

Praćenje deformacije pri tlačenju aluminijske pjene

Premužić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:969963>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Premužić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Luka Premužić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu, dipl. ing. i asistentu Ivanu Primorcu, mag.ing.mech. na korisnim savjetima, odvojenom vremenu i proslijeđenim uzorcima potrebnim za izradu diplomskog rada. Također zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Željku Alaru dipl. ing. što je omogućio korištenje opreme u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, ali i svim zaposlenicima laboratorija za pomoć pri izvođenju ispitivanja i prijatelju Domagoju Saletu što mi je posudio kameru kako bi mogao snimiti uzorke tijekom ispitivanja.

Luka Premužić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: 9. 11. 2018 | Prilog: |
| Klasa: 602-04/18-G/3 | |
| Ur. broj: 15-1702-18-221 | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA PREMUŽIĆ** Mat. br.: 0035193181

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Praćenje deformacije pri tlačenju aluminijske pjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Deformation monitoring during the compression of aluminium foam**

Opis zadatka:

Mogućnost apsorpcije energije udara jedno je od najzanimljivijih uporabnih svojstava metalnih pjena. Kada moment izazvan tlačnim opterećenjem prekorači moment plastičnosti čvorova ćelija dolazi do plastičnog kolapsa ćelija.

U ovom radu je potrebno:

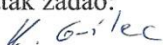
- 1) Ukratko opisati način proizvodnje te primjenu aluminijskih pjena
- 2) Izraditi uzorke aluminijskih pjena različite gustoće
- 3) Tlačno ispitati uzorke aluminijskih pjena
- 4) Pratiti tijek deformacije pri tlačenju
- 5) Analizirati i usporediti apsorpcijska svojstva aluminijskih pjena različite gustoće

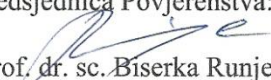
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1.UVOD | 1 |
| 2.GRAĐA I STRUKTURA | 2 |
| 3.PROIZVODNJA | 4 |
| Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi..... | 5 |
| 4.APSORPCIJA ENERGIJE..... | 7 |
| Iskoristivost apsorpcije energije udara | 12 |
| Kapacitet apsorpcijske energije..... | 13 |
| Dijagram apsorbirane energije | 13 |
| 5.STATIČKO TLAČNO ISPITIVANJE | 15 |
| 6.PRIMJENA | 18 |
| 7.EKSPERIMENTALNI DIO..... | 24 |
| 7.1.Statičko tlačno ispitivanje | 26 |
| 7.2.Analiza podataka | 28 |
| 7.2.1.Apsorbirana energija | 31 |
| 7.2.2.Relativno skraćenje | 33 |
| 7.2.3.Tlačno naprezanje | 34 |
| 7.2.4.Iskoristivost | 34 |
| 8.ZAKLJUČAK | 65 |
| LITERATURA..... | 66 |
| PRILOG | 68 |

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1 Prirodni ćelijasti materijali [2] | 1 |
| Slika 2 Metalne pjene s otvorenim porama (lijevo) i zatvorenima porama (desno) [3]..... | 3 |
| Slika 3 Odnos veličine ćelija i relativne gustoće dobivene određenim postupcima [3]..... | 5 |
| Slika 4 Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi[3]..... | 6 |
| Slika 5 Proizvodnje metalne pjene s obzirom na stanje početne sirovine [2] | 6 |
| Slika 6 Paket obložen pjenom [2] | 8 |
| Slika 7 Dijagram naprezanja-deformacije otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) ćelija metalnih pjena [2]..... | 9 |
| Slika 8 Izdvojeni tetrekaidekahedrona (a) i idealni tetrekaidekahedrona (b) [2] | 9 |
| Slika 9 2-D prikaz apsorpcije energije otvorenih ćelija[2] | 10 |
| Slika 10 Dijagram naprezanja-deformacije [2] | 11 |
| Slika 11 Dijagram naprezanja i apsorpcijske iskoristivosti po relativnom skraćenju AlSi pjene [5] | 12 |
| Slika 12 Dijagram apsorbirane energije udara po jedinici volumena AlSi4 pjene različitih gustoća pri tlačnim deformacijama $\varepsilon = 20\%, 30\%, 40\%$ i 60% [5] | 13 |
| Slika 13 Dijagram tlačnog naprezanje AlSi12 metalne pjene različitih gustoća [6]..... | 13 |
| Slika 14 Dijagram naprezanje-deformacija za 2 komercijalne Al pjene [2] | 15 |
| Slika 15 Dijagrama tlačnog naprezanja i tlačne deformacije metalne pjene [5] | 16 |
| Slika 16 Usporedba različitih promjera ćelija na ponašanje pri tlačnom naprezanju [5]..... | 17 |
| Slika 17 Usporedba različitih gustoća na ponašanje pri tlačnom naprezanju [5]..... | 17 |
| Slika 18 Potencijalna primjena metalnih pjena u pojedinim industrijama [7] | 18 |
| Slika 19 Tražena svojstva metalnih pjena u automobilske industriji [8] | 19 |
| Slika 20 Karoserija automobila od metalne pjene [9] | 20 |
| Slika 21 Presjek automobilskih naplataka izrađenih od aluminijske pjene[10]..... | 20 |
| Slika 22 Nosač motora[11]..... | 21 |
| Slika 23 Panel za zaštitu ključne NASA-ine opreme od udara meteorita u svemiru [4] | 22 |
| Slika 24 Upotreba metalnih pjena kao gradivno sredstvo nadvožnjaka [4] | 22 |
| Slika 25 Ograda na autocestama i brzim cestama [4] | 23 |
| Slika 26 Uzorak prije ispitivanja..... | 25 |
| Slika 27 Univerzalna kidalica | 26 |
| Slika 28 Uzorak prilikom tlačenja..... | 27 |
| Slika 29 Računalo povezano s kidalicom..... | 27 |
| Slika 30 Uzorci nakon ispitivanja | 28 |
| Slika 31 Usporedni dijagram svih 12 uzoraka | 29 |
| Slika 32 Područja u dijagramu | 30 |
| Slika 33 Apsorbirana energija u dijagramu [5] | 31 |
| Slika 34 Unos podataka u Graph..... | 32 |
| Slika 35 Iščitanje površine ispod dijagrama u Graph-u..... | 33 |
| Slika 36 Iskoristivost u dijagramu [12] | 35 |
| Slika 37 Apsorbirana energija za $\Delta l=10$ mm | 48 |
| Slika 38 Apsorbirana energija za $\Delta l=20$ mm | 49 |
| Slika 39 Apsorbirana energija za $\Delta l=30$ mm | 50 |
| Slika 40 Apsorbirana energija za $\Delta l=40$ mm | 51 |
| Slika 41 Apsorbirana energija za $\Delta l=50$ mm | 52 |
| Slika 42 Apsorbirana energija za $F=10$ kN | 53 |
| Slika 43 Apsorbirana energija za $F=20$ kN | 54 |
| Slika 44 Apsorbirana energija za $F=30$ kN | 55 |
| Slika 45 Apsorbirana energija za $F=40$ kN | 56 |

| | |
|--|----|
| Slika 46 Apsorbirana energija za $F=50$ kN | 57 |
| Slika 47 Iskoristivost za $F=10$ kN | 58 |
| Slika 48 Iskoristivost za $F=20$ kN | 59 |
| Slika 49 Iskoristivost za $F=30$ kN | 60 |
| Slika 50 Iskoristivost za $F=40$ kN | 61 |
| Slika 51 Iskoristivost za $F=50$ kN | 62 |
| Slika 52 Iskoristivost za $F=60$ kN | 63 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1 Ispitni uzorci..... | 25 |
| Tablica 2 Uzorak 4 brzi ($\rho_r=0,186$)- skraćenje..... | 36 |
| Tablica 3 Uzorak 4 brzi ($\rho_r=0,186$)- sila | 36 |
| Tablica 4 Uzorak 4 spori ($\rho_r=0,202$)- skraćenje | 37 |
| Tablica 5 Uzorak 4spori ($\rho_r=0,202$)- sila | 37 |
| Tablica 6 Uzorak 4,5 spori ($\rho_r=0,223$)- skraćenje | 38 |
| Tablica 7 Uzorak 4,5spori ($\rho_r=0,223$)- sila | 38 |
| Tablica 8 Uzorak 4,5 brzi ($\rho_r=0,225$)- skraćenje..... | 39 |
| Tablica 9 Uzorak 4,5 brzi ($\rho_r=0,225$)- sila | 39 |
| Tablica 10 Uzorak 5 brzi ($\rho_r=0,234$)- skraćenje..... | 40 |
| Tablica 11 Uzorak 5 brzi ($\rho_r=0,234$)- sila | 40 |
| Tablica 12 Uzorak 5 spori ($\rho_r=0,246$)- skraćenje | 41 |
| Tablica 13 Uzorak 5 spori ($\rho_r=0,246$)- sila | 41 |
| Tablica 14 Uzorak 4 brzi 4 ($\rho_r=0,2$)- skraćenje..... | 42 |
| Tablica 15 Uzorak 4 brzi 4 ($\rho_r=0,2$)- sila | 42 |
| Tablica 16 Uzorak 5 brzi 4 ($\rho_r=0,268$)- skraćenje..... | 43 |
| Tablica 17 Uzorak 5 brzi 4 ($\rho_r=0,268$)- sila | 43 |
| Tablica 18 Uzorak 4,5 brzi 3 ($\rho_r=0,226$)- skraćenje..... | 44 |
| Tablica 19 Uzorak 4,5 brzi 3 ($\rho_r=0,226$)- sila | 44 |
| Tablica 20 Uzorak 4,5 brzi 4 ($\rho_r=0,217$)- skraćenje..... | 45 |
| Tablica 21 Uzorak 4,5 brzi 4 ($\rho_r=0,217$)- sila | 45 |
| Tablica 22 Uzorak 5 brzi 3 ($\rho_r=0,248$)- skraćenje..... | 46 |
| Tablica 23 Uzorak 5 brzi 3 ($\rho_r=0,248$)- sila | 46 |
| Tablica 24 Uzorak 4 brzi 3 ($\rho_r=0,194$)- skraćenje..... | 47 |
| Tablica 25 Uzorak 4 brzi 3 ($\rho_r=0,194$)- sila | 47 |

Popis oznaka

A- površina, mm²

a*- negativna akceleracija, m/s²

d- početni promjer uzorka, mm

E_f- iskoristivost, %

F-sila, N

F_{max}(S)- maksimalna sila elastične deformacije, N

h- debljina, mm

l- visina uzorka, mm

L₀- početna visina uzorka, mm

ΔL- skraćenje, mm

m- masa, kg

m- eksponent metalne pjene (1,5-2)

R_e- granica tečenja materijala pjene, MPa

R_{et}- granica stlačivanja, MPa

s- skraćenje, mm

S- površina, mm²

S₀- ploština poprečnog presjeka, mm²

v- brzina, m/s

V- volumen, mm³

W- apsorpcija po jedinici volumena, J

α₁- koeficijent materijala stjenke metalne pjene

ε- deformacija, relativno skraćenje, %

ε_D- deformacija pri zgušnjavanju, %

η- iskoristivost apsorbirane energije

ρ- gustoća metalne pjene, kg/m³

ρ_r- relativna gustoća

ρ_s- gustoća neporoznog materijala, kg/m³

σ- tlačno naprezanje, N/mm²

σ_{et}- naprezanje stlačivanja, N/mm²

SAŽETAK

Zbog relativno malog broja istraživanja i podataka aluminijske pjene spadaju pod relativno novu vrstu materijala. Veliki interes i razvoj ove vrste materijala je sve veći upravo zbog mogućnosti kombinacije određenih svojstava pogodnih za široku tehničku primjenu. Najzanimljivije svojstvo koje aluminijske pjene posjeduju, zbog specifične strukture, je mogućnost apsorpcije velike količine energije.

Upravo je to cilj ovog diplomskog rada, pratiti deformaciju uzoraka izrađenih od aluminijske pjene. Uz pomoć dobivenih podataka dovesti u vezu gustoću aluminijske pjene potrebne za izradu uzoraka i optimalnu iskoristivost odnosno apsorpciju energije.

Ključne riječi: aluminijske pjene, deformacija, apsorpcija energije

SUMMARY

Due to low amount of research and data, aluminum foams are considered relatively new type of material. Growing interest and development is present because of its very attractive combination of properties that can be tailored according to the application. The most interesting property, due to specific structure, is ability to absorb great amount of energy.

The main purpose of this final thesis is to monitor compression of aluminum foam samples. The idea is to use collected data and link ideal density of foam, used for production of samples, and exploitation i.e. energy absorption.

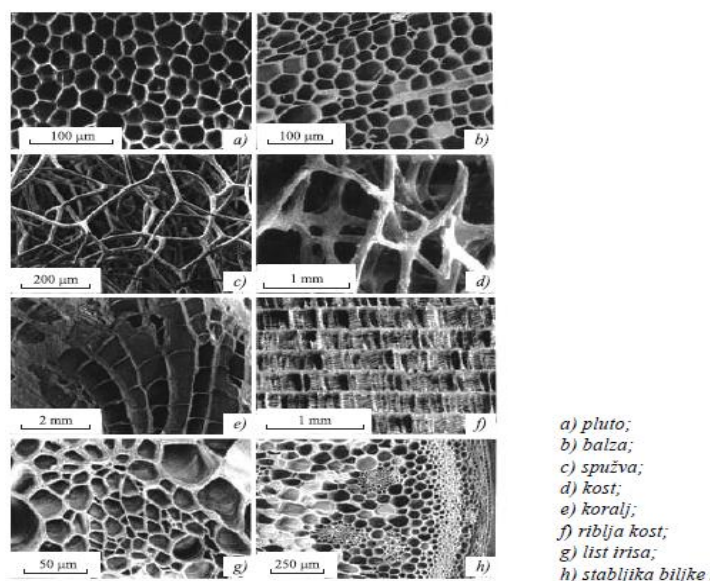
Key words: aluminium foams, deformation, energy absorption

1.UVOD

Ideja proizvodnje metalnih pjena potekla je od ćelijastih materijala odnosno struktura koje pronalazimo u prirodi: spužve, koralji, kosti drvo itd.. One su relativno nova vrsta materijala s obzirom na to da su konkretna istraživanja metalnih pjena započeta tek prije 20-tak godina. Svrha konstantnog razvoja ove vrste materijala je kako bi se omogućilo dobivanja optimalne kombinacije svojstava za tehničku primjenu. Jedan od glavnih problema predstavlja nedovoljna količina podataka o parametrima za proces proizvodnje metalnih pjena. Zbog toga ne postoji kontrola nad dobivanjem željene i ujednačene strukture, a samim time i svojstvima konačnog materijala.

Prednosti ove vrste materijala u usporedbi s drugim konstrukcijskim materijalima su, [1]:

- mala masa i gustoća
- visoka poroznost (40%-90%),
- mogućnost toplinske prilagodljivosti ovisno o strukturi (otvorene ili zatvorene ćelije)
- prigušenje energije udara, vibracija
- vatrootpornost
- dobra električna vodljivost
- relativno visoka krutost sendvič konstrukcije
- netoksičnost
- recikličnost



Slika 1 Prirodni ćelijasti materijali [2]

2.GRAĐA I STRUKTURA

Struktura pjena je opisana uz pomoć sljedećih parametara, [2]:

1. oblik ćelije
2. vrsta ćelije
3. veličina ćelije
4. stupanj anizotropije
5. vrsta materijala
6. relativna gustoća; omjer gustoće pjene i gustoće metala ćelije

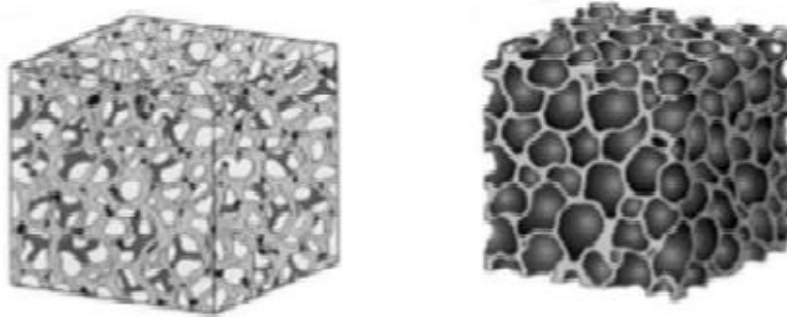
Dobivena struktura i građa materijala igra važnu ulogu u određivanju, ali i mogućoj primjeni aluminijskih pjena. S obzirom na to da je ova vrsta materijala još uvijek u fazi istraživanja što predstavlja ograničavajući faktor za proizvodnju točno željene strukture pjene. [2]

Metalne pjene se mogu dobiti u nekoliko oblika:

- ćelijasti materijali- unutar metalne mase nalaze se disperzirane plinom ispunjene šupljine
- čvrste metalne pjene- poseban oblik ćelijastih metala koji nastaju od tekućih metalnih pjena i imaju ograničenu morfologiju. Ćelije su okrugle zatvorene i poliedarskog oblika i odvojene su jedne od drugih tankim slojem
- porozni metali- predstavljaju također posebnu vrstu ćelijastih metala koji se sastoji od određenog tipa šupljina. Poroznost metalnih pjena se kreće u rasponu od 50%-90%, dok su pore okrugle i odvojene jedne od drugih
- metalne spužve- morfologija ćelijastih metala s međusobno povezanim šupljinama

[2]

Također važna strukturna podjela aluminijski pjena je prema otvorenim odnosno zatvorenima porama. Pjene s otvorenim ćelijama zbog svojih odličnih toplinskih svojstava koriste za u izmjenjivačima topline čime se povećava prijenos topline uz dodatno smanjenje tlaka. Tako ujedno smanjuju i veličinu samog izmjenjivača topline što ima izravnu vezu sa smanjenje cijene proizvodnje. Pjene s jako sitnim i finim otvorenim ćelijama koriste se kao visokotemperaturni filteri u kemijskoj industriji. [2]



Slika 2 Metalne pjene s otvorenim porama (lijevo) i zatvorenima porama (desno) [3]

3. PROIZVODNJA

U procesu proizvodnje pjena, zbog već spomenute rane faze razvitka u kojoj se nalazi, postoje određeni nedostaci. Stoga je do danas ustanovljeno 9 načina proizvodnje pjena, a ti načini su podijeljeni na 4 glavna područja.[2]

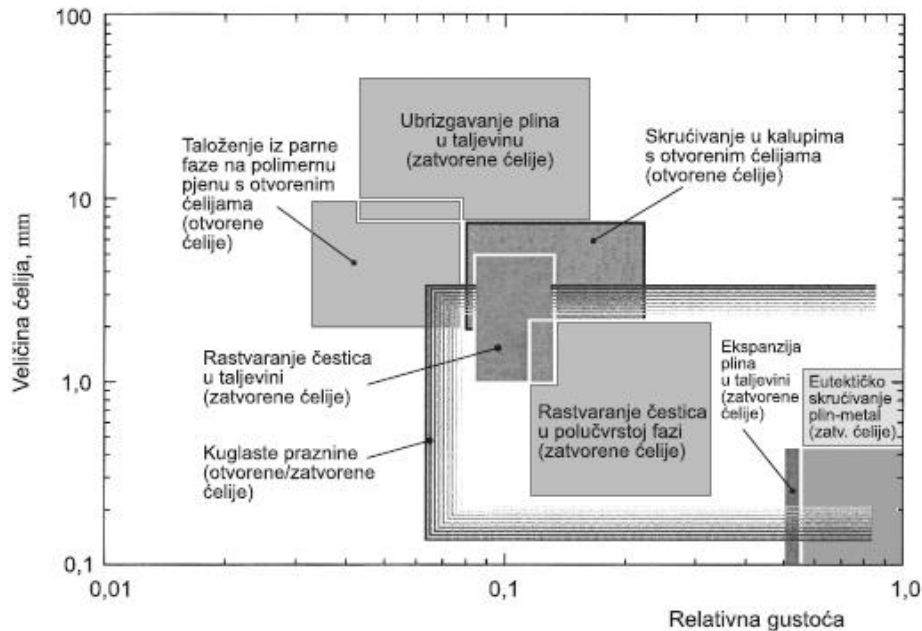
- Oblikovanje pjene u čvrstoj fazi
- Oblikovanje pjene u rastaljenoj fazi
- Oblikovanje pjene iz parne faze
- Oblikovanje pjene elektrotaloženjem iz tekuće faze

Ovisno o odabiru jednog od usavršenih postupaka proizvodnje pjene postojat će određeni utjecaj na veličinu, stupanj otvorenosti i oblik ćelije, ali i relativnu gustoću. [2]

Postoje 9 načina proizvodnje metalne pjene sparene s vrstom metala od kojih se pjena može proizvesti:

1. Dodavanje agensa (TiH_2) u taljevinu aluminija, agens se raspada pri određenom tlaku i temperaturi te tvori mjehuriće (Al)
2. Ubrizgavanje plina u taljevinu legura Al-SiC i Al- Al_2O_3 (Al, Mg)
3. Miješanje reagensa (TiH_2) i metalnog praha nakon čega se zagrijava i potom oslobađa mjehuriće u taljevinu te dolazi do stvaranja pjene (Al, Zn, Fe, Pb, Au)
4. Ubrizgavanje pod tlakom metalne taljevine u kalup od polimerne pjene ili voska koji je premazan keramičkim prahom (Al, Mg, Ni-Cr, Cu, nehrđajući čelik)
5. Otapanje plina (najčešće H_2) u taljevinu pod visokim tlakom. Porozni materijal nastaje eutektičkom reakcijom plina i metala (Al, Cu, Ni)
6. Kemijsko taloženje metala iz parne faze u kalup od polimerne pjene koji se kasnije uklanja izgaranjem (Ni, Ti)
7. Spajanje dvaju materijala u obliku praha od kojih je jedan topljiv. Otopljiva komponenta uklanja se otapalom i ostaje metalna porozna građa (Al+ sol u obliku praha)

