

Tlačno ispitivanje ojačanih aluminijskih pjena

Keser, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

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:235:218509>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Keser

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:

Matej Keser

Zagreb, 2011.

Izjava

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

Zahvaljujem profesoru dr. sc. Krešimiru Grilecu na stručnoj pomoći u izradi ovog rada, laborantu Božidaru Bušetinčanu na pomoći pri izradi uzoraka te laborantu Alanu Jankoviću na pomoći pri ispitivanju.

Također, zahvaljujem i djevojci Ivani te cijeloj svojoj obitelji na bezrezervnoj potpori tijekom studija.

Matej Keser

U Zagrebu, 29. lipnja 2011.

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis oznaka	IV
Popis slika	V
Popis tablica	IX
Sažetak	X
1. Uvod	1
2. Metalne pjene	2
3. Dobivanje metalnih pjena	3
3.1. Dobivanje metalnih pjena u rastaljenoj fazi	4
3.1.1. Pjenjenje s plinom	4
3.1.2. Pjenjenje plinom oslobođenim česticama rastvorenim u taljevini	5
3.1.3. Eutektičko skrućivanje plin-metal	7
3.1.4. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi	8
3.1.5. Postupci lijevanja	11
3.1.6. Oblikovanje raspršivanjem	12
3.2. Dobivanje metalnih pjena u čvrstoj fazi	13
3.2.1. Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama	13
3.2.2. Ekspanzija plina u čvrstom stanju	15
3.2.3. Prešanje metalnog praha i punila	16
3.2.4. Sinteriranje praha ili vlakana	18
3.2.5. Metalni prah s vezivom	19
3.2.6. Reakcijsko sinteriranje	21
3.3. Parna faza metala	21
3.3.1. Taloženje metala iz parne faze	21
3.4. Metalni ioni	22
3.4.1. Elektrotaloženje iz tekuće faze	22
4. Metode karakterizacije ćelijastih materijala	24

4.1. Nerazorna ispitivanja	24
4.1.1. Mjerenje gustoće	24
4.1.2. Ispitivanje upotrebom obojanog penetranta	24
4.1.3. Radiografija X-zrakama i radioskopija	25
4.1.4. Računalna tomografija (X-zrakama)	25
4.1.5. Ispitivanje vrtložnim strujama	26
4.1.6. Mjerenje akustičnih svojstava	27
4.1.7. Analiza vibracijskih svojstava	27
4.1.8. Porozimetrija i analiza protoka fluida	27
4.1.9. Ispitivanje električne i toplinske vodljivosti	29
4.1.10. Ostale metode	29
4.2. Razorna ispitivanja	29
4.2.1. Analiza vizualnom metodom	29
4.2.2. Mehanička ispitivanja	30
4.2.3. Ispitivanje korozijske postojanosti	31
5. Primjena metalnih čelijastih materijala	32
5.1. Općenito	32
5.2. Konstrukcijska primjena metalnih pjena u različitim industrijskim sektorima	33
5.2.1. Automobilska industrija	33
5.2.2. Mala masa konstrukcija	35
5.2.3. Apsorpcija energije udara	36
5.2.4. Prigušenje zvuka	38
5.2.5. Zrakoplovna i svemirska industrija	41
5.2.6. Upotreba u brodogradnji	42
5.2.7. Željeznička industrija	43
5.2.8. Građevinska industrija	44
5.2.9. Upotreba u konstrukciji strojeva	46
5.2.10. Oprema za sport	48
5.2.11. Biomedicinska industrija	48
5.3. Funkcionalna primjena metalnih pjena	49
5.3.1. Filtriranje i odvajanje	49
5.3.2. Izmjenjivači topline i rashladni uređaji	50

5.3.3.	Katalizatori	51
5.3.4.	Skladištenje i transport tekućina	52
5.3.5.	Kontrola protoka fluida	52
5.3.6.	Prigušivači	52
5.3.7.	Raspršivači	53
5.3.8.	Elektrode za baterije	53
5.3.9.	Protupožarna primjena	53
5.3.10.	Čišćenje vode.....	54
5.3.11.	Upotreba ćelijastih metala u umjetnosti i prostornom uređenju.....	54
6.	Eksperimentalni dio	57
6.1.	Idejni projekt.....	57
6.2.	Izrada uzoraka.....	57
6.3.	Tipovi ojačanja	58
6.4.	Statičko tlačno ispitivanje.....	60
6.5.	Analiza metode i rezultata ispitivanja	61
7.	Zaključak.....	72
	Literatura	73

