

**Sveučilište u Zagrebu**

**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Siniša Horvat**

**Zagreb, 2012.**

**Sveučilište u Zagrebu**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Voditelj rada:**

**Prof.dr.sc. Krešimir Grilec**

**Siniša Horvat**

**Zagreb, 2012.**

## SAŽETAK

Metalne pjene predstavljaju novu klasu metalnih materijala, koja je još uvijek relativno nepoznata u inženjerskoj primjeni. U odnosu na druge konstrukcijske materijale prednosti su sljedeće: mala gustoća, prilagodljiva toplinska svojstva-ovisno o strukturi (otvorene ili zatvorene ćelije), mogu biti jako dobri toplinski izolatori ili mogu dobro provoditi toplinu, vatrootpornost, dobra električna vodljivost, izuzetno prigušenje energije udara, vibracija i zvuka, relativno visoka krutost sendvič konstrukcija s jezgrom metalne pjene itd. Takve sendvič konstrukcije mogu poslužiti kao zaštita od eksplozivnog djelovanja, a primjenom čeličnih ploča dovoljne debljine između kojih se nalazi metalna pjena moguće je zaštititi objekte od štetnog djelovanja eksplozije.

U ovom radu opisana su najznačajnija svojstva metalnih pjena te primjena, izrađeno je 8 uzoraka aluminijskih pjena različite gustoće, na kojima će se provesti ispitivanje otpornosti, tj. zaštite od eksplozije. Odrediti ćemo apsorpciju energije uzoraka aluminijskih pjena, izračunati potrebne debljine sendvič konstrukcije za zaštitu od različitih vrsta eksploziva.

# SADRŽAJ

Popis slika.....	I
Popis tablica.....	III
Popis oznaka.....	IV
Grčke oznake.....	V
Izjava.....	VI
1. UVOD .....	1
2. SVOJSTVA METALNIH PJENA .....	2
2.1. Mehanička svojstva metalnih pjena.....	2
2.1.1. Krutost.....	4
2.1.2. Tlačna čvrstoća.....	5
2.1.3. Vlačna čvrstoća.....	7
2.1.4. Otpornost na umor materijala.....	9
2.1.5. Osjetljivost na ureze.....	11
2.1.6. Otpornost na puzanje materijala.....	12
2.2. Ostala svojstva.....	15
2.2.1. Toplinska svojstva metalnih pjena.....	15
2.2.2. Zvučna svojstva metalnih pjena.....	16
2.2.3. Prigušenje vibracija metalnih pjena.....	17
2.2.4. Električna svojstva metalnih pjena.....	19
3. PRIMJENA METALNIH PJENA.....	22
4. APSORPCIJA ENERGIJE UDARA.....	29
4.1. Općenito o apsorpciji energije udara.....	29
4.2. Propagacija udarnog vala.....	35
4.3. Teoretski model određivanja apsorbirane energije.....	37
4.4. Iskoristivost apsorpcije energije udara.....	40

5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	42
5.1. Postupak izrade uzoraka od Al metalne pjene.....	42
5.2. Statičko tlačno ispitivanje uzoraka .....	43
5.3. Apsorbirana energija uzoraka od Al metalnih pjena.....	46
5.4. Izračun debljine sendvič konstrukcije za zaštitu od eksplozije.....	48
6. ZAKLJUČAK.....	54