8. HIP postupkom inertni plin pod visokim tlakom biva zarobljen u porama. Povišenjem temperature dolazi do ekspanzije plina (Ti)
9. Kuglaste šupljine koje nastaju procesom atomizacije ili taloženja iz parne faze na polimerne kugle (Ni, Co, Ni-Cr legure) [2]



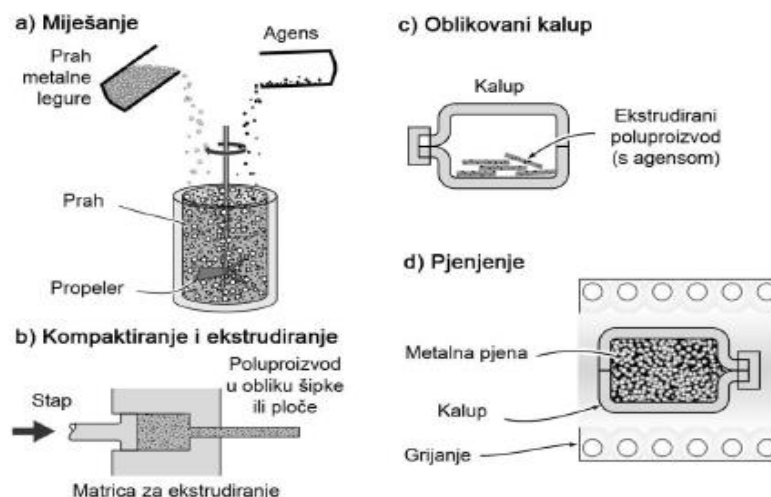
Slika 3 Odnos veličine ćelija i relativne gustoće dobivene određenim postupcima [3]

Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi

Ovaj postupak proizvodnje pripada postupcima dobivanja pjena u rastaljenoj fazi zbog toga što se upjenjivanje odvija u rastaljenom stanju. [3]

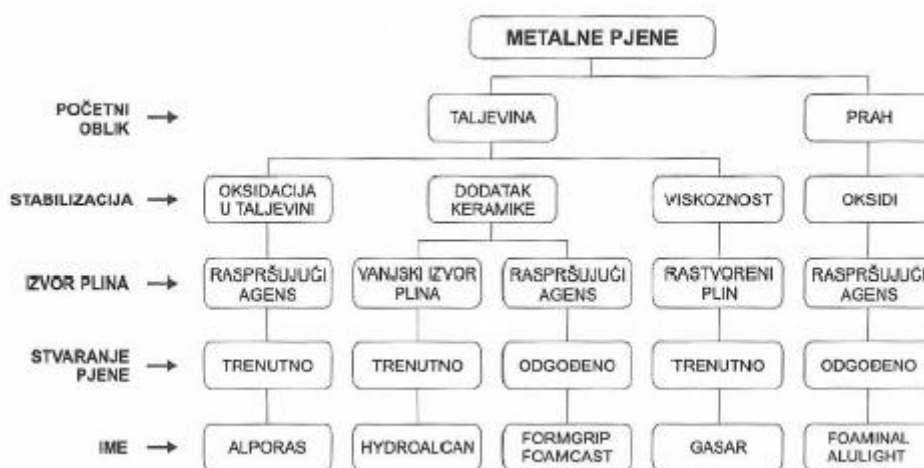
Koraci procesa

1. Miješanje metalnog praha s agensom koji je najčešće TiH_2 (pospješuje pjenjenje)
2. Kompaktiranje smjese metalnog praha i agensa do određene čvrstoće u oblika pločica. Agens je potrebno sabiti u metalnu matricu jer moguća poroznost bi dala loše rezultate tijekom daljnje obrade.
3. Pločice se zagrijavaju na temperaturu solidusa legure. Zbog povišene temperature ugrađeni agens se rastvara na Ti i plinoviti H_2 što dovodi do širenja i oblikovanja u visoko porozni materijal. [3]



Slika 4 Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi[3]

Podjela postupaka proizvodnje metalne pjene s obzirom na stanje početne sirovine



Slika 5 Proizvodnje metalne pjene s obzirom na stanje početne sirovine [2]

4. APSORPCIJA ENERGIJE

Sposobnost apsorpcije energije udara važna je karakteristika čelijastih materijala. Upravo to svojstvo nalazi svoju primjenu u automobilske industriji odnosno u izradi dijelova koji su izloženi udarnim opterećenjima, kao što su branici, nosači motora. Kada govorimo o pasivnoj sigurnosti vozila tada pravila nalažu da se energija udara dijeli po postavljenim područjima. Pa tako u donjem rasponu, 3-10 km/h energija udara se apsorbira bez deformacija upotrebom elastičnih materijala ili primjenom hidrauličkih sistema. U srednjem rasponu do 20 km/h dolazi do kontrolirane deformacije za to predviđenih elemenata. Upravo iz tog razloga ti elementi su lako izmjenjivi i popravak vozila je ekonomski prihvatljiv, dok u gornjem rasponu brzina rezultira puno većom štetom, a šasija vozila se bespovratno deformira. [4]

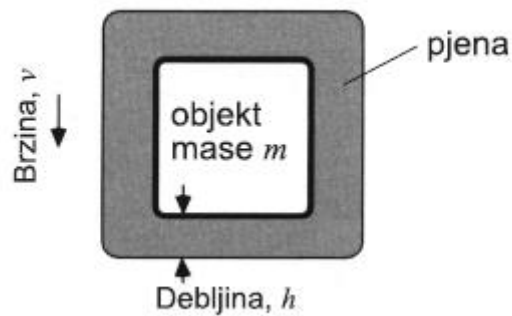
Postoje različite vrste sudara:

1. frontalni
2. bočni
3. prevrtanje [4]

Elementi koji su predviđeni da apsorbiraju energiju udara različito se deformiraju prilikom određene vrste sudara. Iz tog razloga moraju zadovoljiti sljedeće uvjete

1. Idealna svojstva apsorpcije energije
2. Visoki kapacitet apsorpcije po volumenu, dužini ili masi
3. Izotropna svojstva apsorpcije energije

Još jedna mogućnost primjene čelijastih materijala zbog vrlo dobre sposobnosti apsorpcije energije je za dobivanje ambalaže za pakiranje. [4]



Slika 6 Paket obložen pjenom [2]

Na slici 6 je prikazan paket mase m , okružen pjenom debljine h , koji može podnijeti kritično usporenje a^* . Maksimalna dopuštena sila iznosi:

$$F = m \times a^* \quad (1)$$

a^* - negativna akceleracija

[2]

Iznos površine pjene i paketa iznosi A , pa sila pri kojoj će doći do uništenja pjene iznosi:

$$F = \sigma_{et} \times A \quad (2)$$

σ_{et} – naprezanje stlačivanja

[2]

iz čega možemo izračunati potrebnu granicu stlačivanja pjene

$$R_{et} \leq \frac{m \times a^*}{A} \quad (3)$$

[2]

dok se apsorpcija po jedinici volumena W računa kao:

$$W = R_{et} \times \varepsilon_D \quad (4)$$

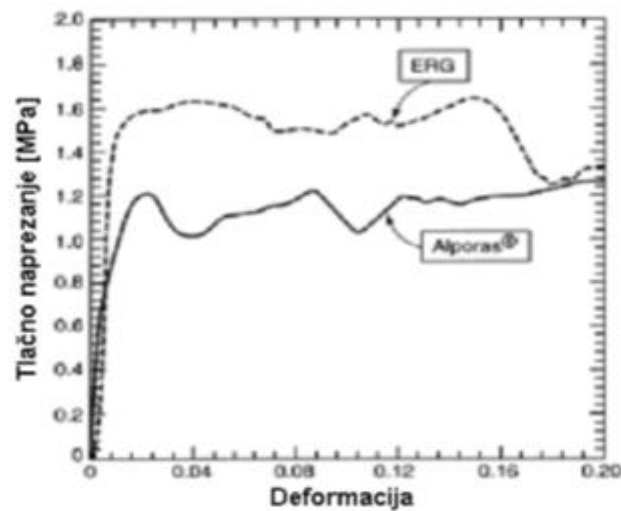
[2]

Važan podatak određivanja debljine pjene koja se nalazi oko paketa koja je nužna kako bi apsorbirala kinetičku energiju:

$$h = \frac{1}{2} \times \frac{mv^2}{R_{et} \varepsilon_D A} \quad (5)$$

[2]

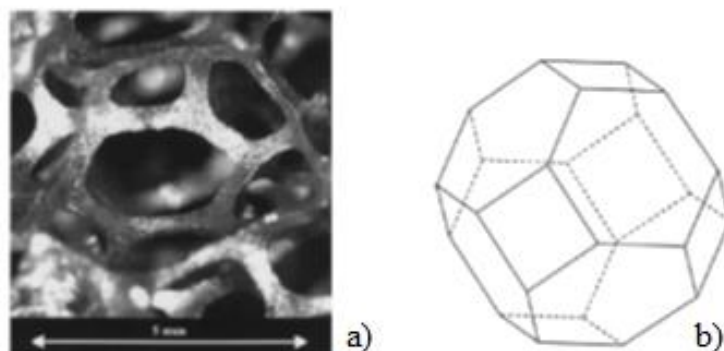
Za primjenu u konstrukcijama, češće se koriste pjene sa zatvorenim ćelijama. Razlog tomu je što su kruće u usporedbi s pjenama otvorenih ćelija iste gustoće. [2]



Slika 7 Dijagram napreznja-deformacije otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) ćelija metalnih pjena [2]

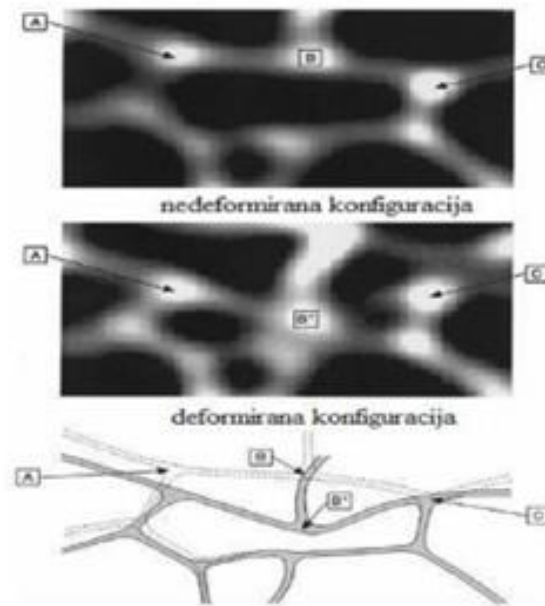
Sa slike 7 je jasno vidljivo da je površina ispod grafa, što predstavlja količinu apsorbirane energije, veća za otvorene ERG pjene u odnosu na zatvorene Alporas pjene. Skokovi u vrijednostima tlačnog napreznja tijekom rasta deformacije u vezi je s pucanjem veza koje povezuju pjenu pod tlačnim opterećenjem. Razlog češćeg loma veza kod pjena zatvorenih ćelija je u tome što imaju nepravilan raspored, dok otvorene ćelije imaju pravilniji i uređeniji oblik. [2]

Zbog oblika svoje strukture odnosno ćelija, metalne pjene su sposobne apsorbirati energiju u svim smjerovima. Oblik može biti opisan matematičkim modelom poliedra tetreakaidekahedrona. Zbog toga nije osjetljiv na smjer napreznja odnosno izotropan je. Iako se u teoriji opisuje tim matematičkim modelom, u stvarnosti uvijek postoje nepravilnosti s obzirom na veličinu i orijentaciju ćelija. Najčešći uzrok toga je smjer agensa za pjenjenje. [6]



Slika 8 Izdvojeni tetreakaidekahedrona (a) i idealni tetreakaidekahedrona (b) [2]

Za jednostavnije razumijevanje, efekt apsorpcije energije je analogan ponašanju lisnate opruge.



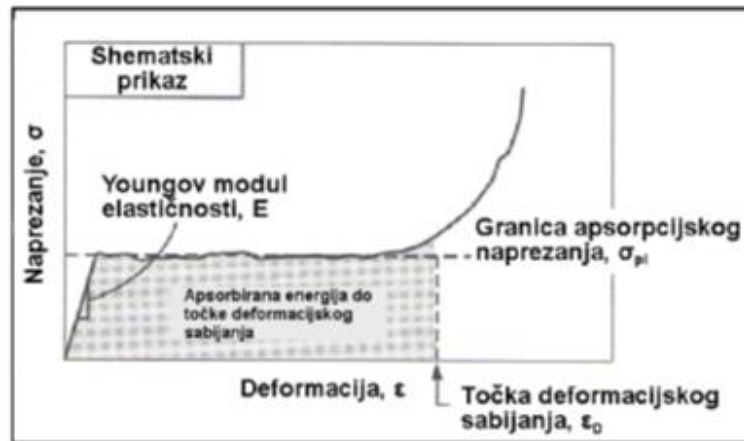
Slika 9 2-D prikaz apsorpcije energije otvorenih ćelija[2]

Na slici 9 je u 2-D prikazana struktura pjene s otvorenim ćelijama prije i nakon deformacije. U slučaju kada je točka B pod opterećenjem, i kada je pjena u elastičnoj zoni, nakon apsorpcije energije točka B vratit će se u početni položaj. U slučaju dosezanja plastičnog područja odnosno kada točka B pređe u položaj točke B*, osim vidljive deformacije također će obaviti svoju funkciju apsorpcije energije udara.[2]

Dva ključna faktor za određivanje količine apsorbirane energije su:

1. Relativna gustoća metalne pjene
2. Porozitet metalne pjene [2]

Relativna gustoća predstavlja debljinu tzv. „ligamenta“ odnosno spojnice dvaju čvorova ćelija. Što je spojnica deblja, ćelija može primiti veću količinu energije. Pjene s manjom veličinom pora imaju više materijala i veću površinu što za posljedicu ima veću količinu apsorbirane energije u usporedbi s pjenama većih pora. [2]



Slika 10 Dijagram napreznja-deformacije [2]

Na slici 10 je prikazan dijagram napreznja-deformacije idealne metalne pjene. Sivo osjenčano područje ispod granice apsorpcijskog napreznja i do točke deformacijskog sabijanja predstavlja količinu apsorbirane energije. Ponašanje metalnih pjena može se oblikovati u skladu s traženim zahtjevima u primjeni, odabirom određene legure i gustoće pjene. [2]

Metode određivanja apsorpcije energije udara, [5]:

1. Analitičke metode
2. Eksperimentalne metode

Podjela osnovnih analitičkih metoda, [5]:

1. Iskoristivost apsorpcije energije udara
2. Kapacitet apsorpcijske energije
3. Dijagram apsorbirane energije

Iskoristivost apsorpcije energije udara

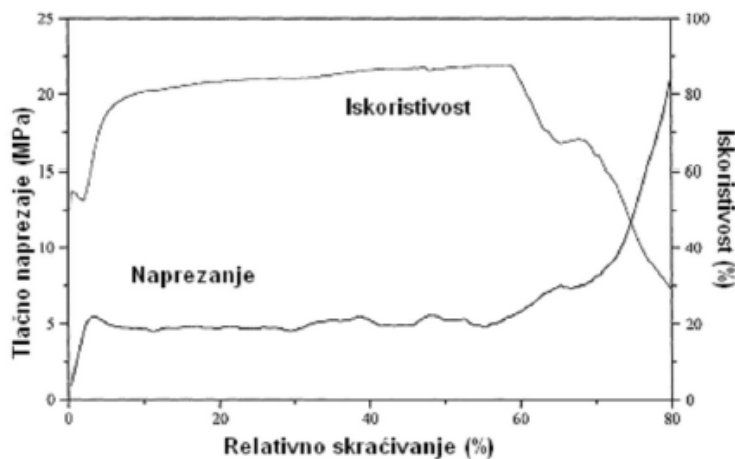
Uspoređuje se dobivena apsorbirana deformacijska energija materijala s idealnim apsorpcijskim materijalom. Za idealni apsorpcijski materijal se smatra onaj materijal koji se opterećen tlačnom silom tijekom cjelokupnog procesa deformira uz konstantno naprezanje. η predstavlja omjer apsorbirane energije dobivene ispitivanjem materijala i apsorbirane energije idealnog materijala, [5].

$$\eta = \frac{\int_0^S F(s') ds'}{F_{max}(s)s} \quad (6)$$

gdje je:

$F_{max}(s)$ - maksimalna sila elastične deformacije (N)

s- skraćenje (mm)

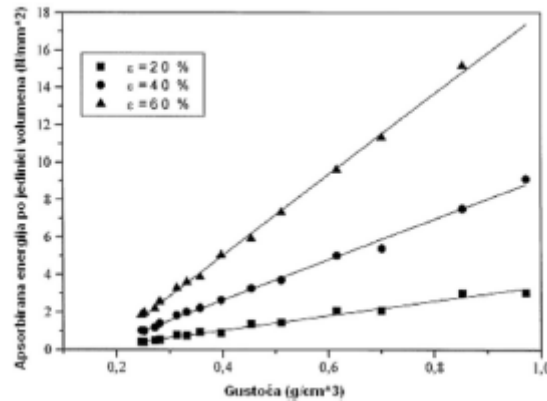


Slika 11 Dijagram naprezanja i apsorpcijske iskoristivosti po relativnom skraćivanju AlSi pjene [5]

Optimalno opterećenje metalnih pjena je moguće sve dok iskoristivost drži određenu konstantnu vrijednost. Iskoristivost nije dovoljan uvjet za odabir materijala u eksploataciji pri udarnom opterećenju. [5]

Kapacitet apsorpcijske energije

Za pravilan odabir ćelijastih materijala nužna je usporedba kapaciteta apsorbirane energije. [6]

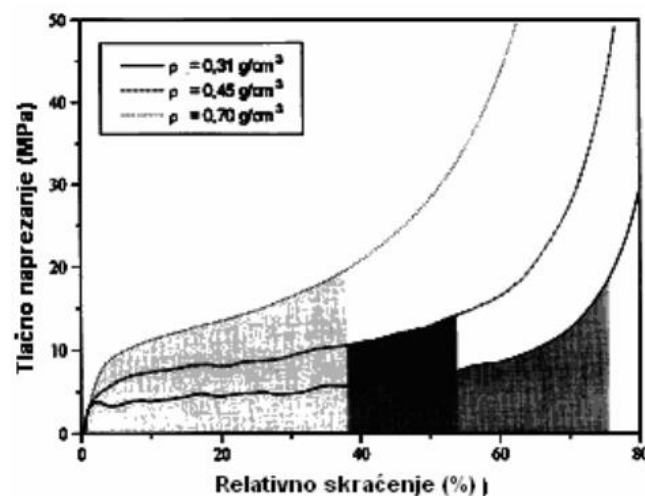


Slika 12 Dijagram apsorbirane energije udara po jedinici volumena AlSi4 pjene različitih gustoća pri tlačnim deformacijama $\varepsilon = 20\%, 30\%, 40\%$ i 60% [5]

Sa slike 12 je jasno vidljiv veći kapacitet pjena s većom gustoćom u odnosu na pjene s manjom gustoćom. [5]

Dijagram apsorbirane energije

Maiti S.K. i Gibson L.J. osmislili su metodu odabira idealnog materijala za apsorpciju energije udara. Njihova pretpostavka se temeljila na tome da najpogodniji ćelijasti materijal apsorpira energiju uz minimalno naprezanje. [6]



Slika 13 Dijagram tlačnog naprezanja AlSi12 metalne pjene različitih gustoća [6]

Na slici 13 je označena jednaka količina apsorbirane energije za AlSi12 pjenu pri različitoj gustoći. Ovim načinom moguće je utvrđivanje gustoće pjene s najnižim maksimalnim naprežanjem za traženu udarnu energiju. [6]

Podjela eksperimentalnih metoda

1. Statički tlačni pokus
2. Dinamički tlačni pokus

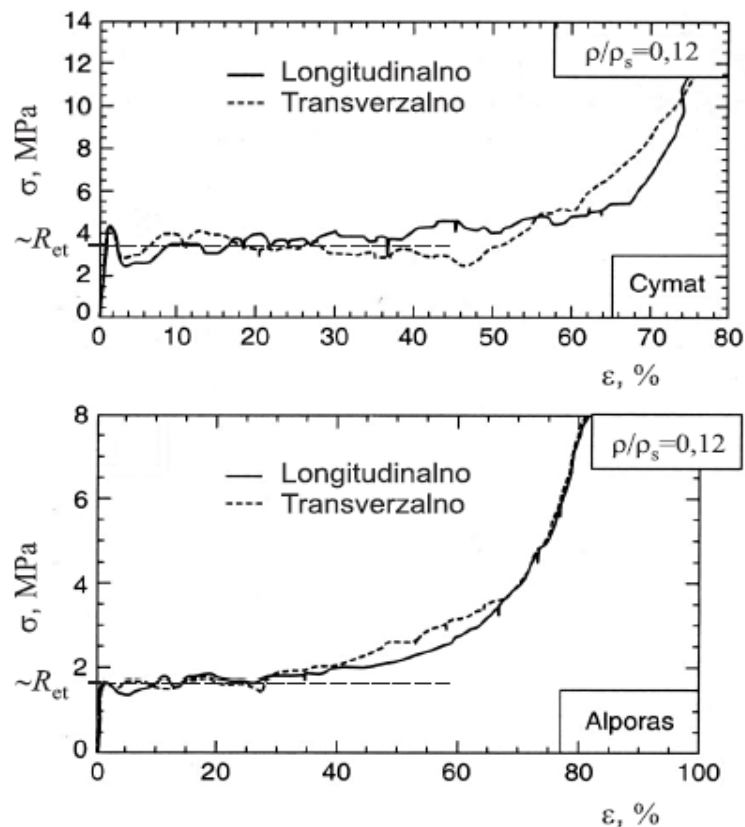
Zbog rane faze istraživanja u kojoj se nalaze ćelijasti materijali druge eksperimentalne metode nisu dovoljno pouzdane. [5]

5.STATIČKO TLAČNO ISPITIVANJE

Tlačno ispitivanje metalnih pjena izvodi se najčešće na kidalici. Izvođenjem ispitivanja uslijed djelovanja jednoosnog tlačnog naprezanja na uzorak dobiva se dijagram naprezanje-deformacija. Ispitni uzorci od metalne pjene su najčešće cilindričnog ili četvrtastog oblika, no zbog nedovoljne količine podataka metode i dimenzije uzoraka još uvijek nisu standardizirane. Ispitivanje se uobičajeno odvija pri brzini od oko 10mm/min ali može i pri manjoj. [5]

Ispitivanja se uglavnom provode na aluminijskim i niklenim pjenama s obzirom na to da su one u najvećoj količini prisutne u primjeni.