Popis oznaka

F ,	tlačna sila, kN
F_M ,	maksimalna tlačna sila, kN
W ,	apsorbirana energija, J
W_{idealno} ,	apsorbirana energija idealnog apsorpcijskog materijala, J
δ ,	skraćenje, mm
δ_D ,	kritično skraćenje, mm
ε ,	deformacija, mm/mm ili %
η ,	iskoristivost apsorbirane energije, J/J ili %
σ ,	naprezanje, N/mm ²

Popis slika

Slika 1 – Pjenjenje taljevine uz ubrizgavanje plina (proizvodnja MMC pjena)	4
Slika 2 – Presjek aluminijske Alcan pjene	5
Slika 3 – Proizvodnja Alporas metalnih pjena	6
Slika 4 – Presjek Alporas pjene.....	6
Slika 5 – Postupak proizvodnje Gasar metalnih pjena	7
Slika 6 – Dijagram stanja metal – vodik	7
Slika 7 – Presjek „gasar“ metalne pjene.....	8
Slika 8 – Postupak proizvodnje Alulight metalnih pjena	9
Slika 9 – Alulight pjena.....	10
Slika 10 – Proizvodi od Alulight metalnih pjena	10
Slika 11 – Proizvodnja Duocel metalnih pjena	11
Slika 12 – Izgled Duocel metalne pjene	12
Slika 13 – Proces proizvodnje raspršivanjem („Osprey process“).....	12
Slika 14 – Postupak proizvodnje metalnih pjena s kuglastim šupljinama	14
Slika 15 – Primjeri uporabe metalnih pjena s kuglastim šupljinama	14
Slika 16 – Postupak proizvodnje metalnih pjena ekspanzijom plina u čvrstom stanju.....	15
Slika 17 – Sendvič konstrukcija s metalnom pjenom proizvedena ekspanzijom plina u čvrstom stanju	16
Slika 18 – Postupak proizvodnje metalnih pjena prešanjem metalnog praha i punila.....	17
Slika 19 – Metalna pjena od titana s magnezijским granulama kao punilom	18
Slika 20 – Sinterirana bronca s česticama promjera 100 μm	19
Slika 21 – Postupak proizvodnje metalnih pjena od metalnog praha s vezivom	20
Slika 22 – Izgled mikrosaća	20

Slika 23 – Površina i presjek „Incofoam“ pjene od nikla s trima različitim stupnjevima poroznosti	21
Slika 24 – Postupak elektrotaloženja metala	22
Slika 25 – Metalna pjena dobivena elektrotaloženjem iz tekuće faze.....	23
Slika 26 – Izgled olovne pjene ispitivane X-zrakama, debljine 6 mm, dimenzija 60 x 20 mm ²⁵	
Slika 27 – Trodimenzionalni prikaz cinkove pjene dobiven računalnom tomografijom	26
Slika 28 – Pad tlaka fluida pri ispitivanju metalnih pjena s različitim veličinama pora	28
Slika 29 – Priprema uzorka i obrada slike za vizualnu metodu ispitivanja.....	30
Slika 30 – Način primjene metalnih pjena ovisno o stupnju otvorenosti ćelija	33
Slika 31 – Glavna područja primjene pjena u automobilskoj industriji.....	34
Slika 32 – Primjena aluminijske pjene kao elemenata za apsorpciju energije.....	36
Slika 33 – Duocel aluminijska pjena promjera 5 cm u FMTV vozilu za zaštitu posade pri udaru.....	37
Slika 34 – Usporedba ponašanja pjena pri naprezanju i deformaciji ovisno o smjeru djelovanja sile	38
Slika 35 – Konstrukcija od aluminijske pjene za apsorpciju zvuka i vibracija na nadvožnjaku	39
Slika 36 – Aluminijske pjene za apsorpciju zvuka, obojane otpornije na koroziju	40
Slika 37 – Vrata od aluminijske pjene	41
Slika 38 – Panel za zaštitu ključne NASA-ine opreme od udara meteorita u svemiru	42
Slika 39 – Model broda Bioship1 sa dnom i oplatom trupa zamijenjenima aluminijskom pjenom te tako smanjenom težinom 30%	43
Slika 40 – Primjena aluminijskih pjena na tramvajima.....	44
Slika 41 – Primjena aluminijskih pjena u zgradama	45
Slika 42 – Primjena u izgradnji poslovnih prostora	46
Slika 43 – Upotreba aluminijskih pjena na teleskopskim ogledalima	47
Slika 44 – Aluminijska pjena sa zatvorenim ćelijama pluta na vodi.....	47