## Popis slika:

Slika 1.1. a) pluto; b) balza; c) spužva; d) kost; e) koralj; f) riblja kost; g) list irisa; h) stabljika biljke [1].....	1
Slika 2.1. a) zatvorena ćelija [1], b) otvorena ćelija metalne pjene [1].....	4
Slika 2.2. Dijagram naprezanje-deformacija metalnih pjena pri tlačnom opterećenju..	5
Slika 2.3. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti [5].....	6
Slika 2.4. Dijagram naprezanje-istezanje Al pjena [1].....	7
Slika 2.5. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće napravljeni od CYMAT pjene, [5].....	7
Slika 2.6. Prikaz ovisnosti umora pri maksimalnom broju ciklusa o relativnoj gustoći nekih Al-pjena. [3].....	8
Slika 2.7. Način 1. Skraćenje Al pjene u uvjetima umora izazvano tlačnim opterećenjima [3].....	9
Slika 2.8. Način 2. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [4].....	9
Slika 2.9. Način 3. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [4].....	9
Slika 2.10. Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja [3] .....	10
Slika 2.11. Urezna čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ( $R = 0,1$ ) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom [3].....	11
Slika 2.12. Prikaz dužinske deformacija pri puzanju u ovisnosti o vremenu za Al- pjene otvorenih ćelija kod (a) vlačnog i (b) tlačnog opterećenja. [5].....	12
Slika 2.13. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al [5].....	15
Slika 2.14. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode; b) funkcija prigušenja [3].....	16
Slika 2.15. Mjerenje električnih svojstava metalnih pjena kontaktom u četiri točke....	17
Slika 3.1. Primjer sendvič-konstrukcije s jezgrom od metalne pjene [5].....	19
Slika 3.2. Primjena metalnih pjena u autoindustriji [1].....	19
Slika 3.3. Primjena metalnih pjena u autoindustriji [1].....	20
Slika 3.4. Branik automobila napravljen od aluminijske pjene [2].....	20
Slika 3.5. Udarni test nosača motora BMW-a [1].....	21
Slika 3.6. Izmjenjivač topline [5].....	21

Slika 3.7. Grijaća ploča napravljena od Alporas ojačane pjene [5].....	22
Slika 3.8. Raspored topline u običnoj grijaćoj ploči (lijevo) i Alporas grijaćoj ploči (desno) [5].....	22
Slika 3.9. Vijadukt čija je donja površina izvedena od metalne pjene [1].....	23
Slika 3.10. Prigušivači zvuka od aluminijskih pjena [3].....	23
Slika 3.11. Filter od metalne pjene na bazi bronce [5].....	24
Slika 3.12. Lijevani proizvod od aluminijske pjene [5].....	24
Slika 3.13. Predmeti od metalnih pjena za estetske svrhe[5].....	25
Slika 3.14. Sendvič-konstrukcija s jezgrom od niklene pjene [1].....	25
Slika 4.1. 2-D prikaz deformacije i efekta apsorpcije energije kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama [2].....	26
Slika 4.2. Shematski dijagram naprezanje-deformacija idealnih metalnih pjena.....	28
Slika 4.3. Krivulje koje pokazuju apsorpciju energije pri a) savijanju b) tlaku [5].....	28
Slika 4.4. Dijagram naprezanje-deformacija otvorenih (ERG) i zatvorenih (Alporas) metalnih pjena. [3].....	29
Slika 4.5. Apсорpcija energije po jedinici volumena pri 25% deformaciji za dostupne komercijalne metalne pjene [4].....	30
Slika 4.6 Prikaz vrijednosti tlačne čvrstoće u ovisnosti o gustoći za komercijalne metalne pjene. [4].....	30
Slika 4.7. Prikaz specifične krutosti u ovisnosti o specifičnoj čvrstoći za komercijalno dostupne metalne pjene. [4].....	31
Slika 4.8. Krivulja naprezanje-deformacija [2].....	32
Slika 4.9. Pojednostavljeni model dijagrama tlačnog naprezanja - relativnog skraćenja za ćelijaste materijale [3].....	36
Slika 4.10. Dijagram tlačnog naprezanja i apсорpcijske iskoristivosti po relativnom skraćenju AISi pjene ( $\rho = 0.36 \text{ g/cm}^3$ ) [4].....	37
Slika 4.11. Apсорbirana deformacijska energija (lijevo, crvena) i energija idealnog apсорpcijskog materijala (desno, zeleno).....	37
Slika 5.1. ALULIGHT ( SJAJ ) AISi 0.6 TiH2 0.4 .....	38
Slika 5.2. Priprema za izradu uzoraka.....	38
Slika 5.3. Zvonasta peć tvrtke Feliks metal d.o.o.....	38
Slika 5.4. Kalup nakon vađenja iz peći.....	39
Slika 5.5. Hlađenje kalupa.....	39
Slika 5.6. Izrađeni uzorci od Al metalne pjene.....	39
Slika 5.7. Kidalica WPM EU 40 mod.....	40