Od aluminijskih pjena najpoznatije koje se proučavaju su CYMAT, ALPORAS, ERG Duocel, ALULIGHT i IFAM.



Slika 14 Dijagram naprezanje-deformacija za 2 komercijalne Al pjene [2]

Prema slici 15 krivulju možemo podijeliti na 3 glavna područja

1. Gotovo linearna ovisnost naprezanja o deformaciji
2. Deformacija uz konstantno naprezanje
3. Nagli rast naprezanja uslijed sabijanja ćelija [5]



Slika 15 Dijagrama tlačnog naprezanja i tlačne deformacije metalne pjene [5]

U prvom području, početno opterećenje dovodi do elastične deformacije, nagib „pravca“ je manji od onoga koji opisuje stvarni modul elastičnosti. Razlog tome je što neke ćelije unutar materijala počinju teći već pri niskom opterećenju što se uobičajeno pojavljuje u području niže lokalne gustoće u samom uzorku.

Ulaskom u drugo područje iznos naprezanja se gotovo ustali, a valovit oblik krivulje pripisuje se dodatnim popuštanjem susjednih nivoa sve do sabijanja uzorka.

Zadnje područje karakterizira nagli porast iznosa naprezanja kao posljedica potpunog sabijanja uzorka.

Metalne pjene s otvorenim ćelijama imaju puno bolje definiranu granicu stlačivanja, dok se ponašanje pjena sa zatvorenima ćelijama odvija složenije.[2]

Veza granice stlačivanja, deformacije zgušnjavanja i relativne gustoće glasi:

$$R_e = (0,25 - 0,35) \times R_e \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^m \quad \epsilon_D \approx \left(1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (7)$$

gdje je:

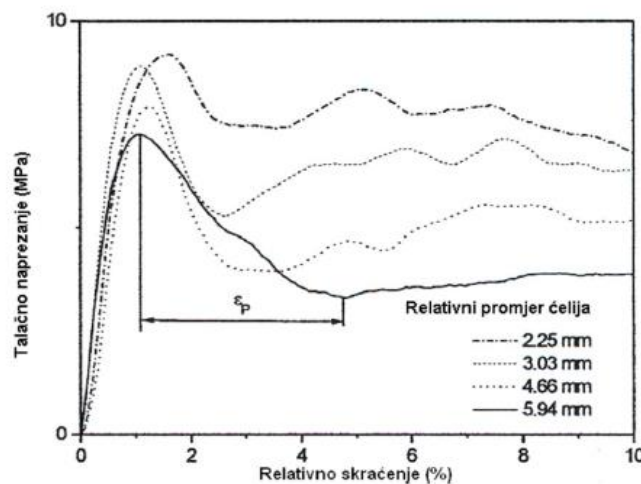
R_e - granica tečenja materijala pjene

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

α_1 - 1,4 do 2,0

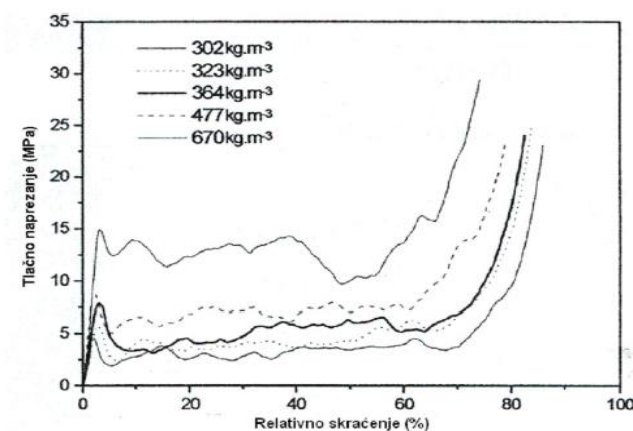
[2]

Smanjenje promjera ćelija pozitivno utječe na povećanje granice stlačivanja kod metalnih pjena. [5]



Slika 16 Usporedba različitih promjera ćelija na ponašanje pri tlačnom naprezanju [5]

Veći učinak na povećanje granice stlačivanja ima gustoća ispitnog uzorka, odnosno povećanjem gustoće povećava se i granica stlačivanja metalnih pjena- R_{et} [5]



Slika 17 Usporedba različitih gustoća na ponašanje pri tlačnom naprezanju [5]

6.PRIMJENA

Primjena svih pa tako i ćelijastih materijala odnosno pjena ovisi o kombinaciji svojstava koje posjeduju. Zbog rane faze razvoja primjena metalnih pjena nije previše raširena no postoji potencijal za iskorištavanje i primjenu metalnih pjena u gotovo svim granama industrije. [2]



Slika 18 Potencijalna primjena metalnih pjena u pojedinim industrijama [7]

Sa slike 18 je vidljivo da transportna industrija prednjači nad ostalim industrijama u pogledu potencijalne primjene metalnih pjena.

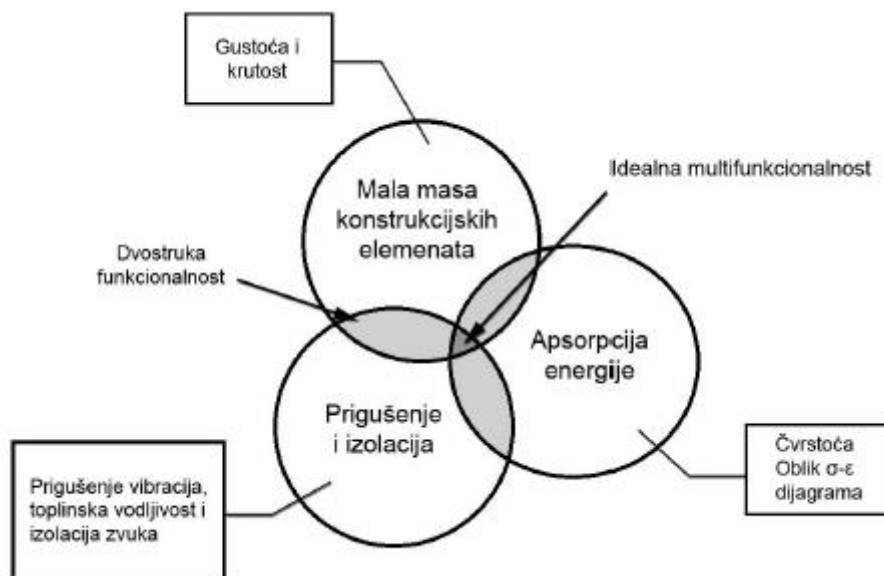
[7]

Kriteriji koji moraju biti zadovoljeni kako bi odgovarajuća metalna pjena bila primijenjena za rješavanje određenog konstrukcijskog problema:

1. Morfologija- veličina ćelije, volumen ćelije, vrsta ćelije (otvorena ili zatvorena)
2. Metalurški čimbenici- odgovarajući metal i tražena mikrostruktura
3. Proizvodnja- mogućnost proizvodnje i oblikovanja pjene u traženi oblik
4. Ekonomičnost- isplativost za velikoserijsku proizvodnju

[8]

Pojavom novih trendova u automobilskoj industriji povećala se potražnja za manjim kompaktnijim gradskim automobilima. S obzirom na to da se što manje želi utjecati na komfor putnika dolazi do smanjenja dimenzija preostalih automobilskih dijelova. Proizvođači konstruiraju manje pogonske agregate, što dovodi do problema s rasipanjem topline u predjelu pogonskog agregata. Zbog postojećih zahtjeva za smanjenje zvuka i vibracija tražila se primjena neke nove vrste materijala. Smanjenjem konstrukcije vozila bitno se utjecalo na sigurnosne propise koji moraju biti zadovoljeni. Kako se ne bi povećala količina ugrađenog materijala u svrhu zadovoljavanja sigurnosnih zahtjeva, time i ukupno masa što bi između ostalog imali direktnu vezu s povećanjem potrošnje, proizvođači su morali pronaći drugo rješenje. [4]



Slika 19 Tražena svojstva metalnih pjena u automobilskoj industriji [8]

S obzirom na dobru apsorpciju energije koja bi omogućila zadovoljavanje visokih sigurnosnih uvjeta, mala masa zbog visoke poroznosti i mogućnost prigušenja zvukova i vibracija metalne pjene predstavljaju mogući odgovor za tražene uvjete automobilske industrije.

Aluminijske pjene su podvrgnute testu usporedbe s konvencionalnim materijalima s optimiziranom masom kao što su npr. ekstrudirani aluminijski profili.

Pokazalo se da su aluminijske pjene bolje rješenje zbog, [8]:

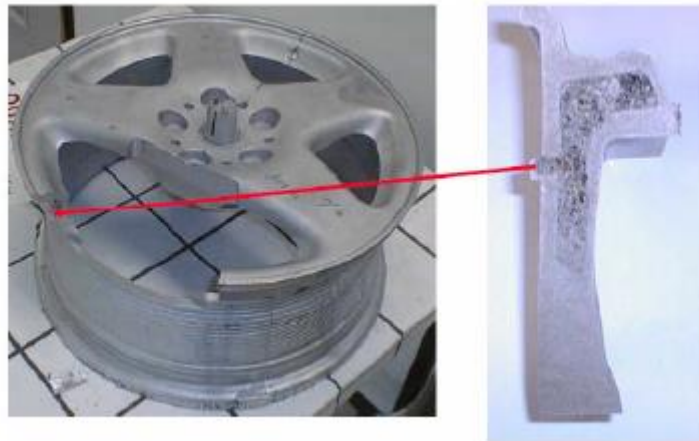
1. Lakše i jeftinije proizvodnje kompliciranih geometrija
2. Bolje podnose jake udarce
3. Dodatno korisno svojstvo; toplinska i zvučna izolacija

Određeni dijelovi automobila kao što su poklopac motora i prtljažnika mogu se proizvesti od aluminijskih pjena što bi pridonijelo smanjenju mase i zadovoljila potrebna krutost, ali i izbjeglo prenošenje vibracija. [4]



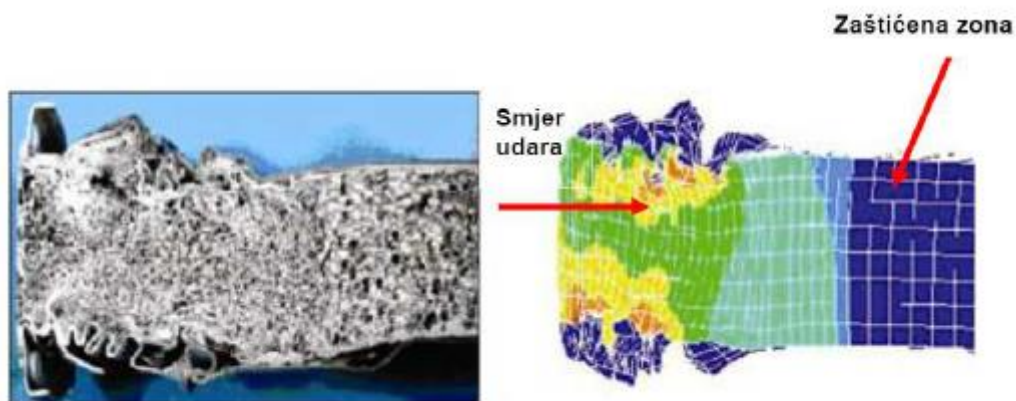
Slika 20 Karoserija automobila od metalne pjene [9]

Moguća je primjena i u izradi aluminijskih naplataka što dodatno utječe na smanjenje ukupne mase vozila i prigušuje vibracije tijekom vožnje.



Slika 21 Presjek automobilskih naplataka izrađenih od aluminijske pjene[10]

Metalne pjene u automobilskoj industriji najčešće se koriste u obliku sendvič konstrukcije što pozitivnu utječe na apsorpciju energije udara. Jedno takvo ispitivanje provedeno je u BMW-u. Napravljeno je udarno testiranje nosača motora izrađenog s jezgrom od metalne pjene. Masom od 885 kg pri 30 km/h izvršeno je ispitivanje. Nakon analize dobivenih podataka vidljivo je da je gustoća pjene nehomogeno raspoređena u aksijalnom smjeru zbog udara. [3]



Slika 22 Nosač motora[11]

Nosač je bio izrađen kao sendvič ploča gdje su vanjski limovi bili od čelika, a jezgra od AlSiMg pjene. [11]

Kako u automobilskoj tako i u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji bitnu stavku predstavlja mogućnost smanjenja mase. U usporedbi s dosad korištenim sačastim strukturama koje su jako skupe, aluminijske pjene su se pokazale kao još bolji izbor uz nižu cijenu. Također važna prednost aluminijskih pjena nad konvencionalnim materijalima korištenim u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji su dobra svojstva u sve tri dimenzije, ali i mogućnost izrade bez upotrebe ljepila što bitno utječe na zadržavanje integriteta materijala u slučaju požara. U svemirskoj industriji može poslužiti za konstrukciju dijelova platformi za slijetanje svemirskih letjelica. [4]



Slika 23 Panel za zaštitu ključne NASA-ine opreme od udara meteorita u svemiru [4]

U građevinskoj industriji postoji velika mogućnost primjene metalnih pjena. Jedan od primjera su rukohvati balkona. Konvencionalni materijali stvaraju probleme u slučaju požara, a imaju i puno veću masu od pjena. Unatoč niskom talištu aluminija, aluminijske pjene su vrlo stabilne u slučaju otvorenog plamena. Moguća je primjena i u konstrukciji dizala. Tako bi se smanjila masa što pozitivno utječe na potrošnju energije. Ukoliko bi se upotrijebile u sigurnosne svrhe mogu poslužiti kao elementi za apsorpciju energije u slučaju opasnosti od pada dizala. [4]

Antivibracijska svojstva i apsorpcija zvuka metalnih pjena također može poslužiti kao rješenje u izradi nadvožnjaka. [4]



Slika 24 Upotreba metalnih pjena kao gradivno sredstvo nadvožnjaka [4]

Pogodna unutarnja struktura metalnih pjena za apsorpciju zvuka je ako su pore spojene malim kanalima. Prolaskom zvuka kroz strukturu pjene tlači zrak u uskim kanalima određeni broj puta. Uslijed određenih mehanizama koji dovode do smanjenja i rasipanja energije zvuka, metalna pjena apsorbira do 99% buke najčešće na frekvenciji 1-5 kHz. [4]



Slika 25 Ograda na autocestama i brzim cestama [4]

Još jedan primjer primjene metalnih pjena u građevini je za izradu ograda na autocestama i brzim cestama uz naselja. Ponovo dobra svojstva apsorpcije zvuka metalnih pjena pogodna su za izradu takvih elemenata. Uz to dodatna prednost je i otpornost na vanjske utjecaje, već spomenuta otpornost u slučaju požara odnosno nezapaljivost te lako održavanje. [4]

Mala masa konstrukcije odnosno broda igra važnu ulogu i u brodogradnji. Zbog toga postoji potencijal da metalne pjene u budućnosti zamjene dosad korištene materijale uz važno svojstvo da sendvič konstrukcije metalnih pjena moraju biti lako spojive i da postoji mogućnost pritezanja u procesu izgradnje. [4]

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada izvršeno je mehaničko ispitivanje na 12 uzoraka. Uzorci su podijeljeni u 3 skupine, ovisno o broju prekursora (pločica dimenzija 75x20x5 mm):

1. 4 uzorka s po 4 prekursora
2. 4 uzorka s po 4,5 prekursora
3. 4 uzorka s po 5 prekursora

Uzorci su u obliku valjka sljedećih dimenzija:

- visina, $l=79,5$ mm
- promjer, $d=42$ mm

Volumen uzoraka:

$$V = \frac{d^2 \pi}{4} \times l \quad (8)$$

gdje je

d – početni promjer uzorka

l – visina uzorka

Gustoća:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

m – masa uzorka

V – volumen uzorka

Relativna gustoća:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{Al}} \quad (10)$$

ρ - gustoća pjene

ρ_{Al} – gustoća aluminija (2700 kg/m^3)

Tablica 1 Ispitni uzorci

| Oznaka uzorka | Broj prekursora | Masa uzorka, g | Gustoća, kg/m ³ | Relativna gustoća | Brzina tlačenja, mm/min |
|---------------|-----------------|----------------|----------------------------|-------------------|-------------------------|
| 4 spori | 4 | 60,03 | 545,7 | 0,202 | 6 |
| 4 brzi | 4 | 55,46 | 504,2 | 0,186 | 60 |
| 4 brzi 3 | 4 | 57,75 | 525 | 0,194 | 60 |
| 4 brzi 4 | 4 | 59,30 | 539,1 | 0,200 | 60 |
| 4,5 spori | 4,5 | 66,14 | 601,3 | 0,223 | 6 |
| 4,5 brzi | 4,5 | 66,71 | 606,5 | 0,225 | 60 |
| 4,5 brzi 3 | 4,5 | 67,25 | 611,4 | 0,226 | 60 |
| 4,5 brzi 4 | 4,5 | 64,41 | 585,5 | 0,217 | 60 |
| 5 spori | 5 | 73,05 | 664,1 | 0,246 | 6 |
| 5 brzi | 5 | 69,63 | 633 | 0,234 | 60 |
| 5 brzi 3 | 5 | 73,55 | 668,6 | 0,248 | 60 |
| 5 brzi 4 | 5 | 79,69 | 724,5 | 0,268 | 60 |

Uzorci su dobiveni od prekursora ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH₂-0,4 odnosno prekursor je sačinjen od AlMgSi praha sa 0,6% magnezija koji je pomiješan sa 0,4% TiH₂ agensa koji je omogućio pjenjenje i stvaranje pjenaste strukture.



Slika 26 Uzorak prije ispitivanja

7.1. Statičko tlačno ispitivanje

Jednoosno tlačno ispitivanje uzorka je provedeno u Laboratoriju za mehanička ispitivanja, na univerzalnoj kidalici WPM EU 40 mod. Brzine ispitivanja su bile 60 mm/min i 6 mm/min . Maksimalna tlačna sila koju kidalica može ostvariti je 400 kN dok za ovo ispitivanje, ovisno o uzorku, je bila u rasponu od 70-120 kN.



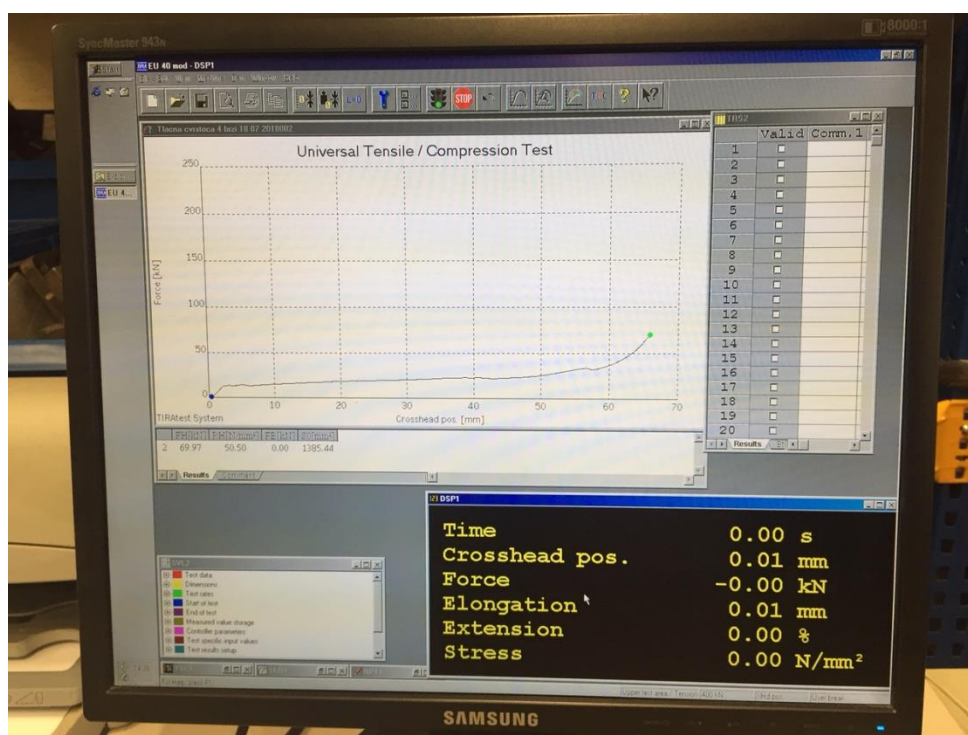
Slika 27 Univerzalna kidalica

Prije početka ispitivanja na svakom uzorku iscrtana je skala kako bi bio uočljiviji način na koji se pojedini uzorak tlači. Tijekom ispitivanja svaki od uzoraka sniman je SJ4000 kamerom.



Slika 28 Uzorak prilikom tlačnja

Kidalica je povezana s računalom odnosno programom „TIRAtest System“ uz pomoć kojeg odabiremo ulazne varijable, u ovom slučaju brzinu tlačnja, a dobivamo krivulju ovisnosti sile o skraćenju. Skraćenje predstavlja pomak donje ploče kidalice. Rezultati ispitivanja odnosno dobiveni dijagrami koristit će u daljnjoj analizi.



