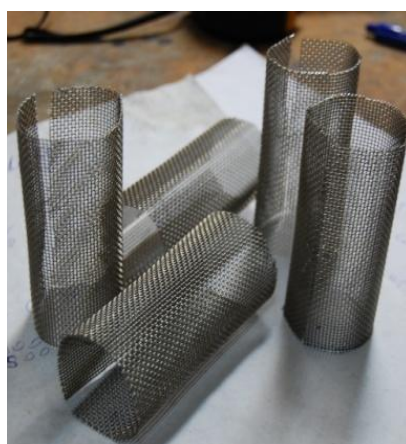


Slika 4: Aproximirani dijagrami “tlačna sila – skraćenje” (sjaj – neojačani uzorci, sjaj lim – uzorci ojačani limom, sjaj opuga – uzorci ojačani oprugom, sjaj šipke – uzorci ojačani šipkama)

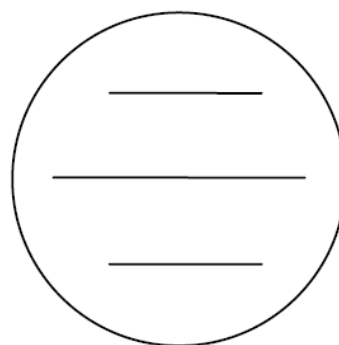
U radu [7] izrađeni su od istog materijala uzorci okruglog presjeka, promjera  $\phi 85$  mm i visine 100 mm. Osim tri uzorka neojačanih aluminijskih pjena, izrađena su i po tri uzorka ojačana čeličnim šipkama (promjera 4 mm i spojenih na način prikazan na slici 5, te tankim čeličnim mrežama postavljenima u kalup na dva različita načina (valjak odnosno tri odvojene čelične mreže).