Slika 45 – Ulošci za tenisice od aluminijske pjene	48
Slika 46 – Uljni separator	50
Slika 47 – Izmjenjivač topline.....	51
Slika 48 – Prigušivači.....	53
Slika 49 – Vatrootporne ploče aluminijske pjene za toplinsku izolaciju	54
Slika 50 – Drška noža od aluminijske pjene i smole.....	55
Slika 51 – Audiofilska polica s unutrašnjosti od Alporas pjene	56
Slika 52 – Postupak određivanja količine (mase) prekursora i punjenja kalupa.....	57
Slika 53 – Elektrootporna peć i hlađenje kalupa uranjanjem u vodu.....	58
Slika 54 – Neujednačenost strukture aluminijske pjene sa „H“ tipom ojačanja	60
Slika 55 – Kidalica WPM EU 40 mod. na kojoj je obavljeno ispitivanje	60
Slika 56 – Tijek statičkoga tlačnog ispitivanja i uvid u nehomogenost H1 uzorka	61
Slika 57 – Apsorbirana energija kao površina ispod krivulje u dijagramu tlačna sila – skraćenje.....	62
Slika 58 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H1	64
Slika 59 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H2	64
Slika 60 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H3	65
Slika 61 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H4	65
Slika 62 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H5	66
Slika 63 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka O1	66

Slika 64 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka O2	67
Slika 65 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka O3	67
Slika 66 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka III 1	68
Slika 67 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka III 2	68
Slika 68 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka III 3	69
Slika 69 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N1	69
Slika 70 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N2	70
Slika 71 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N3	70
Slika 72 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N4	71

Popis tablica

Tablica 1 – Pregled različitih načina dobivanja metalnih čelijskih materijala.....	3
Tablica 2 – Tipovi ojačanja i njihove karakteristike	59
Tablica 3 – Vrijednosti apsorbirane energije realnog i idealnog materijala te iskoristivost svih uzoraka	63

Sažetak

Aluminijske se pjene kao i ostale metalne pjene još uvijek ne svrstavaju pod konvencionalne materijale zbog njihove ograničene uporabe i nedovoljno dostupnih informacija o njihovom ponašanju pri proizvodnji i u eksploataciji. No, one se sve više ističu mnogim dobrim svojstvima poput male mase, visoke krutosti ili apsorpcije energije udara. Upravo ovo zadnje svojstvo ispituje se statičkim tlačnim ispitivanjem što je tema ovog rada.

U teorijskom dijelu opisuje se postupak proizvodnje, ispitivanja, karakterizacije i neki primjeri primjene aluminijskih pjena. Eksperimentalni dio opisuje izradu uzoraka s različitim ojačanjima, njihovo tlačno ispitivanje te se dobiveni podaci obrađuju i na osnovu njih donosi se konačni zaključak.

1. Uvod

Metalne su pjene čovjekov pokušaj oponašanja strukture i svojstava krutih prirodnih ćelijastih materijala poput drveta, kosti, hrskavice i morske spužve. Prvi patenti metalnih pjena prijavljeni su prije pedesetak godina, ali intenzivna su istraživanja počela tek prije desetak godina. Iako su već neko vrijeme dostupne na tržištu metalne pjene nisu u cijelosti istražene te je njihov razvoj u tehnički materijal tek počeo. Svojstva im bitno određuje kemijski sastav i oblik ćelija. Zbog visoke cijene trenutno se upotrebljavaju u visokotehnološkim i visokovrijednim proizvodima poput letjelica, luksuznih automobila, audiofilske opreme, vojnih vozila i dizajnerskog namještaja.