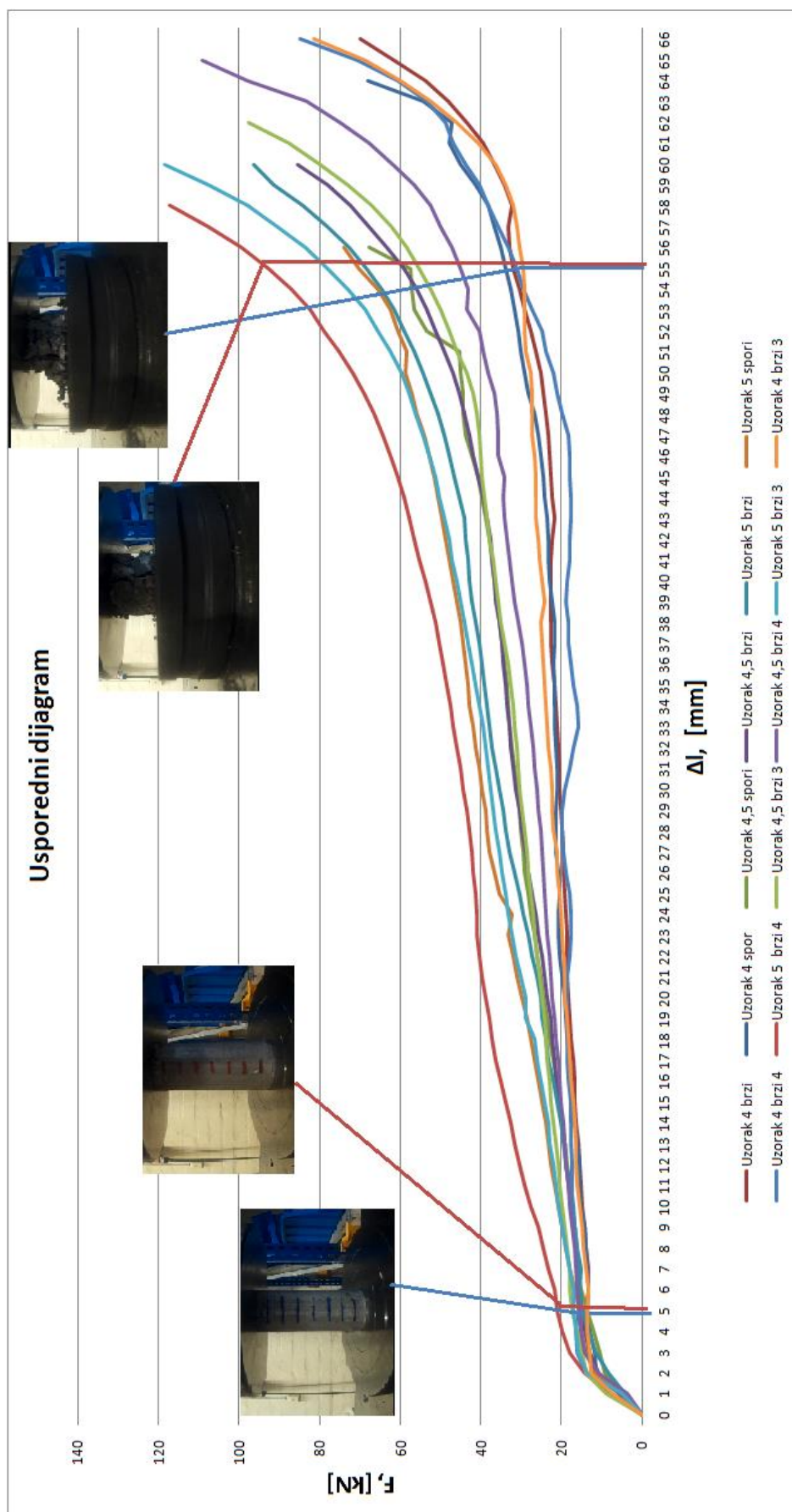
Slika 29 Računalo povezano s kidalicom



Slika 30 Uzorci nakon ispitivanja

7.2. Analiza podataka

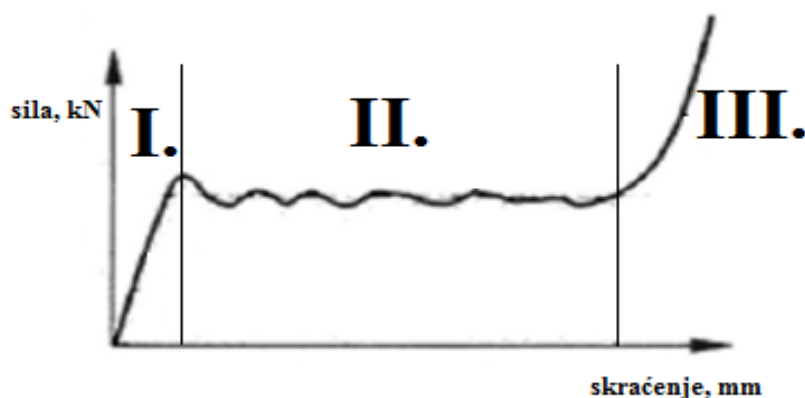
12 dobivenih krivulja ručno su iščitavana iz programa i unesena u pojedinačne Excel tablice prema dogovorenom mjerilu. Korištenjem dostupnih opcija u Excelu iscrtano je svih 12 krivulja usporedno kako bi se lakše uočile razlike u ponašanju pojedinih uzoraka u određenim trenucima ispitivanja. Na dijagramu su također prikazane slike dva uzorka nakon 5 sekundi i 55 sekundi tlačenja. Plavom bojom označen je uzorak 4 brzi 4 ($\rho_r=0,2$), a crvenom bojom uzorak 5 brzi 4 ($\rho_r=0,268$) s obzirom na to da je najveća razlika upravo između ta dva uzorka.



Slika 31 Usporedni dijagram svih 12 uzoraka

Dijagram možemo podijeliti na 3 područja:

- I. početni stadij
- II. stadij približno konstantne sile
- III. završni stadij



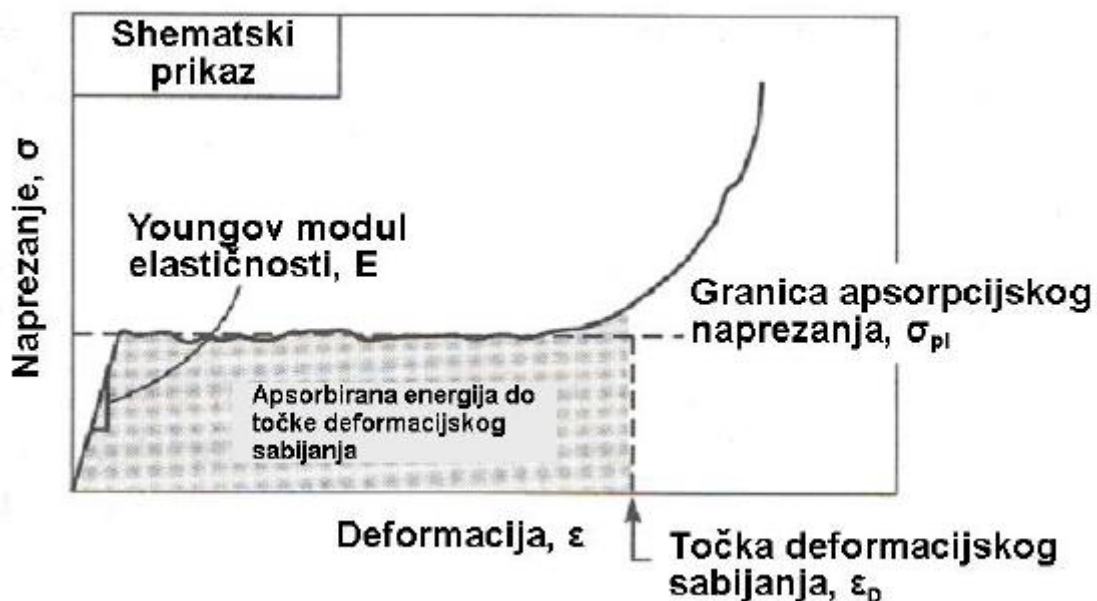
Slika 32 Područja u dijagramu

Najznačajnije područje kod određivanja optimalne količine apsorbirane energije je središnje područje. Idealan apsorpcijski materijal bi se u području II. ponašao na način da bi apsorbirao energiju uz konstantnu silu.

Od prikazanih krivulja najbliže idealnom obliku krivulje su krivulje uzoraka koji su izrađeni s po 4 prekursora (relativne gustoće oko 0,2). Povećanjem broja prekursora u uzorku nagib krivulja u području II. raste odnosno odmiče od željenog oblika. Po jedan uzorak iz pojedine skupine prvotno je ispitivan manjom brzinom dok su ostali tlačeni većom brzinom. U usporednom dijagramu je vidljivo da s obzirom na brzinu tlačenja nema značajne razlike.

7.2.1. Apsorbirana energija

Apsorbirana energija u dijagramu predstavlja površinu ispod krivulje do točke deformacijskog sabijanja.



Slika 33 Apsorbirana energija u dijagramu [5]

Apsorpcija energije se računa prema izrazu:

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (11)$$

gdje su:

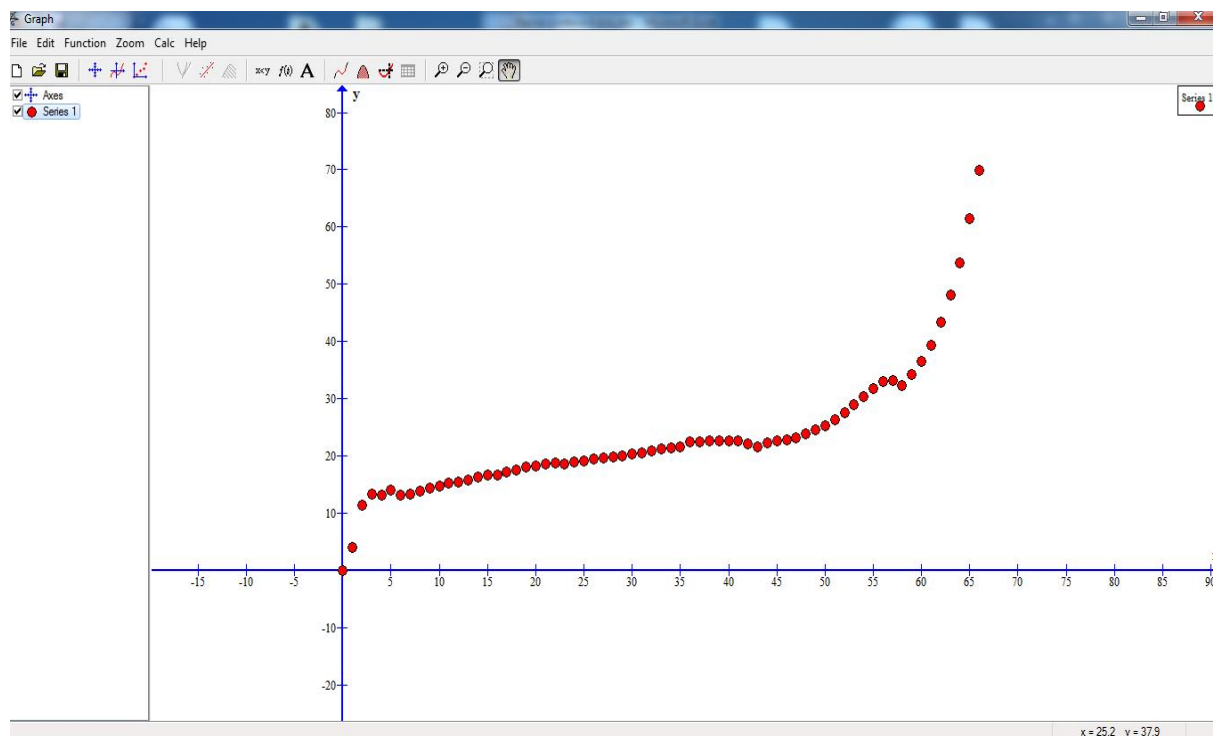
σ – naprezanje, N/mm^2

ϵ – deformacija, %

[2]

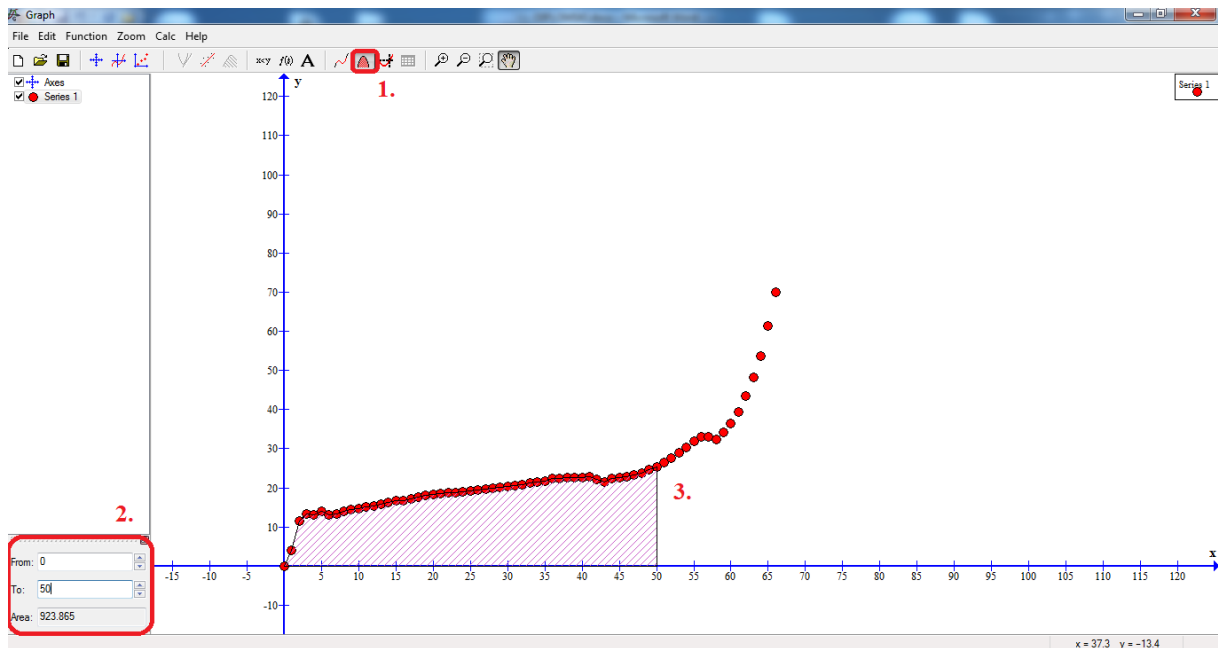
Za izračun iznosa apsorbirane energije u izradi ovog rada koristio se program Graph.

Odabirom opcije „Insert point series“ u padajućem izborniku „Function“ unosom x i y koordinate odnosno brojčane vrijednosti sile i pripadajućeg skraćenja za svaki uzorak pojedinačno dobiva se niz točaka u koordinatnom sustavu.



Slika 34 Unos podataka u Graph

Potom odabirom funkcije „Calculate the definite integral over a given interval“, označeno s brojem 1. na slici, otvara se prozor u donjem lijevom uglu. U novom prozoru definiran je interval po x osi unutar kojeg želimo dobiti površinu ispod krivulje. Unosom intervala program izbacuje brojčanu vrijednost površine i osjenča istu površinu ispod krivulje za zadani interval.



Slika 35 Iščitanje površine ispod dijagrama u Graph-u

7.2.2. Relativno skraćenje

Relativno skraćenje se računa prema sljedećem izrazu

$$\varepsilon = \frac{L_0 - \Delta L}{L_0} \times 100 \quad (12)$$

gdje su:

ε – relativno skraćenje (%)

L_0 – početna visina (mm)

ΔL – skraćenje (mm)

7.2.3. Tlačno naprezanje

Tlačno naprezanje se računa prema sljedećem izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (13)$$

gdje su:

σ – tlačno naprezanje ($\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$)

F – tlačna sila (N)

S_0 – ploština početnog presjeka epruvete (mm^2)

7.2.4. Iskoristivost

Iskoristivost se računa kao omjer dviju površina, prema sljedećem izrazu:

$$E_f = \frac{S_{OADF}}{S_{OGDF}} \quad (14)$$

gdje su:

E_f – iskoristivost (%)

$S_{OADF} = S_{OHDF} - S_{OHA}$ – što predstavlja površinu ispod krivulje tj apsorbiranu energiju po jedinici volumena

S_{OADF} – apsorbirana energiju po jedinici volumena za idealni materijal [12]

Tablica 2 Uzorak 4 brzi ($\rho_r=0,186$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E _f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 14,05 | 48,875 | 0,063 | 10,141 | 0,70 |
| 10 | 14,75 | 118,195 | 0,126 | 10,646 | 0,80 |
| 15 | 16,65 | 196,845 | 0,189 | 12,018 | 0,79 |
| 20 | 18,35 | 283,945 | 0,252 | 13,245 | 0,77 |
| 25 | 19,22 | 377,74 | 0,314 | 13,873 | 0,79 |
| 30 | 20,41 | 476,475 | 0,377 | 14,732 | 0,78 |
| 35 | 21,68 | 581,55 | 0,440 | 15,648 | 0,77 |
| 40 | 22,64 | 693,94 | 0,503 | 16,341 | 0,77 |
| 45 | 22,64 | 805,52 | 0,566 | 16,341 | 0,79 |
| 50 | 25,23 | 923,87 | 0,629 | 18,211 | 0,73 |
| 55 | 31,86 | 1065,94 | 0,692 | 22,996 | 0,61 |
| 60 | 36,53 | 1232,86 | 0,755 | 26,367 | 0,56 |
| 65 | 61,48 | 1466,58 | 0,818 | 44,376 | 0,37 |

Tablica 3 Uzorak 4 brzi ($\rho_r=0,186$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E _f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,77 | 10 | 7,263 | 0,022 | 7,218 | 0,41 |
| 28,95 | 20 | 455,243 | 0,364 | 14,436 | 0,79 |
| 53,71 | 30 | 1026,044 | 0,676 | 21,654 | 0,64 |
| 61,15 | 40 | 1276,806 | 0,769 | 28,872 | 0,52 |
| 63,35 | 50 | 1375,255 | 0,797 | 36,090 | 0,43 |
| 64,81 | 60 | 1455,039 | 0,815 | 43,307 | 0,37 |
| 65,93 | 70 | 1527,428 | 0,829 | 50,525 | 0,33 |

Tablica 4 Uzorak 4 spori ($\rho_r=0,202$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 13,59 | 48,445 | 0,063 | 9,809 | 0,71 |
| 10 | 15 | 117,81 | 0,126 | 10,827 | 0,79 |
| 15 | 17,28 | 197,63 | 0,189 | 12,473 | 0,76 |
| 20 | 19,35 | 288,845 | 0,252 | 13,967 | 0,75 |
| 25 | 20,54 | 390,19 | 0,314 | 14,826 | 0,76 |
| 30 | 21,19 | 496,035 | 0,377 | 15,295 | 0,78 |
| 35 | 21,8 | 603,29 | 0,440 | 15,735 | 0,79 |
| 40 | 23,02 | 713,3 | 0,503 | 16,616 | 0,77 |
| 45 | 24,5 | 831,34 | 0,566 | 17,684 | 0,75 |
| 50 | 29,19 | 964,005 | 0,629 | 21,069 | 0,66 |
| 55 | 33,86 | 1120,66 | 0,692 | 24,440 | 0,60 |
| 60 | 44,98 | 1311,19 | 0,755 | 32,466 | 0,49 |

Tablica 5 Uzorak 4spori ($\rho_r=0,202$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,49 | 10 | 6,26 | 0,02 | 7,218 | 0,42 |
| 21,35 | 20 | 315,33 | 0,27 | 14,436 | 0,74 |
| 50,93 | 30 | 991,15 | 0,64 | 21,654 | 0,65 |
| 60,83 | 40 | 1349,47 | 0,77 | 28,872 | 0,55 |
| 61,10 | 50 | 1362,31 | 0,77 | 36,090 | 0,45 |
| 62,78 | 60 | 1443,95 | 0,79 | 43,307 | 0,38 |
| 63,82 | 70 | 1504,9 | 0,80 | 50,525 | 0,34 |

Tablica 6 Uzorak 4,5 spori ($\rho_r=0,223$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 13,62 | 43,26 | 0,063 | 9,831 | 0,64 |
| 10 | 17,38 | 122,81 | 0,126 | 12,545 | 0,71 |
| 15 | 20,49 | 217,095 | 0,189 | 14,790 | 0,71 |
| 20 | 24,39 | 329,23 | 0,252 | 17,604 | 0,67 |
| 25 | 28,37 | 461,23 | 0,314 | 20,477 | 0,65 |
| 30 | 30,95 | 610,105 | 0,377 | 22,339 | 0,66 |
| 35 | 33,64 | 772,24 | 0,440 | 24,281 | 0,66 |
| 40 | 36,51 | 947,68 | 0,503 | 26,353 | 0,65 |
| 45 | 40,81 | 1139,765 | 0,566 | 29,456 | 0,62 |
| 50 | 45,03 | 1357,375 | 0,629 | 32,502 | 0,60 |
| 55 | 57,38 | 1621,02 | 0,692 | 41,416 | 0,51 |

Tablica 7 Uzorak 4,5spori ($\rho_r=0,223$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2,71 | 10 | 16,26 | 0,03 | 7,218 | 0,60 |
| 14,3 | 20 | 202,93 | 0,18 | 14,436 | 0,71 |
| 27,75 | 30 | 541,62 | 0,35 | 21,654 | 0,65 |
| 46,16 | 40 | 1188,07 | 0,58 | 28,872 | 0,64 |
| 50,91 | 50 | 1398,5 | 0,64 | 36,090 | 0,55 |
| 54,2 | 60 | 1575,18 | 0,68 | 43,307 | 0,48 |

Tablica 8 Uzorak 4,5 brzi ($\rho_r=0,225$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 15,30 | 51,24 | 0,063 | 11,043 | 0,67 |
| 10 | 17,65 | 132,135 | 0,126 | 12,740 | 0,75 |
| 15 | 20,59 | 227,415 | 0,189 | 14,862 | 0,74 |
| 20 | 23,43 | 337,385 | 0,252 | 16,912 | 0,72 |
| 25 | 27,26 | 463,94 | 0,314 | 19,676 | 0,68 |
| 30 | 31,30 | 610,45 | 0,377 | 22,592 | 0,65 |
| 35 | 33,91 | 773,695 | 0,440 | 24,476 | 0,65 |
| 40 | 36,70 | 949,85 | 0,503 | 26,490 | 0,65 |
| 45 | 40,56 | 1141,27 | 0,566 | 29,276 | 0,63 |
| 50 | 46,99 | 1359,315 | 0,629 | 33,917 | 0,58 |
| 55 | 59,15 | 1622,125 | 0,692 | 42,694 | 0,50 |
| 60 | 85,39 | 1975,755 | 0,755 | 61,634 | 0,39 |