a) uzorci H

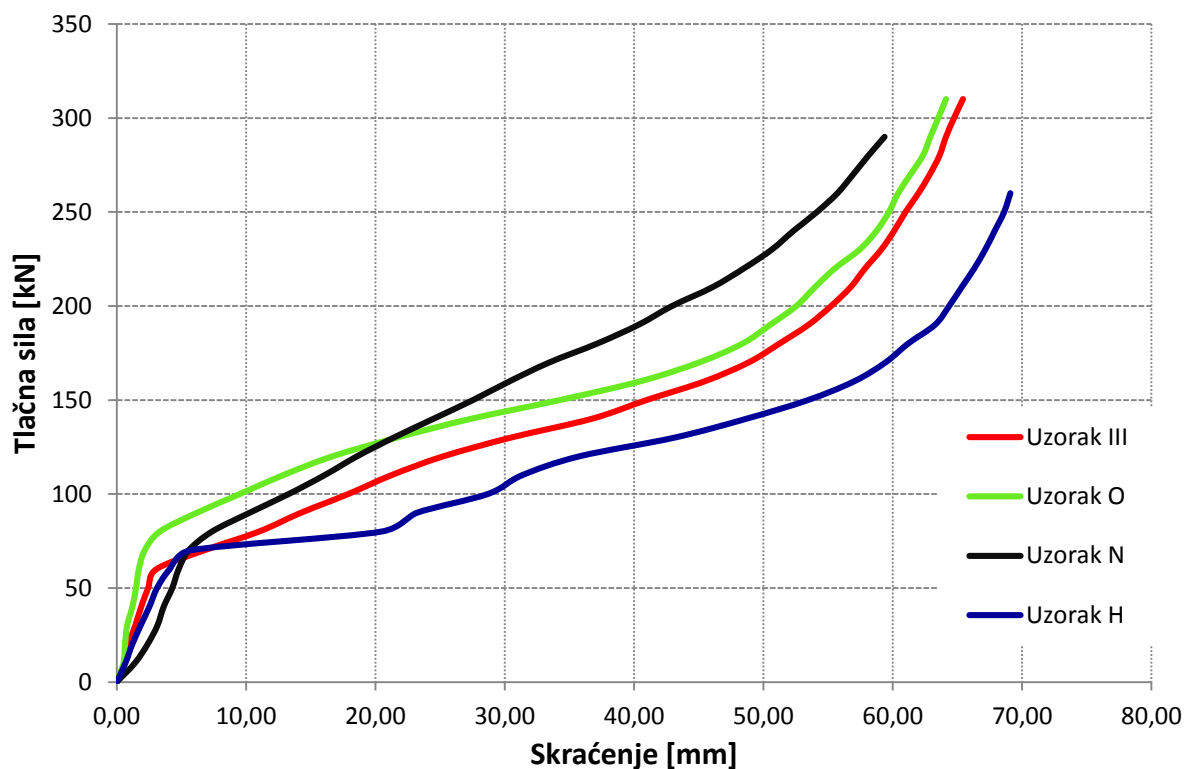


b) uzorci O



c) uzorci III

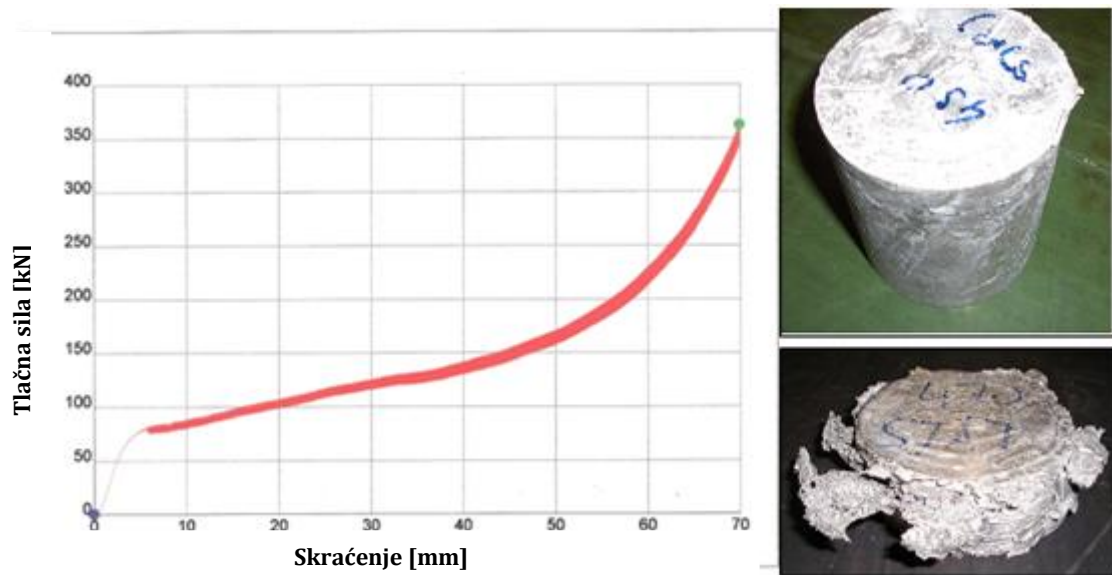
Slika 5: Različita ojačanja ispitivanih aluminijskih pjena



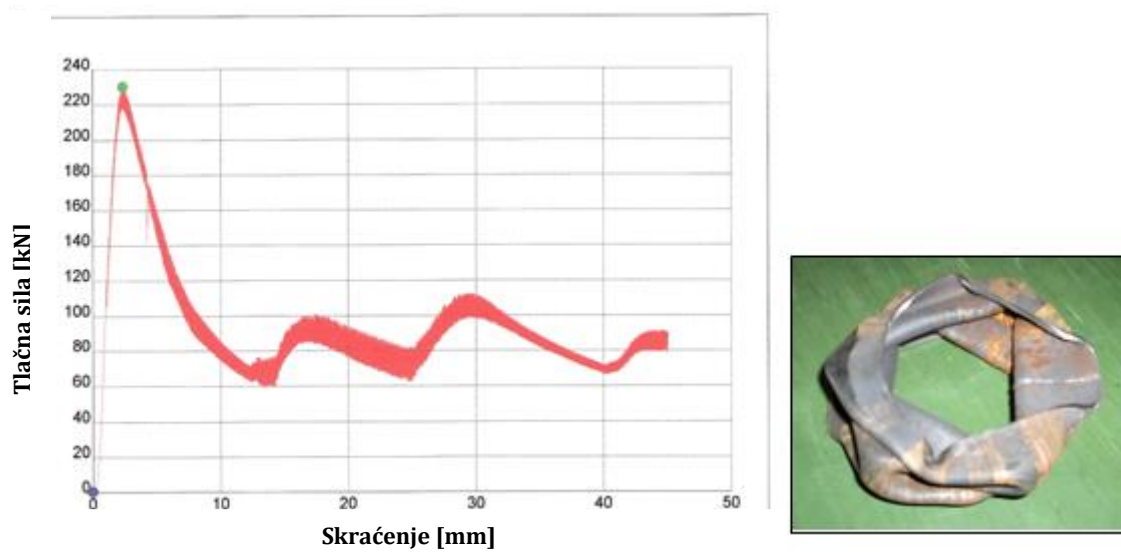
**Slika 6: Aproximirani dijagrami "tlačna sila – skraćenje" (N – neojačani uzorci, H – uzorci ojačani šipkama, O – uzorci ojačani mrežom u obliku valjka, III – uzorci ojačani s 3 odvojene mreže)**

Na slici 6 vidljivo je da dodavanjem šipki krivulja u dijagramu zadržava oblik pogodan za apsorpciju energije (čak i nešto povoljniji) odnosno izraženije je postojanje konstantne sile tlačenja koja aktivira značajno skraćenje pri čemu se postiže velika apsorpcija energije. Jednako tako ova sila se primjenom različitih mrežastih ojačanja može pomicati u područje viših vrijednosti pri čemu se povećava sposobnost apsorpcije energije.