2. Metalne pjene

Metalne pjene su relativno nova, nedovoljno ispitana vrsta materijala. Dobivaju se različitim postupcima proizvodnje iz taljevine ili praha. Danas se najčešće upotrebljavaju metalne pjene od aluminija ili nikla, iako ih je moguće dobiti od magnezija, olova, cinka, bakra, bronce, titana, čelika, čak i zlata. Njihova svojstva određuju se promjenom parametara u procesu proizvodnje. Glavne su odlike pjena: mala gustoća, relativno visoka krutost, negorivost, dobra izolacijska svojstva te odlična apsorpcija energije pri udaru. U inženjerskoj primjeni metalne pjene nisu još u cijelosti ispitane, a proizvodni procesi nisu dovoljno savršeni da bi se dobila točno tražena svojstva. Unatoč tome, metalne pjene imaju značajnu prednost u primjeni kod statičnih konstrukcijskih elemenata, uspješno apsorbiraju energiju (toplinsku, svjetlosnu, energiju udarca), dobri su akustični izolatori te su pogodne za druge specijalizirane primjene. Metalne pjene su netoksične i mogu se reciklirati. U budućnosti metalne pjene će se primjenjivati u elementima gdje do izražaja treba doći više dobrih svojstava ovog materijala odjednom (npr. protupožarna vrata – ne smiju goriti ili se rastaliti, moraju imati dobra mehanička svojstva i biti relativno lagana).

3. Dobivanje metalnih pjena

Mnogo je različitih postupaka za dobivanje metalnih pjena. S obzirom na stanje materijala dijele se u četiri glavne skupine, ovisno o tome od čega se formiraju:

- rastaljenog metala,
- čvrstog metala u prahu,
- parne faze metala ili metalnih spojeva,
- otopine metalnih iona.

U tablici 1 nabrojani su postupci proizvodnje prema glavnim skupinama. U svakom je postupku razmjerno moguće utjecati na relativnu gustoću te otvorenost, oblik i veličinu ćelija. U nastavku će svaki postupak proizvodnje metalnih pjena biti ukratko objašnjen.

Tablica 1 – Pregled različitih načina dobivanja metalnih ćelijskih materijala [2]

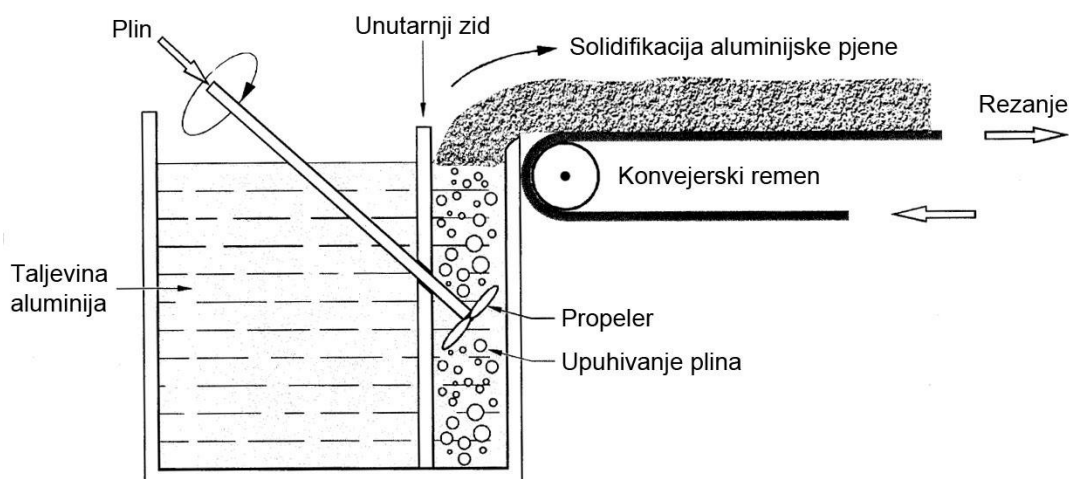
Metalne pjene			
Rastaljeni metal	Čvrsti metal u prahu	Parna faza metala	Metalni ioni
<ul style="list-style-type: none"> •Pjenjenje s plinom •Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini •Eutektičko skrućivanje plin-metal •Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi •Postupci lijevanja •Oblikovanje raspršivanjem 	<ul style="list-style-type: none"> •Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama •Ekspanzija plina u čvrstom stanju •Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi •Prešanje metalnog praha i punila •Sinteriranje praha ili vlakana •Metalni prah s vezivom •Reakcijsko sinteriranje 	<ul style="list-style-type: none"> •Taloženje metala iz parne faze 	<ul style="list-style-type: none"> •Elektrotaloženje iz tekuće faze

3.1. Dobivanje metalnih pjena u rastaljenoj fazi

Ovim se postupcima ćelijasta struktura dobiva od rastaljenog metala. Metalna se pjena može proizvesti direktnim pjenjenjem rastaljenog metala, neizravno uz pomoć polimerne pjene ili lijevanjem metala oko punila kojim se zamjenjuje prostor budućih šupljina.