Tablica 9 Uzorak 4,5 brzi ($\rho_r=0,225$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,87 | 10 | 9,679 | 0,02 | 7,218 | 0,52 |
| 14,07 | 20 | 208,595 | 0,18 | 14,436 | 0,74 |
| 28,35 | 30 | 559,878 | 0,36 | 21,654 | 0,66 |
| 44,45 | 40 | 1119,111 | 0,56 | 28,872 | 0,63 |
| 51,41 | 50 | 1427,563 | 0,65 | 36,090 | 0,56 |
| 54,91 | 60 | 1616,814 | 0,69 | 43,307 | 0,49 |
| 57,51 | 70 | 1783,994 | 0,72 | 50,525 | 0,44 |
| 59,23 | 80 | 1912,196 | 0,75 | 57,743 | 0,40 |

Tablica 10 Uzorak 5 brzi ($\rho_r=0,234$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 14,69 | 44,665 | 0,063 | 10,603 | 608,10 |
| 10 | 17,02 | 123,78 | 0,126 | 12,285 | 0,73 |
| 15 | 21,13 | 219,075 | 0,189 | 15,251 | 0,69 |
| 20 | 25,19 | 336,145 | 0,252 | 18,182 | 0,67 |
| 25 | 30,55 | 474,655 | 0,314 | 22,051 | 0,62 |
| 30 | 35,52 | 640,49 | 0,377 | 25,638 | 0,60 |
| 35 | 39,14 | 828,05 | 0,440 | 28,251 | 0,60 |
| 40 | 42,95 | 1032,975 | 0,503 | 31,001 | 0,60 |
| 45 | 46,65 | 1254,375 | 0,566 | 33,672 | 0,60 |
| 50 | 54,43 | 1505,385 | 0,629 | 39,287 | 0,55 |
| 55 | 68,35 | 1808,765 | 0,692 | 49,334 | 0,48 |
| 60 | 96,29 | 2123,645 | 0,755 | 69,501 | 0,37 |

Tablica 11 Uzorak 5 brzi ($\rho_r=0,234$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2,35 | 10 | 11,467 | 0,03 | 7,218 | 0,49 |
| 13,63 | 20 | 190,970 | 0,17 | 14,436 | 0,70 |
| 24,45 | 30 | 458,028 | 0,31 | 21,654 | 0,62 |
| 36,45 | 40 | 885,518 | 0,46 | 28,872 | 0,61 |
| 47,49 | 50 | 1374,495 | 0,60 | 36,090 | 0,58 |
| 52,37 | 60 | 1640,877 | 0,66 | 43,307 | 0,52 |
| 55,41 | 70 | 1837,157 | 0,70 | 50,525 | 0,47 |
| 57,37 | 80 | 1984,053 | 0,72 | 57,743 | 0,43 |
| 58,83 | 90 | 2108,230 | 0,74 | 64,961 | 0,40 |

Tablica 12 Uzorak 5 spori ($\rho_r=0,246$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 15,41 | 53,835 | 0,063 | 11,123 | 0,70 |
| 10 | 20,75 | 145,425 | 0,126 | 14,977 | 0,70 |
| 15 | 24,72 | 259,870 | 0,189 | 17,843 | 0,70 |
| 20 | 39,79 | 395,945 | 0,252 | 28,720 | 0,50 |
| 25 | 35,43 | 556,995 | 0,314 | 25,573 | 0,63 |
| 30 | 39,76 | 746,500 | 0,377 | 28,698 | 0,63 |
| 35 | 43,12 | 954,270 | 0,440 | 31,124 | 0,63 |
| 40 | 47,00 | 1179,020 | 0,503 | 33,924 | 0,63 |
| 45 | 51,41 | 1425,225 | 0,566 | 37,107 | 0,62 |
| 50 | 58,81 | 1700,635 | 0,629 | 42,449 | 0,58 |
| 55 | 70,36 | 2011,860 | 0,692 | 50,785 | 0,52 |

Tablica 13 Uzorak 5 spori ($\rho_r=0,246$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,65 | 10 | 7,450 | 0,02 | 7,218 | 0,45 |
| 9,12 | 20 | 127,502 | 0,11 | 14,436 | 0,70 |
| 20,26 | 30 | 403,727 | 0,25 | 21,654 | 0,66 |
| 30,4 | 40 | 726,463 | 0,38 | 28,872 | 0,60 |
| 43,16 | 50 | 1332,074 | 0,54 | 36,090 | 0,62 |
| 51,17 | 60 | 1769,106 | 0,64 | 43,307 | 0,58 |
| 55,01 | 70 | 2012,564 | 0,69 | 50,525 | 0,52 |

Tablica 14 Uzorak 4 brzi 4 ($\rho_r=0,2$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 15,91 | 59,355 | 0,063 | 11,484 | 0,75 |
| 10 | 17,20 | 141,490 | 0,126 | 12,415 | 0,82 |
| 15 | 17,68 | 228,850 | 0,189 | 12,761 | 0,86 |
| 20 | 18,49 | 320,665 | 0,252 | 13,346 | 0,87 |
| 25 | 17,93 | 411,085 | 0,314 | 12,942 | 0,92 |
| 30 | 19,09 | 507,335 | 0,377 | 13,779 | 0,89 |
| 35 | 16,98 | 592,350 | 0,440 | 12,256 | 1,00 |
| 40 | 18,45 | 683,225 | 0,503 | 13,317 | 0,93 |
| 45 | 17,94 | 772,390 | 0,566 | 12,949 | 0,96 |
| 50 | 22,13 | 869,225 | 0,629 | 15,973 | 0,79 |
| 55 | 31,07 | 1001,225 | 0,692 | 22,426 | 0,59 |
| 60 | 43,78 | 1186,32 | 0,755 | 31,600 | 0,45 |
| 65 | 70,54 | 1453,18 | 0,818 | 50,915 | 0,32 |

Tablica 15 Uzorak 4 brzi 4 ($\rho_r=0,2$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,43 | 10 | 5,519 | 0,02 | 7,218 | 0,39 |
| 48,27 | 20 | 831,872 | 0,61 | 14,436 | 0,86 |
| 54,45 | 30 | 984,414 | 0,68 | 21,654 | 0,60 |
| 58,77 | 40 | 1134,967 | 0,74 | 28,872 | 0,48 |
| 62,33 | 50 | 1295,785 | 0,78 | 36,090 | 0,42 |
| 63,89 | 60 | 1380,915 | 0,80 | 43,307 | 0,36 |
| 64,95 | 70 | 1449,665 | 0,82 | 50,525 | 0,32 |
| 65,69 | 80 | 1497,27 | 0,83 | 57,743 | 0,28 |
| 66,31 | 90 | 1530,82 | 0,83 | 64,961 | 0,26 |

Tablica 16 Uzorak 5 brzi 4 ($\rho_r=0,268$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 20,91 | 69,855 | 0,063 | 15,093 | 0,67 |
| 10 | 27,52 | 189,120 | 0,126 | 19,864 | 0,69 |
| 15 | 33,80 | 343,240 | 0,189 | 24,397 | 0,68 |
| 20 | 38,86 | 526,090 | 0,252 | 28,049 | 0,68 |
| 25 | 41,44 | 728,400 | 0,314 | 29,911 | 0,70 |
| 30 | 44,26 | 941,710 | 0,377 | 31,946 | 0,71 |
| 35 | 48,50 | 1173,620 | 0,440 | 35,007 | 0,69 |
| 40 | 53,80 | 1428,250 | 0,503 | 38,832 | 0,66 |
| 45 | 60,68 | 1713,940 | 0,566 | 43,798 | 0,63 |
| 50 | 71,82 | 2042,350 | 0,629 | 51,839 | 0,57 |
| 55 | 92,78 | 2447,820 | 0,692 | 66,968 | 0,48 |

Tablica 17 Uzorak 5 brzi 4 ($\rho_r=0,268$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,4 | 10 | 7,302 | 0,02 | 7,218 | 0,52 |
| 4,16 | 20 | 52,707 | 0,05 | 14,436 | 0,63 |
| 11,7 | 30 | 238,044 | 0,15 | 21,654 | 0,68 |
| 21,38 | 40 | 580,558 | 0,27 | 28,872 | 0,68 |
| 36,62 | 50 | 1253,377 | 0,46 | 36,090 | 0,68 |
| 44,64 | 60 | 1692,200 | 0,56 | 43,307 | 0,63 |
| 49,46 | 70 | 2003,993 | 0,62 | 50,525 | 0,58 |
| 52,3 | 80 | 2.217 | 0,66 | 57,743 | 0,53 |
| 54,54 | 90 | 2405,756 | 0,69 | 64,961 | 0,49 |
| 56,04 | 100 | 2547,93 | 0,70 | 72,179 | 0,45 |

Tablica 18 Uzorak 4,5 brzi 3 ($\rho_r=0,226$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 17,34 | 62,440 | 0,063 | 12,516 | 0,72 |
| 10 | 19,98 | 154,815 | 0,126 | 14,421 | 0,77 |
| 15 | 22,09 | 260,975 | 0,189 | 15,944 | 0,79 |
| 20 | 24,33 | 379,150 | 0,252 | 17,561 | 0,78 |
| 25 | 27,12 | 510,505 | 0,314 | 19,575 | 0,75 |
| 30 | 29,88 | 655,460 | 0,377 | 21,567 | 0,73 |
| 35 | 32,03 | 812,305 | 0,440 | 23,119 | 0,72 |
| 40 | 35,74 | 985,065 | 0,503 | 25,797 | 0,69 |
| 45 | 39,11 | 1175,250 | 0,566 | 28,229 | 0,67 |
| 50 | 41,97 | 1380,150 | 0,629 | 30,294 | 0,66 |
| 55 | 52,49 | 1625,445 | 0,692 | 37,887 | 0,56 |
| 60 | 73,06 | 1953,695 | 0,755 | 52,734 | 0,45 |

Tablica 19 Uzorak 4,5 brzi 3 ($\rho_r=0,226$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,12 | 10 | 5,482 | 0,01 | 7,218 | 0,49 |
| 10,14 | 20 | 157,606 | 0,13 | 14,436 | 0,78 |
| 29,2 | 30 | 631,287 | 0,37 | 21,654 | 0,72 |
| 46,2 | 40 | 1223,121 | 0,58 | 28,872 | 0,66 |
| 53,08 | 50 | 1524,335 | 0,67 | 36,090 | 0,57 |
| 56,46 | 60 | 1709,572 | 0,71 | 43,307 | 0,50 |
| 58,52 | 70 | 1842,900 | 0,74 | 50,525 | 0,45 |
| 60,02 | 80 | 1955,293 | 0,75 | 57,743 | 0,41 |
| 61,22 | 90 | 2056,946 | 0,77 | 64,961 | 0,37 |
| 62,22 | 100 | 2130,055 | 0,78 | 72,179 | 0,34 |

Tablica 20 Uzorak 4,5 brzi 4 ($\rho_r=0,217$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 15,60 | 51,510 | 0,063 | 11,260 | 0,66 |
| 10 | 17,90 | 134,990 | 0,126 | 12,920 | 0,75 |
| 15 | 20,06 | 230,110 | 0,189 | 14,479 | 0,76 |
| 20 | 22,22 | 335,520 | 0,252 | 16,038 | 0,75 |
| 25 | 24,21 | 451,645 | 0,314 | 17,475 | 0,75 |
| 30 | 26,07 | 577,125 | 0,377 | 18,817 | 0,74 |
| 35 | 28,63 | 713,655 | 0,440 | 20,665 | 0,71 |
| 40 | 32,21 | 865,395 | 0,503 | 23,249 | 0,67 |
| 45 | 34,24 | 1033,510 | 0,566 | 24,714 | 0,67 |
| 50 | 38,11 | 1213,815 | 0,629 | 27,507 | 0,64 |
| 55 | 45,02 | 1421,930 | 0,692 | 32,495 | 0,57 |
| 60 | 61,81 | 1681,735 | 0,755 | 44,614 | 0,45 |
| 65 | 109,05 | 2090,965 | 0,818 | 78,711 | 0,29 |

Tablica 21 Uzorak 4,5 brzi 4 ($\rho_r=0,217$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,8 | 10 | 6,935 | 0,02 | 7,218 | 0,39 |
| 14,68 | 20 | 223,712 | 0,18 | 14,436 | 0,76 |
| 37,16 | 30 | 776,948 | 0,47 | 21,654 | 0,70 |
| 51,6 | 40 | 1276,336 | 0,65 | 28,872 | 0,62 |
| 57 | 50 | 1516,705 | 0,72 | 36,090 | 0,53 |
| 59,7 | 60 | 1663,429 | 0,75 | 43,307 | 0,46 |
| 61,36 | 70 | 1790,728 | 0,77 | 50,525 | 0,42 |
| 62,64 | 80 | 1867,561 | 0,79 | 57,743 | 0,37 |
| 63,64 | 90 | 1953,23 | 0,80 | 64,961 | 0,34 |
| 64,4 | 100 | 2027,559 | 0,81 | 72,179 | 0,31 |
| 65,64 | 110 | 2090,965 | 0,83 | 79,397 | 0,29 |

Tablica 22 Uzorak 5 brzi 3 ($\rho_r=0,248$)- skraćenje

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 17,02 | 59,420 | 0,063 | 12,285 | 0,70 |
| 10 | 20,62 | 151,910 | 0,126 | 14,883 | 0,74 |
| 15 | 24,25 | 264,135 | 0,189 | 17,503 | 0,73 |
| 20 | 28,99 | 394,415 | 0,252 | 20,925 | 0,68 |
| 25 | 33,94 | 555,560 | 0,314 | 24,498 | 0,65 |
| 30 | 37,55 | 734,475 | 0,377 | 27,103 | 0,65 |
| 35 | 41,18 | 930,380 | 0,440 | 29,723 | 0,65 |
| 40 | 46,08 | 1148,280 | 0,503 | 33,260 | 0,62 |
| 45 | 51,36 | 1391,190 | 0,566 | 37,071 | 0,60 |
| 50 | 59,79 | 1667,775 | 0,629 | 43,156 | 0,56 |
| 55 | 78,07 | 2006,615 | 0,692 | 56,350 | 0,47 |

Tablica 23 Uzorak 5 brzi 3 ($\rho_r=0,248$)- sila

| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,42 | 10 | 5,394 | 0,02 | 7,218 | 0,38 |
| 9,34 | 20 | 138,505 | 0,12 | 14,436 | 0,74 |
| 20,86 | 30 | 422,768 | 0,26 | 21,654 | 0,68 |
| 33,74 | 40 | 879,214 | 0,42 | 28,872 | 0,65 |
| 43,9 | 50 | 1335,420 | 0,55 | 36,090 | 0,61 |
| 50,1 | 60 | 1673,767 | 0,63 | 43,307 | 0,56 |
| 53,3 | 70 | 1880,839 | 0,67 | 50,525 | 0,50 |
| 55,4 | 80 | 2038,278 | 0,70 | 57,743 | 0,46 |
| 56,8 | 90 | 2156,408 | 0,71 | 64,961 | 0,42 |
| 58,2 | 100 | 2288,224 | 0,73 | 72,179 | 0,39 |
| 60,08 | 110 | 2484,12 | 0,76 | 79,397 | 0,38 |

Tablica 24 Uzorak 4 brzi 3 ($\rho_r=0,194$)- skraćenje

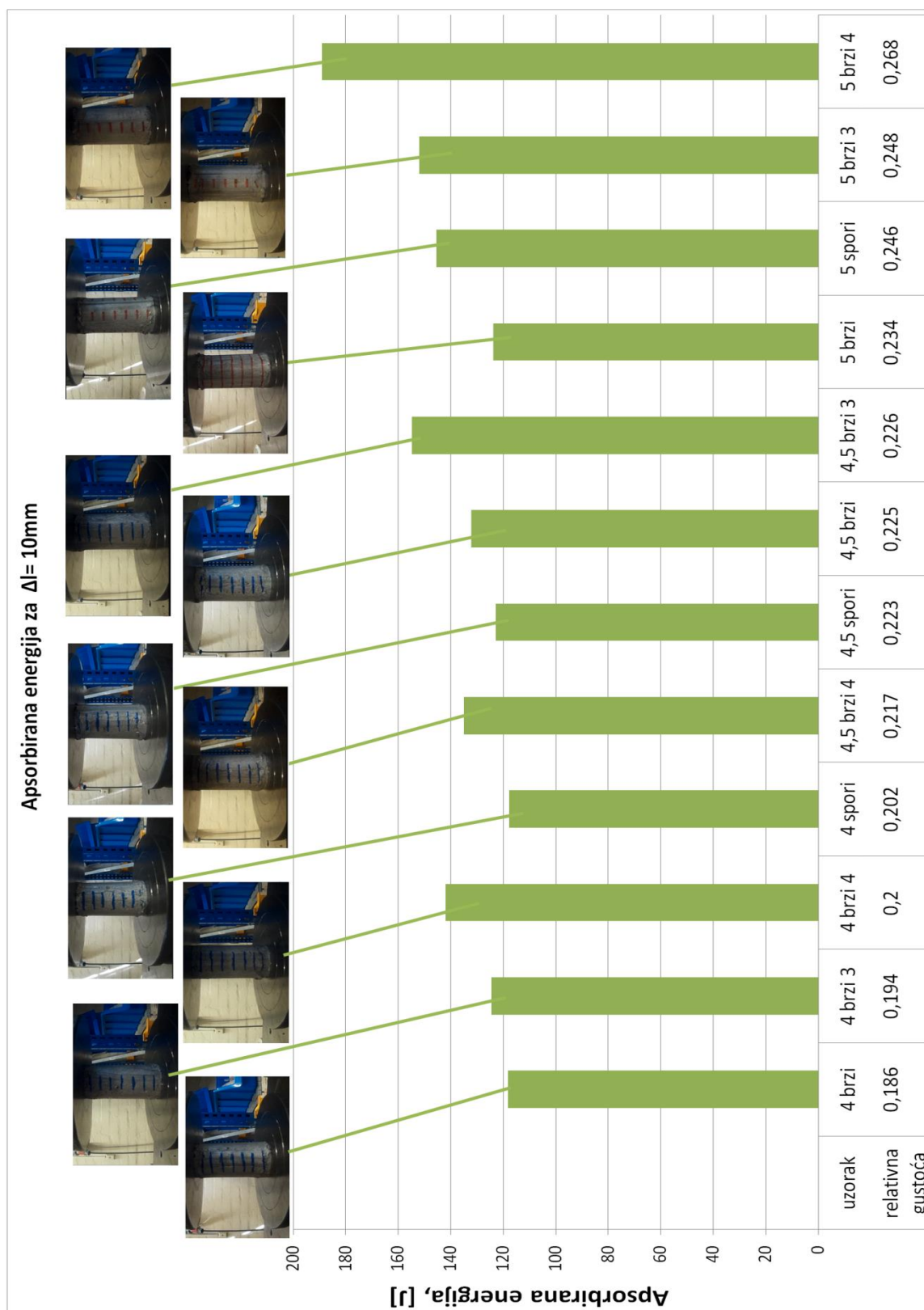
| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 13,50 | 53,490 | 0,063 | 9,744 | 0,79 |
| 10 | 15,39 | 124,465 | 0,126 | 11,108 | 0,81 |
| 15 | 16,97 | 205,815 | 0,189 | 12,249 | 0,81 |
| 20 | 19,17 | 296,095 | 0,252 | 13,837 | 0,77 |
| 25 | 20,34 | 394,880 | 0,314 | 14,681 | 0,78 |
| 30 | 22,33 | 502,495 | 0,377 | 16,118 | 0,75 |
| 35 | 24,18 | 619,250 | 0,440 | 17,453 | 0,73 |
| 40 | 24,32 | 742,450 | 0,503 | 17,554 | 0,76 |
| 45 | 26,31 | 872,005 | 0,566 | 18,990 | 0,74 |
| 50 | 27,71 | 1007,825 | 0,629 | 20,001 | 0,73 |
| 55 | 29,58 | 1152,820 | 0,692 | 21,351 | 0,71 |
| 60 | 36,33 | 1286,115 | 0,755 | 26,223 | 0,59 |
| 65 | 68,82 | 1537,78 | 0,818 | 49,674 | 0,34 |