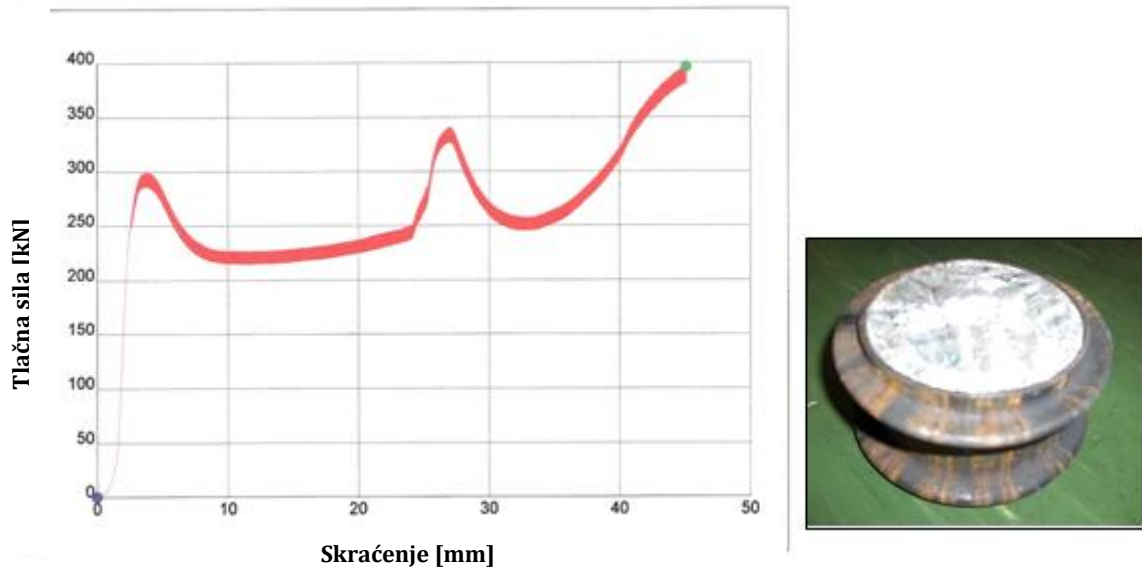
Za razliku od prethodno navedenih ispitivanja, u radu [8] ojačanje aluminijske pjene izvedeno je s vanjske strane odnosno njenim umetanjem u čeličnu cijev. Na slikama 7, 8 i 9 prikazani su uzorci nakon tlačnog ispitivanja te pripadajući dijagrami "tlačna sila – skraćenje" iz kojih je vidljivo da se primjenom čelične cijevi mijenja oblik dijagrama u manje povoljan, odnosno sama apsorpcija se aktivira kod velike sile koja se deformiranjem cijevi ciklički mijenja.



Slika 7: Dijagram "tlačna sila - skraćenje" Al pjene



Slika 8: Dijagram "tlačna sila - skraćenje" čelične cijevi



Slika 9: Dijagram “tlačna sila – skraćenje” čelične cijevi s Al pjenom

#### 4. ZAKLJUČAK

Dodavanjem čeličnih ojačala u kalup zajedno s prekursorom za upjenjavanje može se proizvesti ojačana aluminijska pjena. Time pjena prestaje biti izotropna, ali može preuzeti veća opterećenja u kritičnom smjeru.

Provedena ispitivanja pokazala su da se prikladnim izborom vrste, oblika, dimenzija i rasporeda ojačanja u aluminijskoj pjeni može povećati apsorbirana energija u smjeru ojačanja. Pri tome krivulja “tlačna sila – skraćenje” može zadržati povoljni oblik s izraženom granicom stlačivanja.



## LITERATURA

- [1] <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1838/5.full.pdf+html>
- [2] Filetin T., Kramer I., Marić G., "Metalne pjene", Hrvatsko Društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [3] Kim S.Y., Hur B.Y., Kwon K.C., Cho S.H., Lim C.Y., Yoo Y.M., Lee M.H., "Mechanical and sound absorption properties of closed cell Al foam by pot furnace method", International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology METFOAM 2003, Berlin
- [4] Lebedev V.I., Komov V.I., Andreev D.A., "Ability of constructions from foamed aluminium to absorb different kinds of energy", International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology METFOAM 2003, Berlin
- [5] <http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-11282004-014635/unrestricted/etd.pdf>
- [6] Hrabrić I., "Apsorpcija energije ojačanih aluminijskih pjena", diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] Keser M., "Tlačno ispitivanje ojačanih aluminijskih pjena", završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [8] Grilec K.; Marić G., Jakovljević S., Brkić S.; Prusac D., "Ponašanje aluminijskih pjena i različitih čeličnih cijevi pri tlačnom opterećenju", Zbornik radova = Proceedings. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, MATRIB 2009, pp. 86-91, (2009).