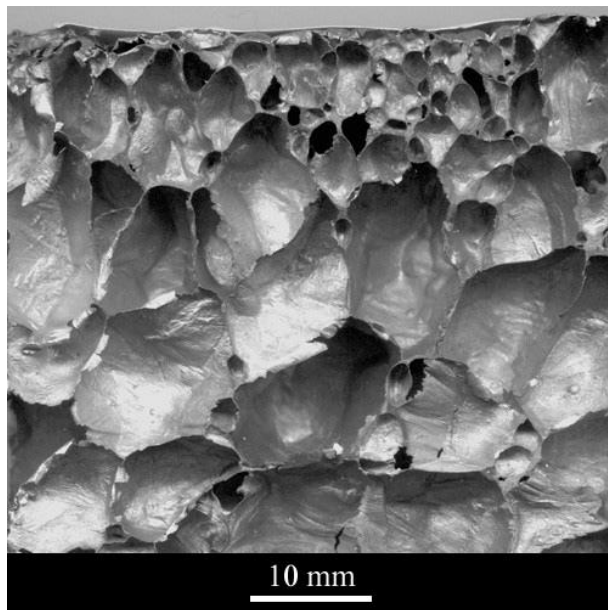
3.1.1. Pjenjenje s plinom

Taljevina metala može se izravno pjeniti pod određenim uvjetima ubrizgavanjem plina u taljevinu. Da bi se spriječilo dizanje mjehurića plina na površinu, taljevini se dodaju čestice za povećanje viskoznosti, stabilizaciju pjene te poboljšanje svojstava. Rastaljeni aluminij ili aluminijska legura priprema se dodavanjem silicijeva karbida, aluminijske oksida ili magnezijeva oksida, što priprema zahtijeva složeniju tehniku miješanja da bi se osigurala jednolika distribucija čestica te dobivanje kompozita s metalnom matricom (*Metal Matrix Composites* – MMC). Nakon miješanja, u drugom se koraku uvodi plin (zrak, kisik, dušik, argon ili čak voda) specijalno konstruiranim rotirajućim ubrizgavalicama ili vibrirajućim raspršivačima kojima se stvaraju sitni plinski mjehurići jednoliko raspoređeni u taljevini.[1] Zbog keramičkih čestica u pjeni, ona je relativno stabilna. Ona se može vući na površinu uz pomoć konvejskog remena i potom se hladiti te solidificirati. Uobičajena je debljina takvih pjena 10 cm, dok širina i dužina mogu biti proizvoljne.[2]



Slika 1 – Pjenjenje taljevine uz ubrizgavanje plina (produkcija MMC pjena) [2]

Udio čestica za ojačavanje se obično kreće od 10% do 20% s tim da je srednja veličina čestice od 5 μm do 20 μm . Gustoća ovako proizvedenih aluminijskih pjena iznosi od 0,069 g/cm^3 do 0,54 g/cm^3 , promjer pore iznosi od 3 mm do 25 mm a debljina stijenki od 50 μm do 85 μm . [2] Srednja veličina ćelije je u inverznoj vezi sa srednjom debljinom zida ćelije i s gustoćom i može se regulirati protokom plina, brzinom rotacije ubrizgavalice, frekvencijom vibriranja raspršivača te drugim parametrima. [1]