Slika 5.8. Uzorak 1: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	41
Slika 5.9. Uzorak 2: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	41
Slika 5.10. Uzorak 3: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	41
Slika 5.11. Uzorak 4: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	42
Slika 5.12. Uzorak 5: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	42
Slika 5.13. Uzorak 6: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	42
Slika 5.14. Uzorak 7: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	43
Slika 5.15. Uzorak 8: a) početak, b) kraj, c) dobiveni dijagram.....	43
Slika 5.16. Uzorci nakon statičkog tlačnog ispitivanja.....	43
Slika 5.17. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 137.5$ kN.....	44
Slika 5.18. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 75$ kN.....	45
Slika 5.19. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 105$ kN.....	45
Slika 5.20. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 112.5$ kN.....	46
Slika 5.21. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 130$ kN.....	46
Slika 5.22. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 130$ kN.....	47
Slika 5.23. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 70$ kN.....	47
Slika 5.24. Površina ispod krivulje za $F_{sr} = 65$ kN.....	48

## Popis tablica :

Tablica 2.1. Izrazi za računanje svojstava metalnih pjena .....	2
Tablica 2.2. Mehanička svojstva metalnih pjena .....	3
Tablica 2.3. Električna otpornost metalnih pjena.....	17
Tablica 3.1. Moguća primjena metalnih pjena .....	18
Tablica 5.1. Apsorbirana energija uzoraka.....	48
Tablica 5.2. Debljina Al pjene.....	53



## Popis oznaka

$A$ ,	površina, mm <sup>2</sup>
$a^*$ ,	negativno ubrzanje, m/s <sup>2</sup>
$C$ ,	konstanta
$C_p$ ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, J/kgK
$C_v$ ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom volumenu, J/kgK
$E$ ,	modul elastičnosti, GPa
$E_f$ ,	modul savitljivosti, GPa
$E_i$ ,	iskoristivost apsorpcijske energije
$F$ ,	sila, N
$F_{max}$ ,	maksimalna sila elastične deformacije, N
$G$ ,	modul smičnosti, GPa
$h$ ,	debljina stjenke paketa od metalne pjene, mm
$H$ ,	tvrdoća
$k$ ,	nagib krivulje
$K_{IC}$ ,	lomna žilavost, MPa·m <sup>1/2</sup>
$L$ ,	latentna toplina taljenja, kJ/kg
$L_0$ ,	početna mjerna duljina, mm
$m$ ,	masa, kg
$R_d$ ,	dinamička izdržljivost, MPa
$R_e$ ,	granica tečenja materijala pjene, MPa
$R_{et}$ ,	granica stlačivanja, MPa
$R_m$ ,	vlačna čvrstoća, MPa
$R_{mt}$ ,	tlačna čvrstoća, MPa
$s$ ,	skraćenje, mm
$S_0$ ,	ploština poprečnog presjeka, mm
$T_m$ ,	talište, K
$T_{max}$ ,	maksimalna radna temperatura, K
$T_{min}$ ,	minimalna radna temperatura, K
$v$ ,	brzina, m/s

- $W$ , apsorbirana energija po jedinici volumena, MJ/m<sup>3</sup>  
 $x$ , veličina relativnog skraćivanja u točki D, mm/mm  
 $y$ , veličina tlačnog naprezanja u točki D, N/mm<sup>2</sup>

## Grčke oznake

- $\alpha$ , koeficijent toplinske rastezljivosti, 1/K  
 $\gamma$ , električna vodljivost,  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$   
 $\varepsilon$ , deformacija, sabijanje, relativno skraćivanje, mm/mm ili %  
 $\varepsilon_0$ , relativno skraćivanje, mm/mm  
 $\varepsilon_D$ , deformacija pri zgušnjavanju, mm/mm ili %  
 $\varepsilon_t$ , vlačna duktilnost  
 $\varepsilon_s$ , sabijanje, mm/mm  
 $\eta$ , iskoristivost apsorbirane energije  
 $\eta^c$ , faktor gubitka, %  
 $\lambda$ , koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK  
 $\nu$ , Poissonov faktor  
 $\rho$ , gustoća metalne pjene, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_s$ , gustoća neporoznog metala, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho/\rho_s$ , relativna gustoća  
 $\sigma$ , naprezanje, MPa  
 $\sigma_c$ , tlačno naprezanje, N/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_t$ , tlačno naprezanje, N/mm<sup>2</sup>

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Koristim ovu priliku da se zahvalim na stručnoj pomoći prof.dr.sc. Krešimiru Grilecu i kolegama na Katedri za materijale i tribologiju.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama koje sam upoznao tijekom studiranja na stručnoj pomoći, te svojoj obitelji na potpori i razumijevanju.

Siniša Horvat

U Zagrebu 20. svibnja 2012.