Tablica 25 Uzorak 4 brzi 3 ($\rho_r=0,194$)- sila

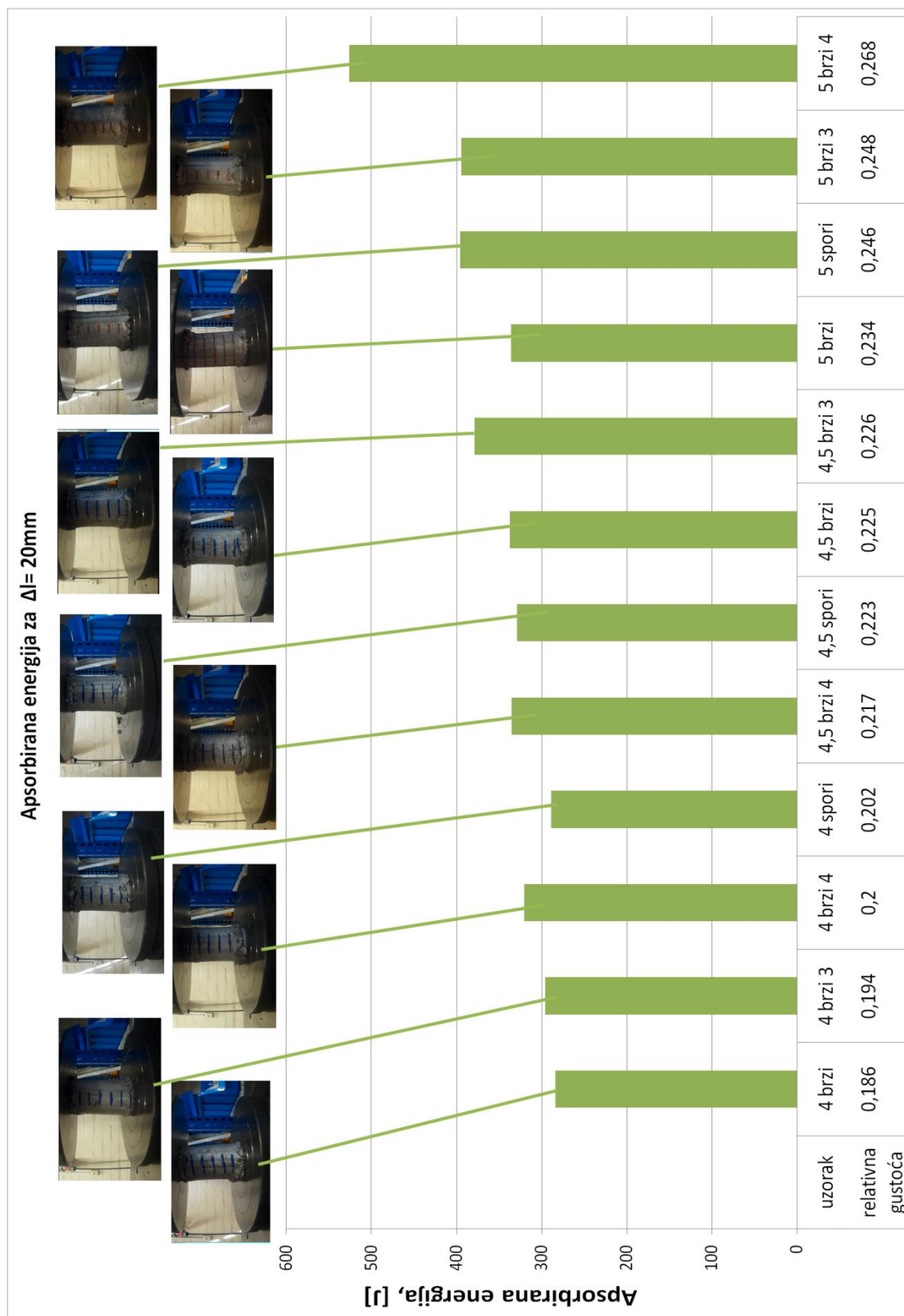
| Skraćenje Δl [mm] | Sila F [kN] | Apsorbirana energija W [J] | Relativno skraćenje ϵ | Tlačno naprezanje σ [N/mm ²] | Iskoristivost E_f |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|
| 0 | 0 | 0,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,33 | 10 | 6,379 | 0,02 | 7,218 | 0,48 |
| 23,43 | 20 | 383,302 | 0,29 | 14,436 | 0,82 |
| 55,47 | 30 | 1163,829 | 0,70 | 21,654 | 0,70 |
| 60,83 | 40 | 1317,753 | 0,77 | 28,872 | 0,54 |
| 62,67 | 50 | 1400,289 | 0,79 | 36,090 | 0,45 |
| 63,99 | 60 | 1400,289 | 0,80 | 43,307 | 0,36 |
| 65,13 | 70 | 1472,837 | 0,82 | 50,525 | 0,32 |
| 65,91 | 80 | 1605,598 | 0,83 | 57,743 | 0,30 |
| 66,61 | 90 | 1612,87 | 0,84 | 64,961 | 0,27 |

Provedena je usporedna analiza pri zadanim vrijednostima sile i skraćenja uz pomoć stupčastih dijagrama za sljedeće ovisnosti:

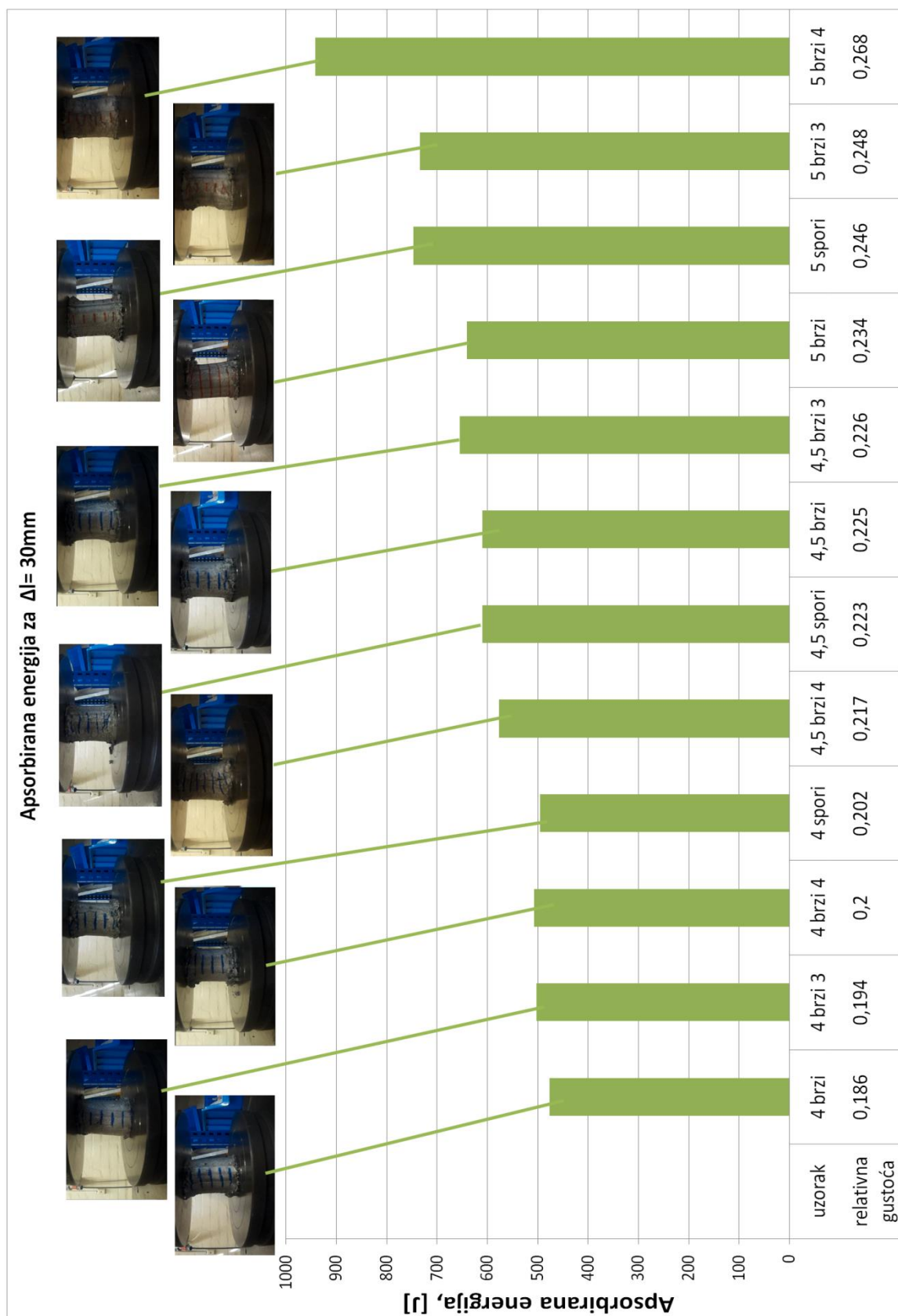
1. apsorbirana energija u ovisnosti o skraćenju (deformaciji)
2. apsorbirana energija pri određenoj sili
3. iskoristivost pri određenoj sili

Slika 37 Apsorbirana energija za $\Delta l = 10\text{ mm}$

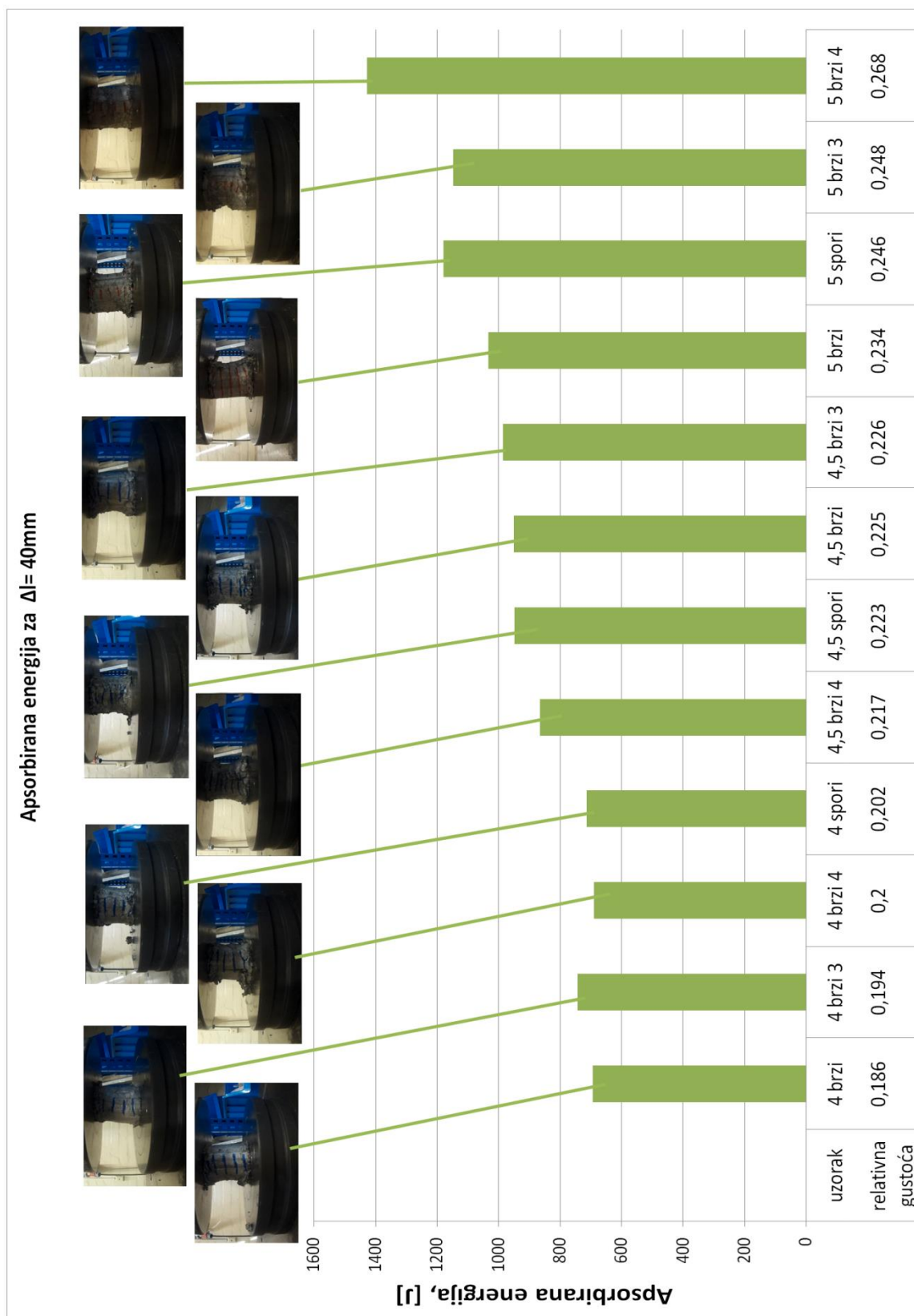
Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 10 mm poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće), a najmanji uzorci 4 brzi i 4 spori (uzorci spadaju u red onih koji imaju najmanje relativne gustoće).

Slika 38 Apsorbirana energija za $\Delta l = 20\text{ mm}$

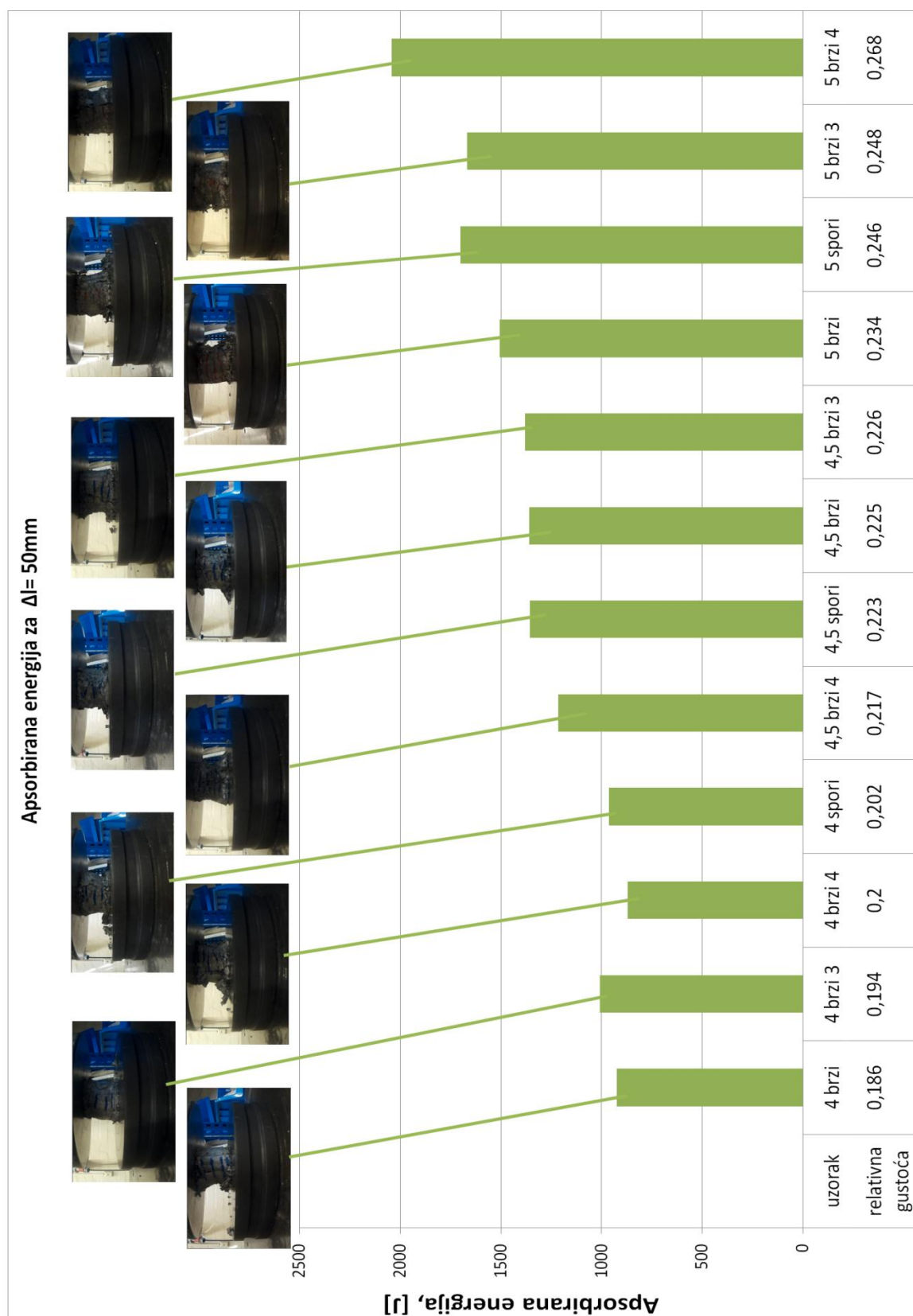
Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 20 mm poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće), a najmanji uzorak 4 brzi (uzorak najmanje relativne gustoće).

Slika 39 Apsorbirana energija za $\Delta l = 30\text{ mm}$

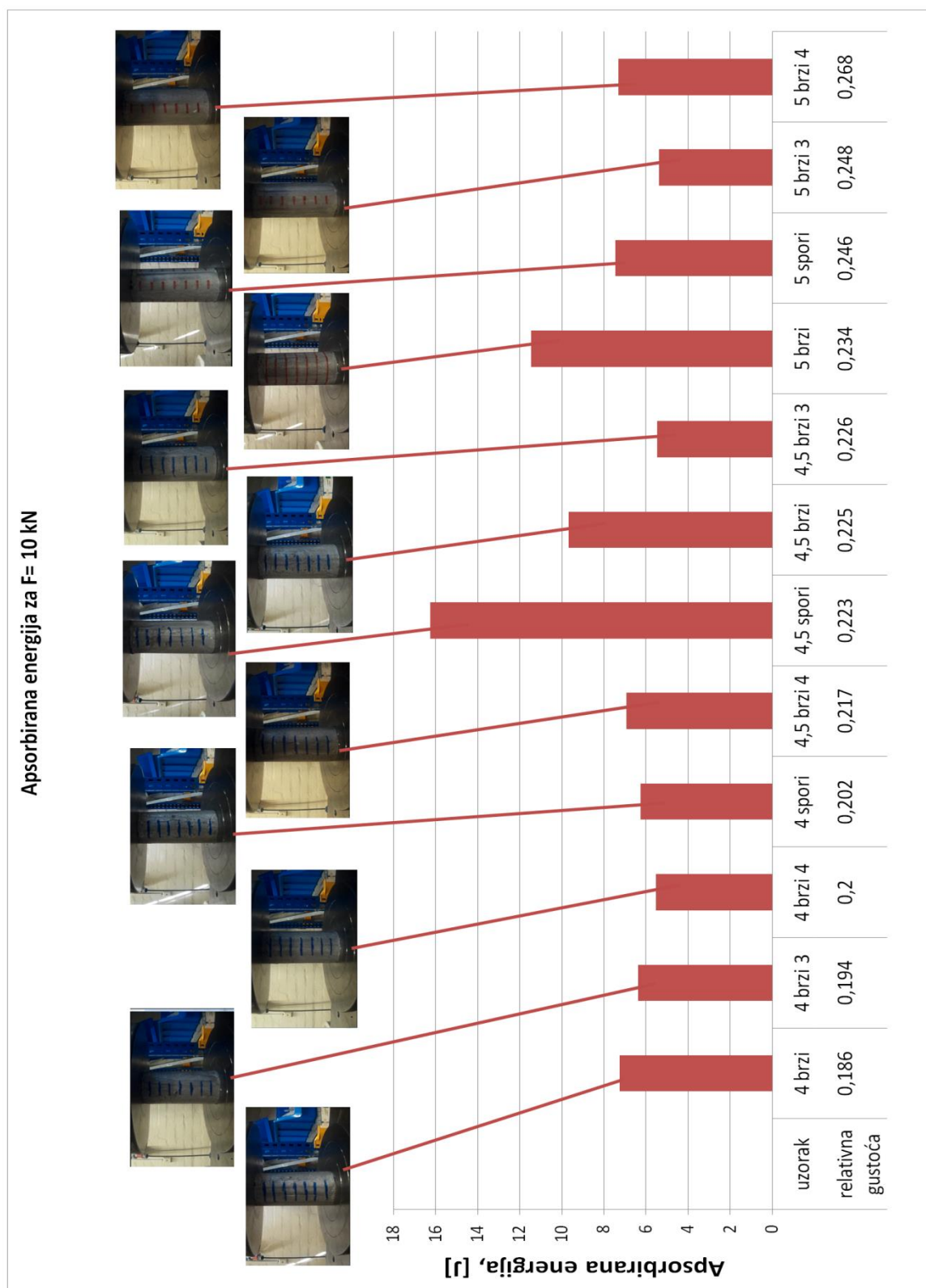
Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 30 mm poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće), a najmanji uzorak 4 brzi (uzorak najmanje relativne gustoće).

Slika 40 Apsorbirana energija za $\Delta l = 40\text{ mm}$

Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 40 mm poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće), a najmanji uzorci 4 brzi i 4 brzi 4 (uzorci spadaju u red onih koji imaju najmanje relativne gustoće).