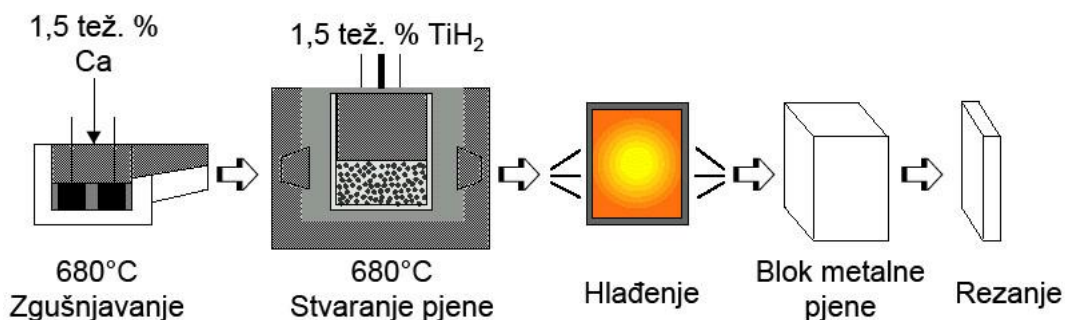
Slika 2 – Presjek aluminijske Alcan pjene [6]

Prednosti procesa izravnog pjenjenja su sposobnost kontinuirane proizvodnje pjene većih dimenzija, postizanje niske gustoće te je postupak proizvodnje jeftiniji od drugih načina proizvodnje ćelijskih metalnih materijala. Njegov je nedostatak rezanje pjene, čime se otvaraju ćelije i još uvijek je ograničen samo na aluminij. Ovako izrađene pjene na tržištu se nazivaju Hydro/Alcan. [2]

3.1.2. Pjenjenje plinom oslobođenim česticama rastvorenim u taljevini

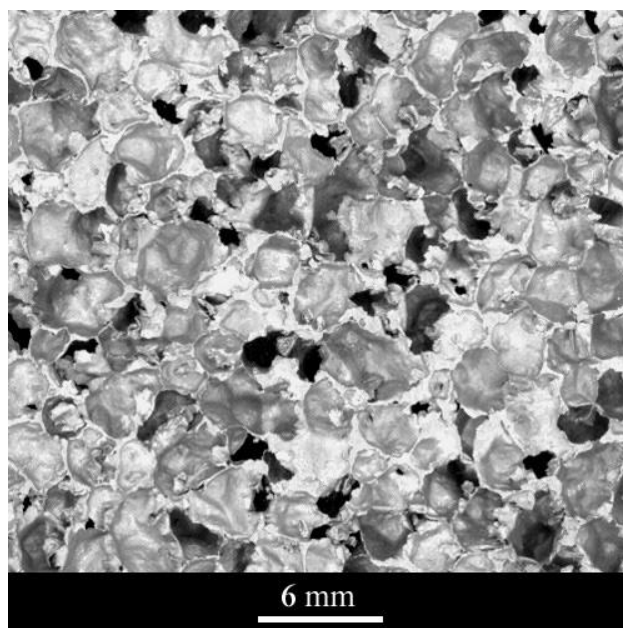
Na drugi izravni način pjene se proizvode dodavanjem agensa koji se pod utjecajem visoke temperature raspada i oslobađa plin koji dovodi do pjenjenja. Rastaljenom aluminiju na 680°C dodaje se oko 1,5% kalcija. Taljevina se miješa nekoliko minuta a zbog

novonastalih spojeva kalcija i aluminija, viskoznost se povećava do čak pet puta. Nakon što se postigne željena viskoznost, dodaje se oko 1,6% raspršujućeg agensa – titan-hidrida (TiH_2), koji se na temperaturi iznad 465°C rastvara na titan i plinoviti vodik (H_2). Vodik stvara mjehuriće i dobiva se pjena sa zatvorenim ćelijama ako je hlađenje dovoljno sporo. Proces pjenjenja traje najmanje 15 minuta.[2]



Slika 3 – Proizvodnja Alporas metalnih pjena [2]