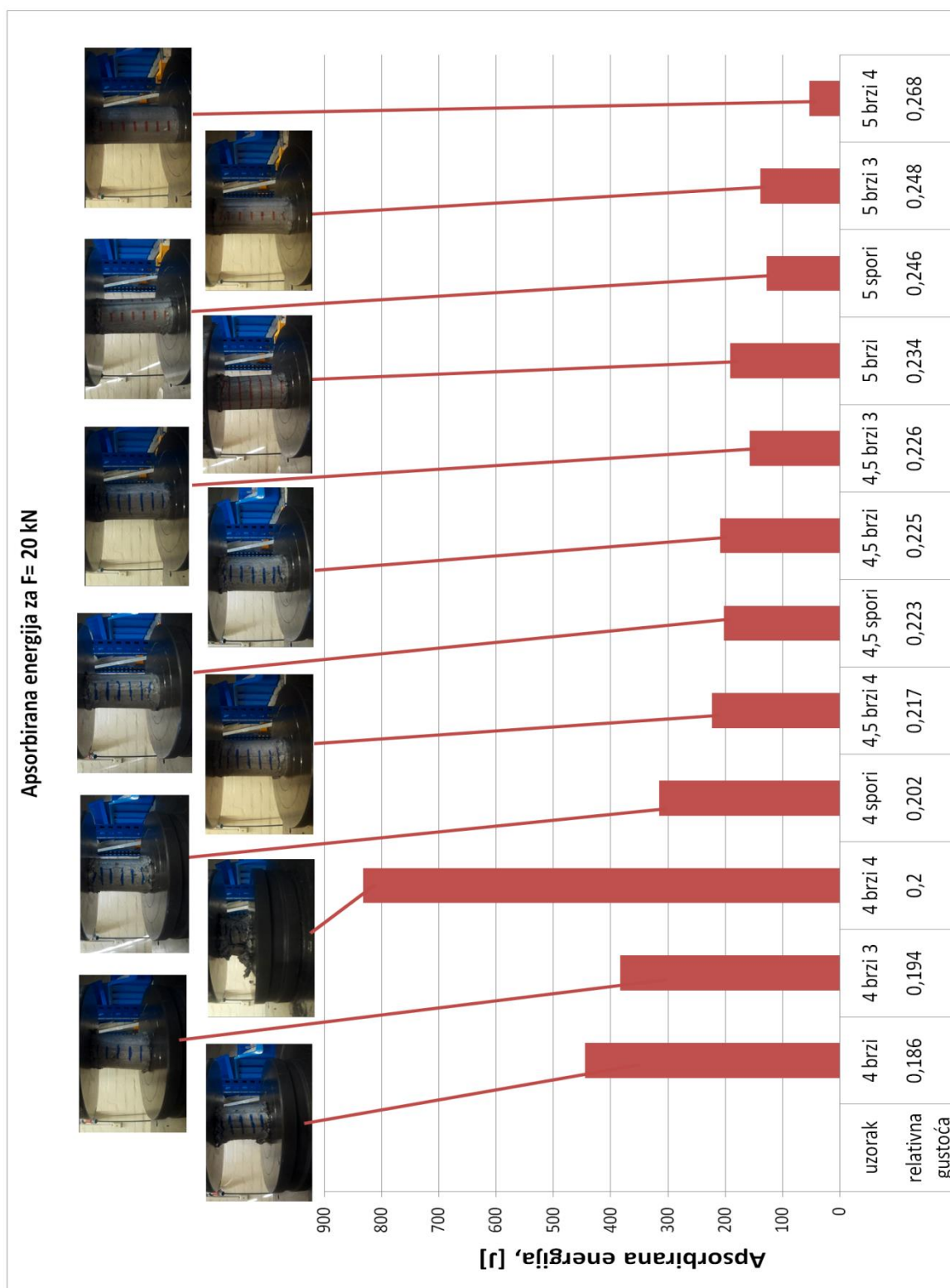
Slika 41 Apsorbirana energija za $\Delta l = 50 \text{ mm}$

Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 50 mm poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće), a najmanji uzorak 4 brzi 4 (jedan od uzoraka s najmanjom gustoćom)



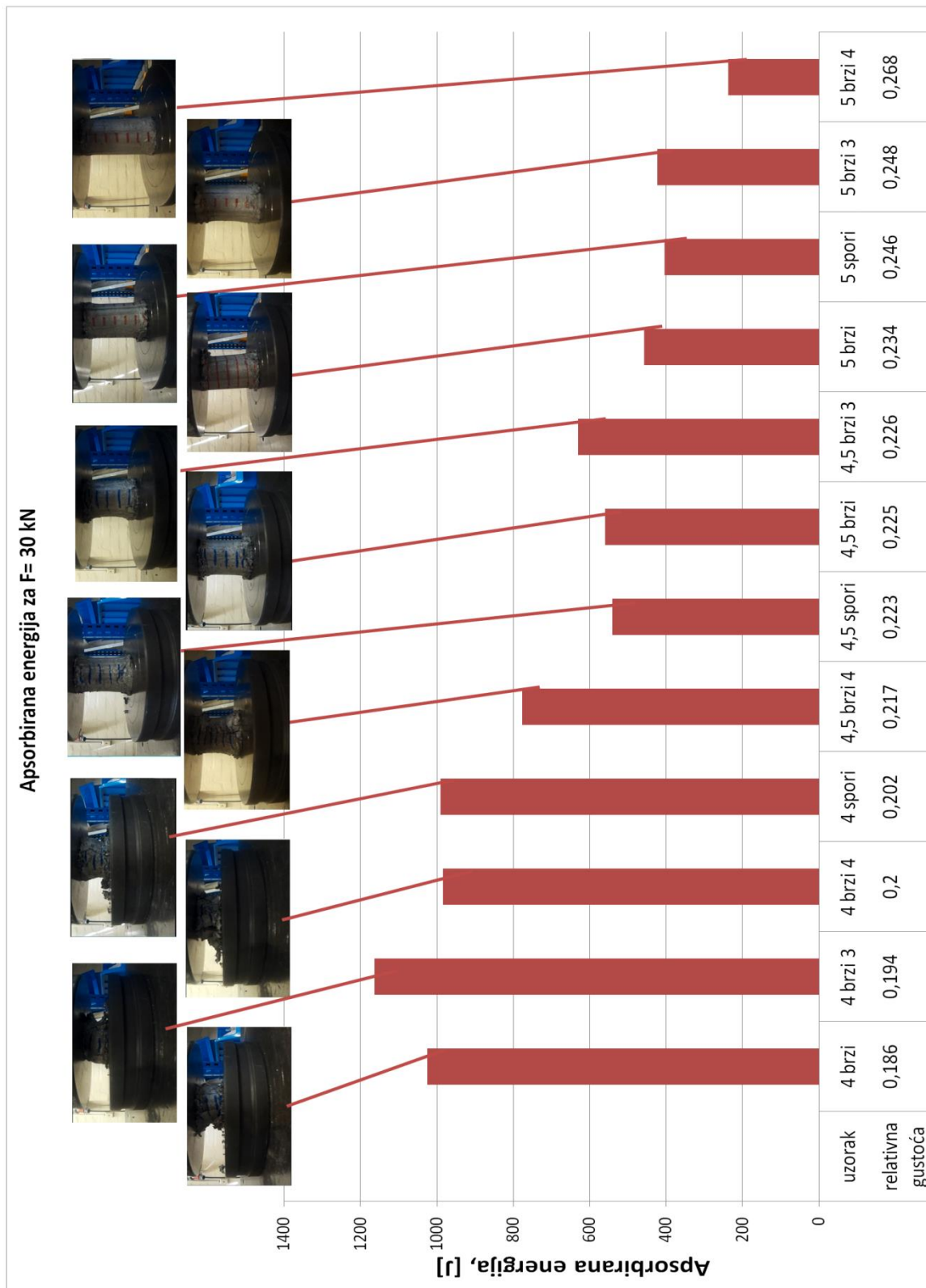
Slika 42 Apsorbirana energija za F=10 kN

Najveći iznos apsorbirane energije pri sili od 10 kN poprima uzorak 4,5 spori, a najmanji uzorci 4 brz 4, 4,5 brz 3 i 5 brz 3 (apsorbirana energija pri sili od 10 kN nije ovisna o relativnoj gustoći). Ako se pogleda fotografija uzorka pri sili 10 kN, nije vidljiva nikakva deformacija, odnosno apsorpcija pjene još nije „aktivirana“.



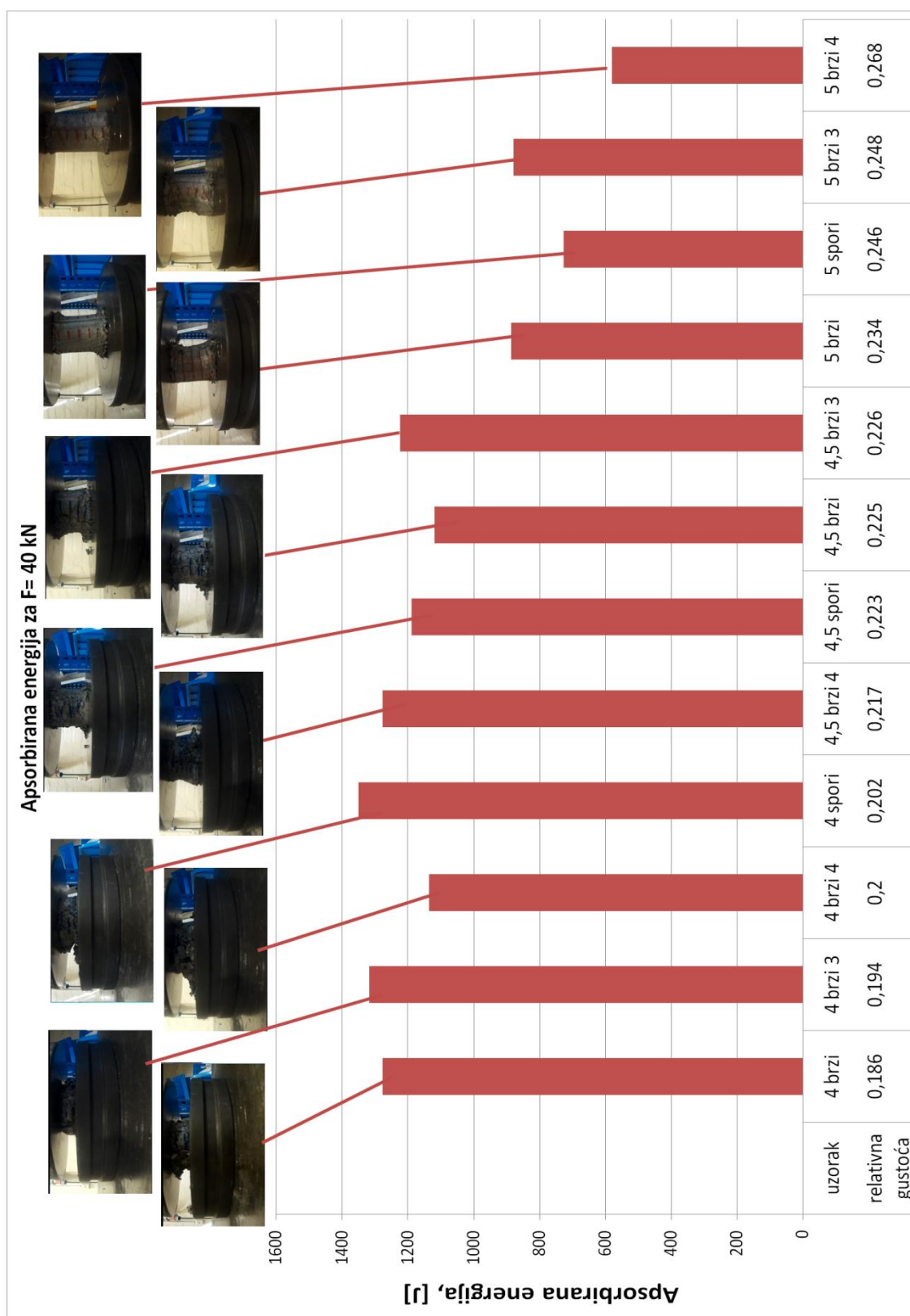
Slika 43 Apsorbirana energija za F=20 kN

Najveći iznos apsorbirane energije pri sili od 20 kN poprima uzorak 4 brzi 4 (jedan od uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom), a najmanji uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće). Iz fotografije uzoraka vidi se da su aktivirani samo uzorci manje relativne gustoće.



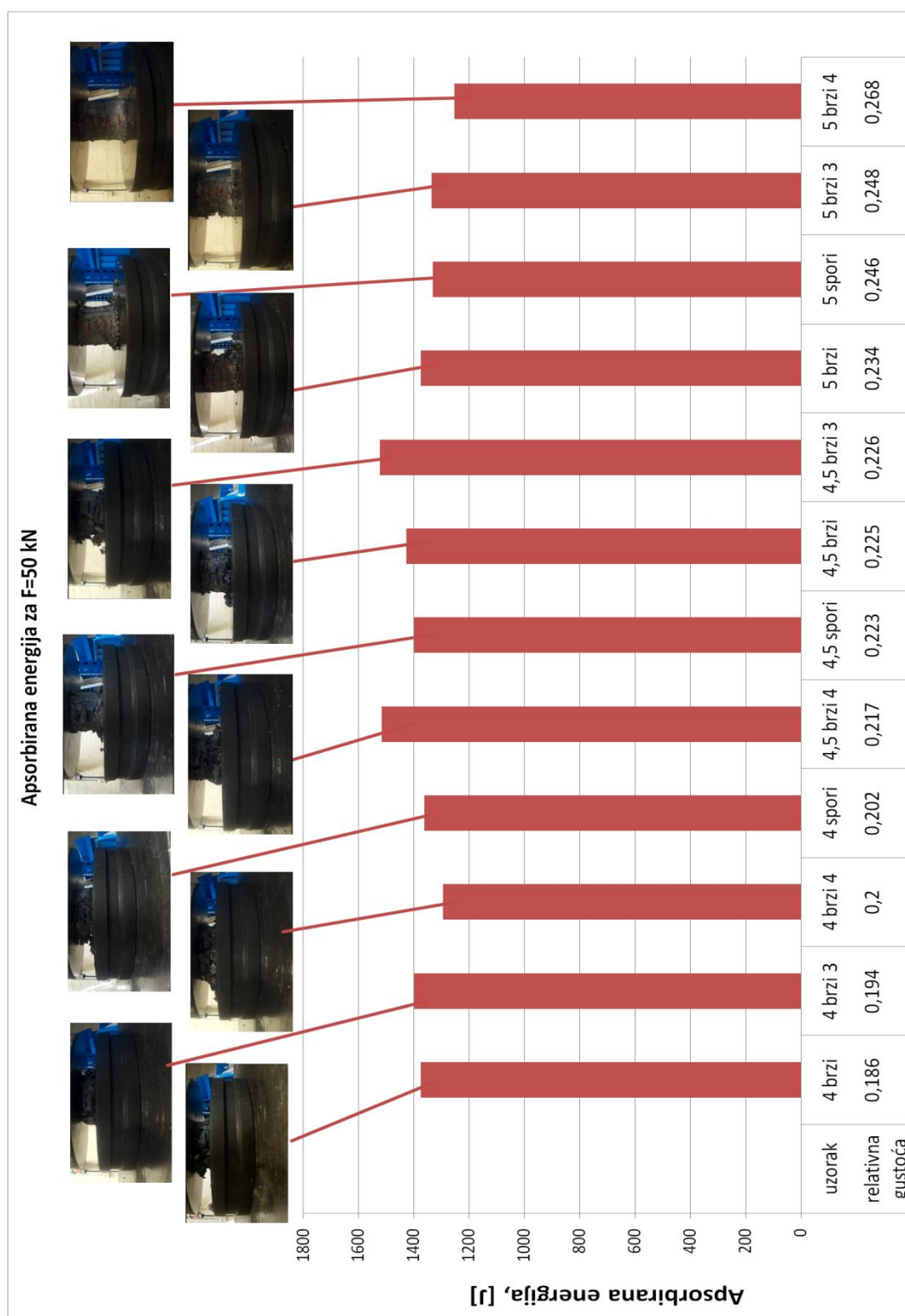
Slika 44 Apsorbirana energija za F=30 kN

Najveći iznos apsorbirane energije pri sili od 30 kN poprima uzorak 4 brz 3, a najmanji uzorak 5 brz 4 (uzorak najveće relativne gustoće). Uzorci male relativne gustoće su gotovo potpuno sabijeni, uzorci srednje relativne gustoće su sabijeni samo djelomično, a uzorci najveće relativne gustoće su se tek počeli sabijati.



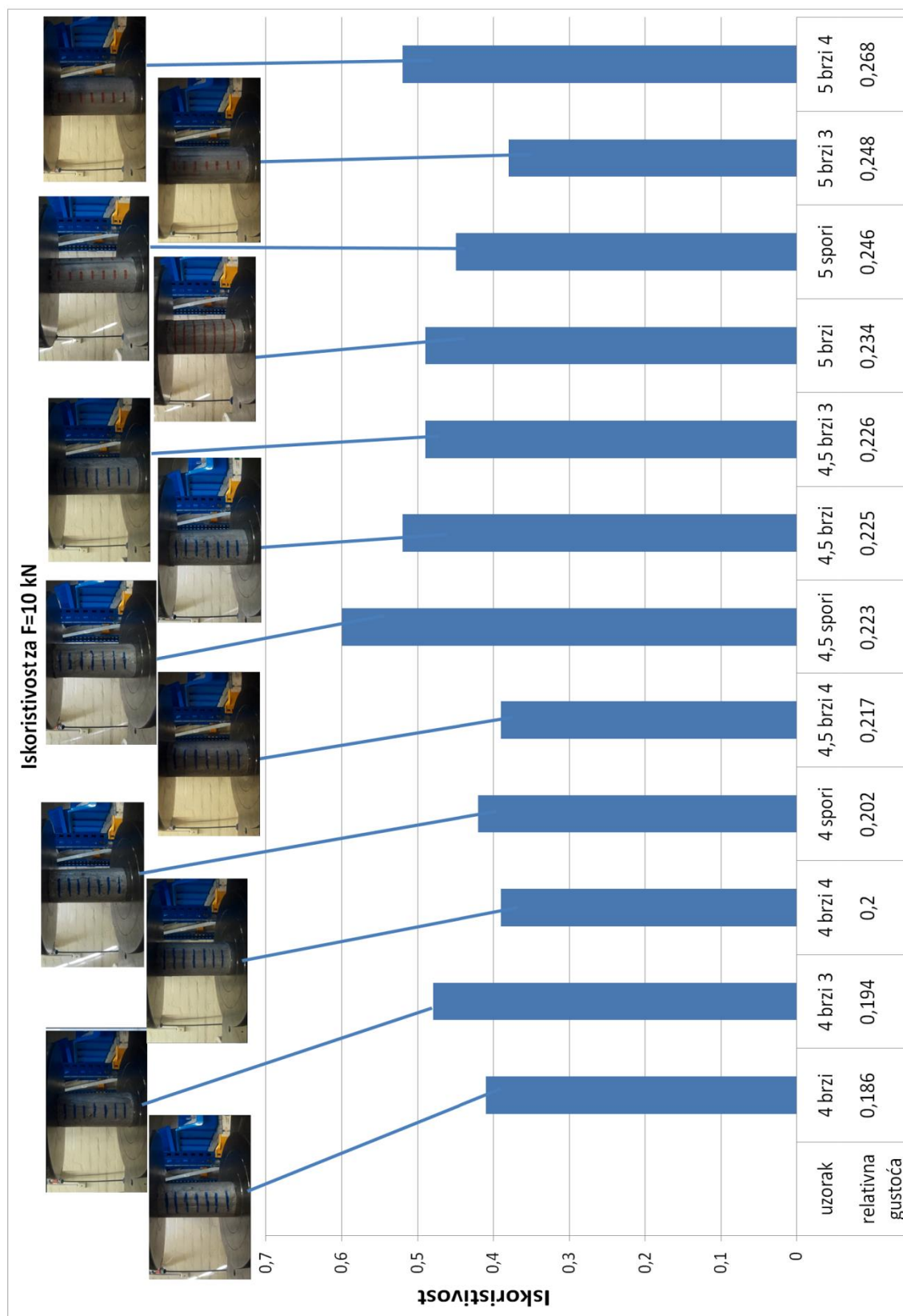
Slika 45 Apsorbirana energija za F=40 kN

Najveći iznos apsorbirane energije pri sili od 40 kN poprimaju uzorci 4 spori i 4 brzi 3 (uzorci spadaju u grupu uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom), a najmanji uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće). Uzorci najveće gustoće još nisu potpuno sabijeni



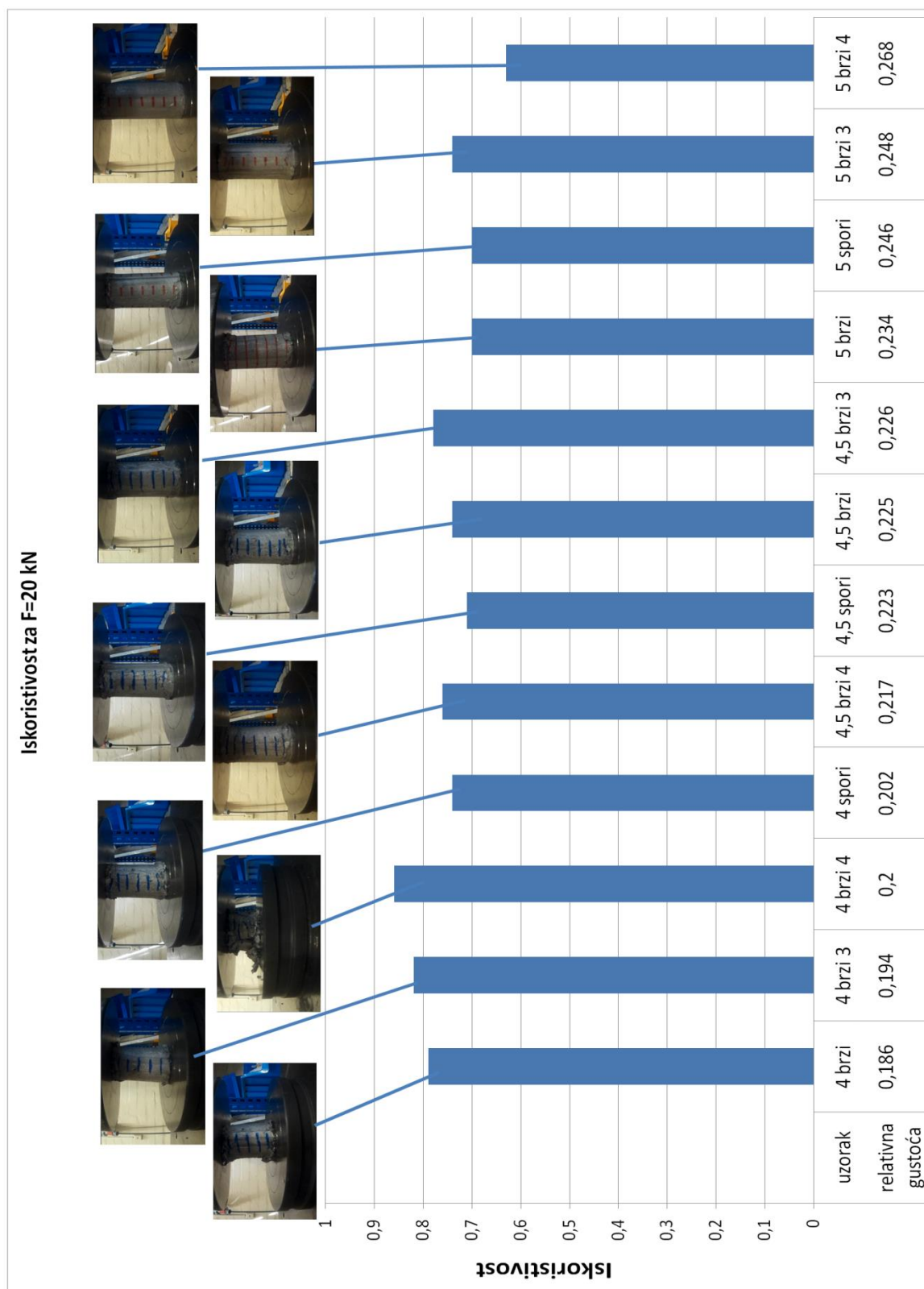
Slika 46 Apsorbirana energija za F=50 kN

Približno jednak iznos apsorbirane energije pri sili od 50 kN poprimaju gotovi svi uzorci osim 4,5 brzi 3 i 4,5 brzi 4 koji imaju nešto veću vrijednost (ovisnost apsorbirane energije o relativnoj gustoći nije potpuno izražena). I uzorci najveće gustoće su gotovo potpuno sabijeni.



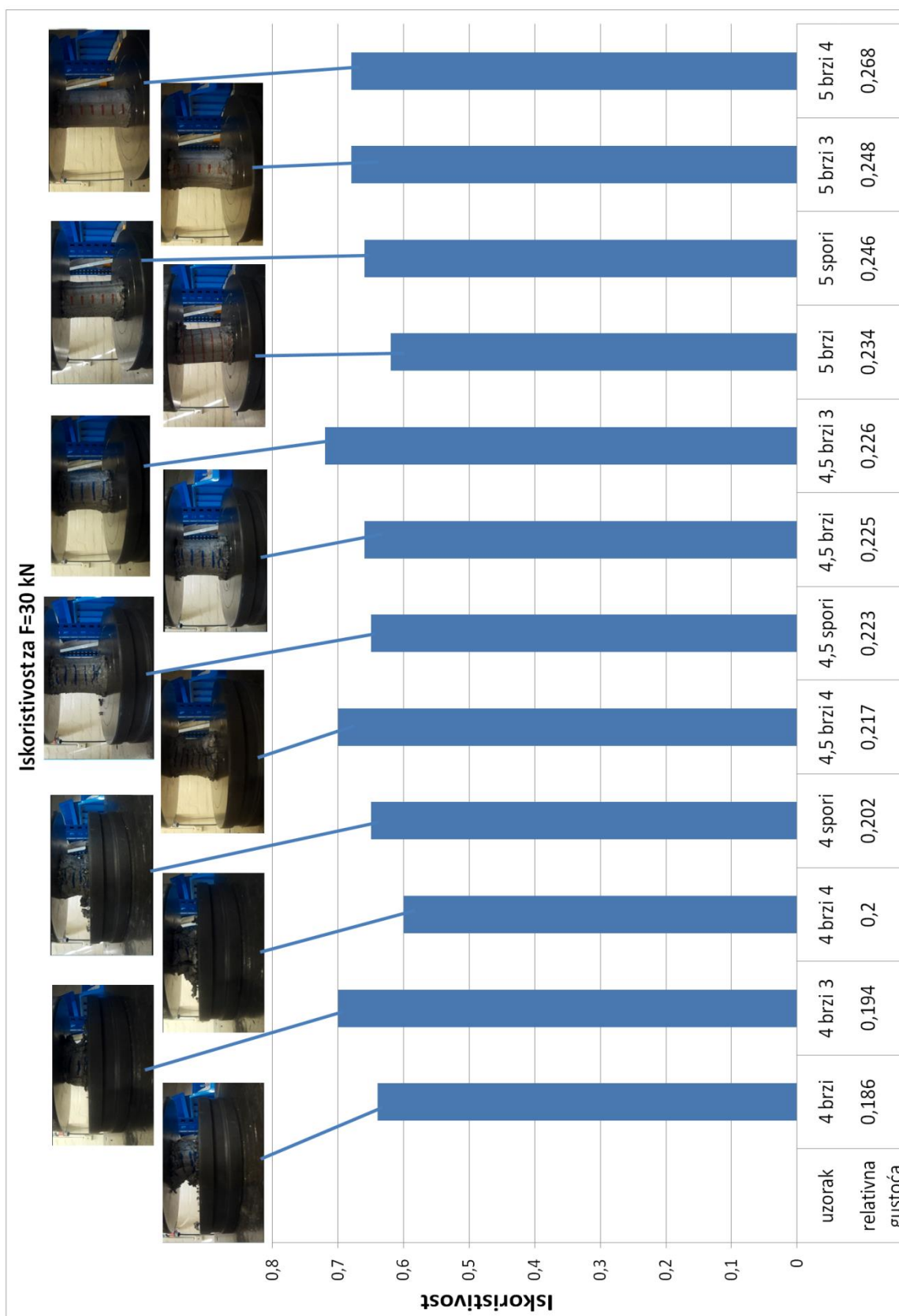
Slika 47 Iskoristivost za F=10 kN

Najveći iznos iskoristivosti pri sili od 10 kN poprima uzorak 4,5 spori, a najmanji uzorci 4 brz 4, 4,5 brz 4 i 5 brz 3 (iskoristivost pri sili 10kN nije ovisna o relativnoj gustoći).



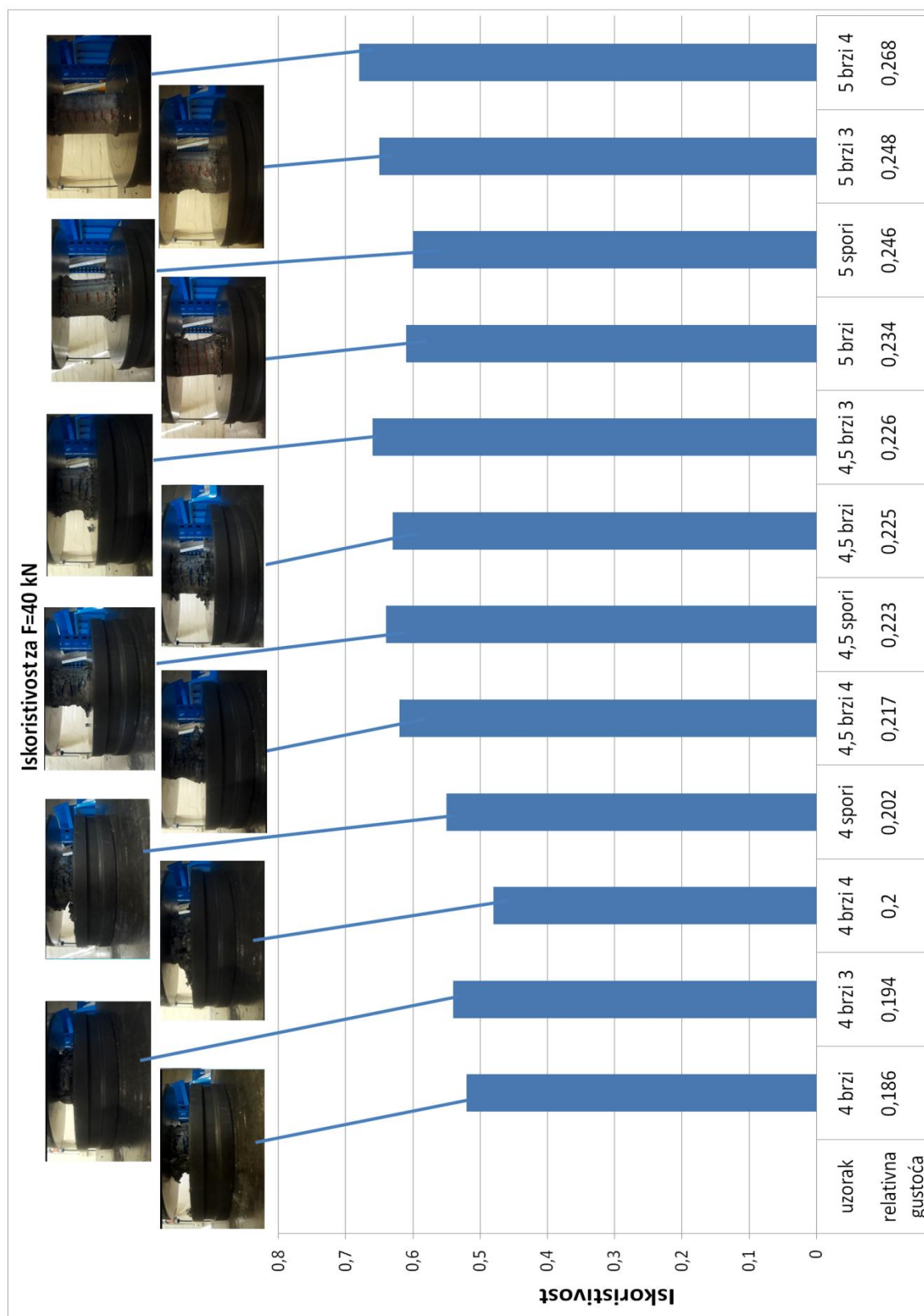
Slika 48 Iskoristivost za F=20 kN

Najveći iznos iskoristivosti pri sili od 20 kN poprima uzorak 4 brzi 4 (jedan od uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom), a najmanji uzorak 5 brzi 4 (uzorak najveće relativne gustoće).



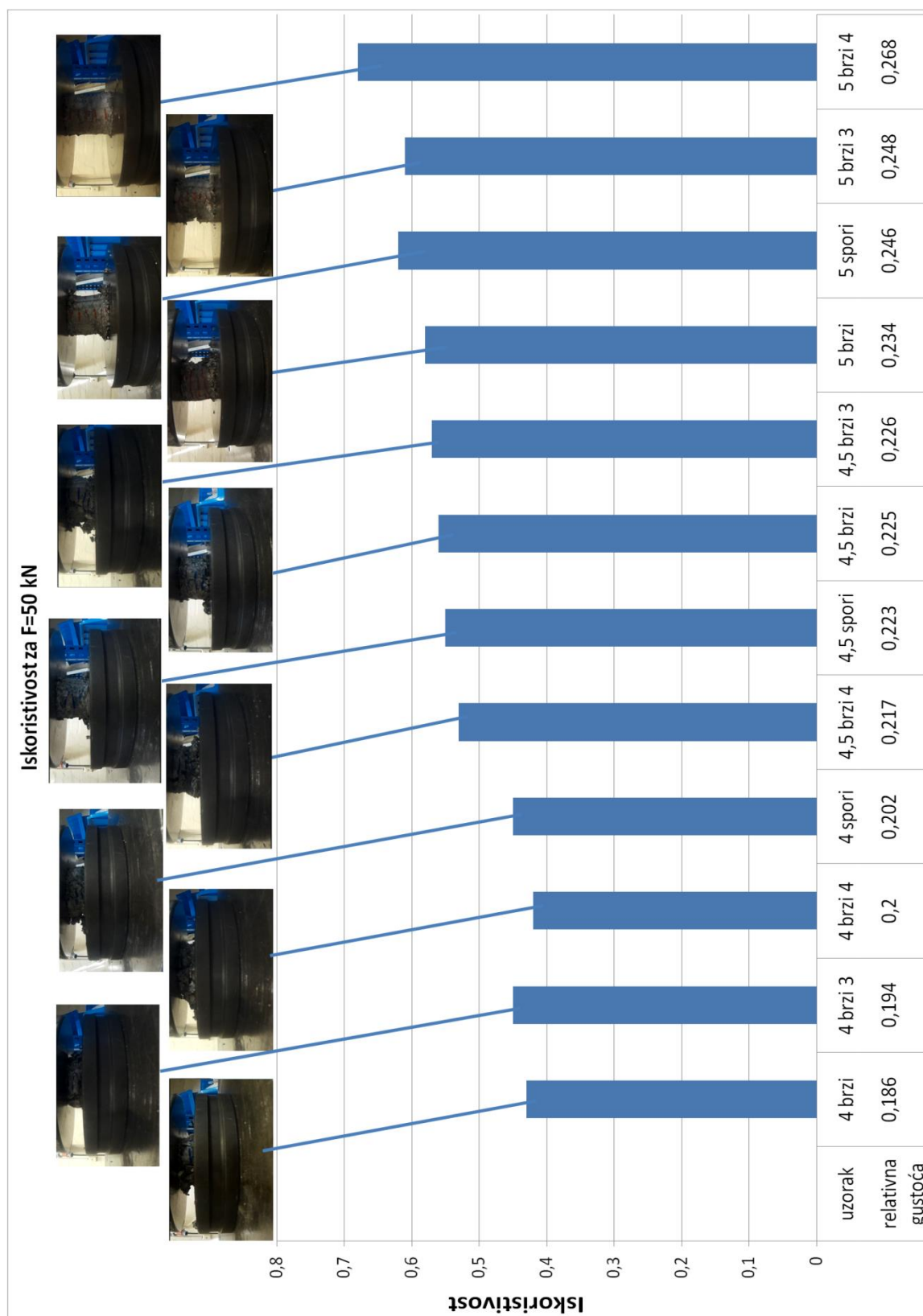
Slika 49 Iskoristivost za F=30 kN

Najveći iznos iskoristivosti pri sili od 30 kN poprima uzorak 4,5 brzi 3, a najmanji uzorak 4 brzi 4 (nije izražena ovisnost iskoristivosti o relativnoj gustoći).



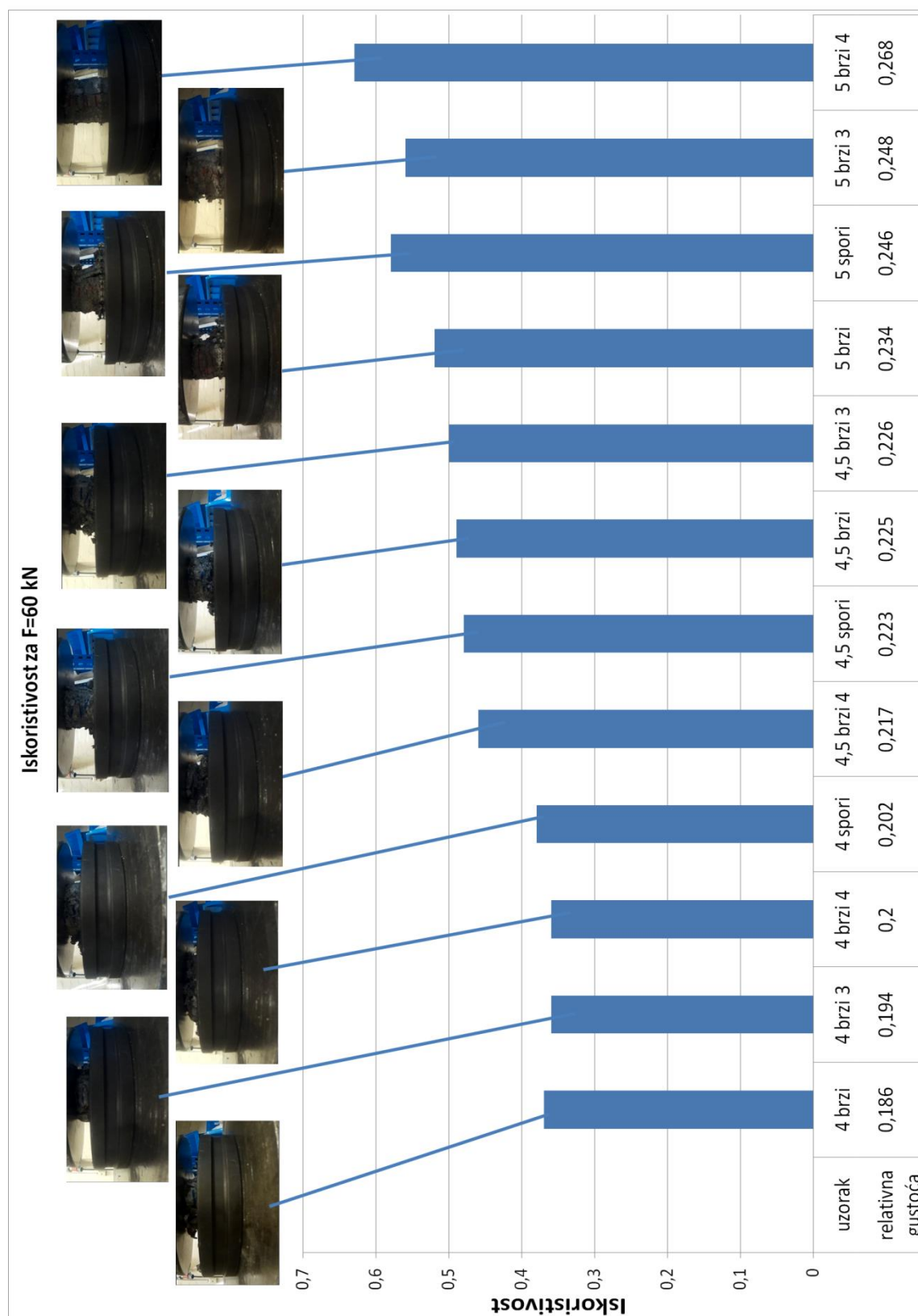
Slika 50 Iskoristivost za F=40 kN

Najveći iznos iskoristivosti pri sili od 40 kN poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak s najvećom relativnom gustoćom), a najmanji 4 brzi 4 uzorak (jedan od uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom).



Slika 51 Iskoristivost za F=50 kN

Najveći iznos iskoristivosti pri sili od 50 kN poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak s najvećom relativnom gustoćom), a najmanji uzorci 4 brzi i 4 brzi 4 (uzorci iz skupine uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom).



Slika 52 Iskoristivost za F=60 kN

Najveći iznos iskoristivosti pri sili od 60 kN poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak s najvećom relativnom gustoćom), a najmanji uzorci 4 brzi, 4 brzi 4 i 4 brzi 3 (3 uzorka iz skupine uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom).

Promatranjem ovisnosti apsorbirane energije i skraćenja, pri iznosima skraćenja od 10 mm do 50 mm, u svima slučajevima najveći iznos apsorbirane energija poprima uzorak 5 brzi 4 (uzorak s najvećom relativnom gustoćom), dok u većini slučajeva najmanji iznos apsorbirane energija poprimaju uzorci 4 brzi i 4 brzi 4 (uzorci iz skupine uzoraka s najmanjom relativnom gustoćom).

Promatranjem ovisnosti apsorbirane energije i sile, pri iznosima sile od 10 kN do 50 kN, u svima slučajevima najveći iznos apsorbirane energija poprimaju uzorci s 4 ili 4,5 prekursora (uzorci s manjom relativnom gustoćom), dok u većini slučajeva najmanji iznos apsorbirane energije poprimaju uzorci s po 5 prekursora (uzorci s najvećom relativnom gustoćom).

Promatranjem ovisnosti iskoristivosti i sile, pri iznosima skraćenja od 10 kN do 60 kN, u većini slučajeva najveći iznos iskoristivosti poprimaju uzorci s po 5 ili 4,5 prekursora (uzorci s većom relativnom gustoćom), dok u većini slučajeva najmanji iznos iskoristivosti poprimaju uzorci s po 4 prekursora (uzorci s manjom relativnom gustoćom).

8.ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i usporedbom dobivenih rezultata dolazi se do sljedećih zaključaka. Uzorci najveće relativne gustoće imaju najveći iznos apsorbirane energije u totalu (na kraju ispitivanja kada je uzorak u potpunosti sabijen), što je u korelaciji sa najstrmijim nagibom njihovim krivulje u dijagramu sila-skraćenje odnosno najvećom površinom ispod krivulje, što ih ne čini nužno optimalnim izborom. Nužan uvjet koji je potrebno zadovoljiti, kako bi materijal bio optimalan izbor za apsorpciju energije udara, je tijekom krivulje u II. području. Krivulja u dijagramu sila-skraćenje u području II. mora imati približno konstantan iznos sile. Uzevši u obzir taj uvjet krivulje sa najmanjim nagibom odnosno gotovo konstantnim iznosom sile u II. području su uzorci najmanje relativne gustoće. Količina apsorbirane energije veća je kod uzoraka s manjom relativnom gustoćom (većim udjelom pora). Iskoristivost apsorpcije energije također je veća kod uzoraka s manjom relativnom gustoćom (većim udjelom pora), ali samo kod manjih sila (pri manjim silama uzorci veće gustoće još nisu potpuno sabijeni pa nije u potpunosti iskorištena njihova mogućnost apsorpcije energije). Pri većim silama, veća je iskoristivost aluminijskih pjena veće relativne gustoće (manjeg udjela pora). To znači da je prvi korak pri odabiru optimalne gustoće aluminijske pjene procjena kod kojih sila je potrebno aktivirati apsorpcijsko svojstvo aluminijske pjene

LITERATURA

- [1] Nastupno predavanje : Gojko Marić, Zagreb, 2008.
- [2] T. Filetin, I. Kramer, G. Marić: Metalne pjene, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [3] <https://www.slideshare.net/radhe5559/development-of-carbon-foam-and-silica-foam-by-template-route> , pristupljeno 20.10.2018.
- [4] M. Keser: Tlačno ispitivanje ojačanih aluminijskih pjena, Završni rad preddiplomskog studija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] I. Hrabrić: Određivanje apsorpcije energije udara aluminijskih pjena, Završni rad preddiplomskog studija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [6] J. Baumeister, J. Banhart, M. Weber: Aluminium foams for transport industry, Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research, PowderTechnology, Lesumer Heerstraße 36, 28717 Bremen, 1997 Germany
- [7] <https://hrcak.srce.hr/file/215264> Ćorić D., Begović T., Aleksandrov-Fabijanić T. Karakterizacija morfologije metalnih pjena, pristupljeno 20.10.2018
- [8] Banhart J (2001). Manufacture, Characterisation, and Applications of Cellular Metals and Metal Foams, Progress in Materials Science 46: 559-632.
- [9] K. Stöbener, G. Rausch: Aluminium foam – polymer composites: processing and characteristics, Journal of Material Science, 44 (2009), 1506 – 1511
- [10] František Simančík: Aluminium Foam potential for ultra-lightweight structures, Institute of Materials & Machine Mechanics Slovak Academy of Sciences, Bratislava,
- [11] F. Simančík : Metallic foams – ultra light materials for structural applications, Inżynieria materialowa, Nr.5 / 2001, 823 – 828

[12] F.Chen, D. He: The energy absorbing efficiency of cellular metals under compressive loading, Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P.R. China

PRILOG

CD-R disk