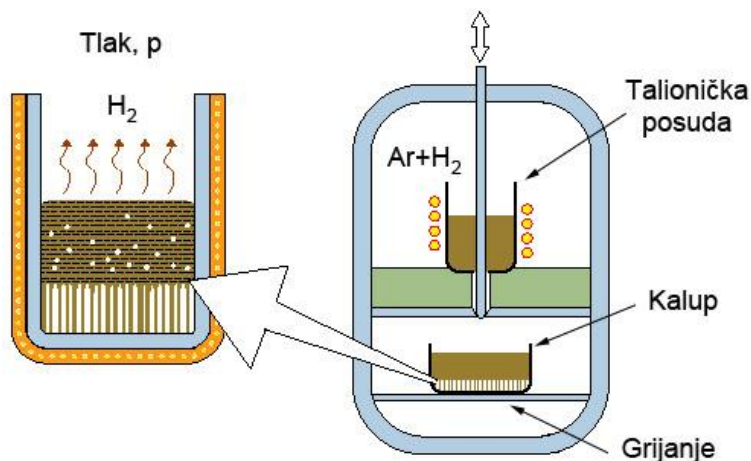
To je najhomogenija aluminijevska pjena koja se trenutno može dobiti. Gustoća je između $0,18 \text{ g/cm}^3$ i $0,24 \text{ g/cm}^3$ sa srednjom veličinom pora koja iznosi od 2 mm do 10 mm. Ovakve pjene proizvode se pod nazivom Alporas.[2]



Slika 4 – Presjek Alporas pjene [6]

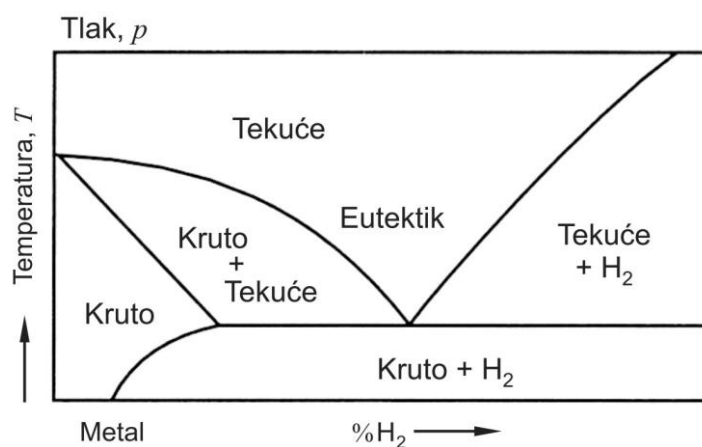
3.1.3. Eutektičko skrućivanje plin-metal

Ovaj postupak proizvodnje se temelji na tome što pojedini metali (Al, Be, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn i Ni) i njihove legure tvore eutektički sustav s vodikovim plinom.[3]



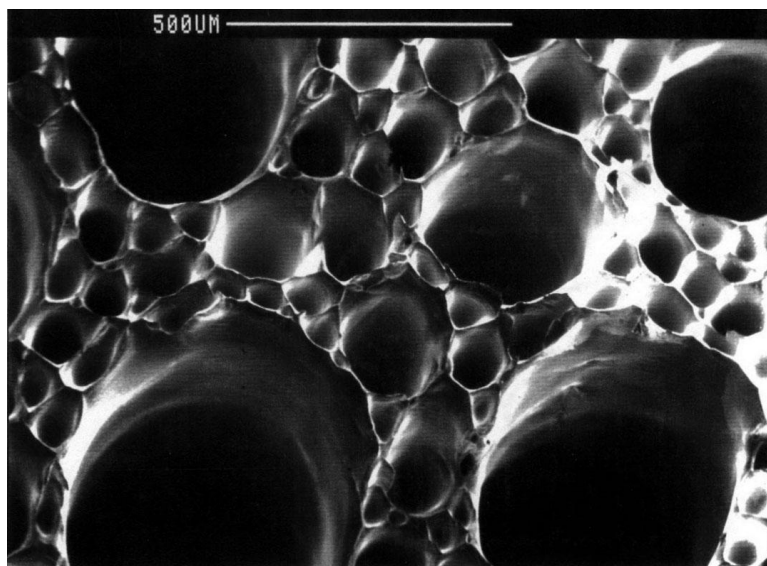
Slika 5 – Postupak proizvodnje Gasar metalnih pjena [3]

Metal se topi u atmosferi vodika pod velikim tlakom (do 50 atm). Rezultat je homogena taljevina ispunjena vodikom a skrućuje se vrlo brzim snižavanjem tlaka. Ako se temperatura snizi, eutektičkom pretvorbom (slika 6) prelazi u heterogeni dvofazni sustav plin + metal. Sastav blizu eutektičke koncentracije na određenoj temperaturi se segregira te mjehurići plina nakon solidifikacije ostaju u metalu.[2]



Slika 6 – Dijagram stanja metal – vodik [3]

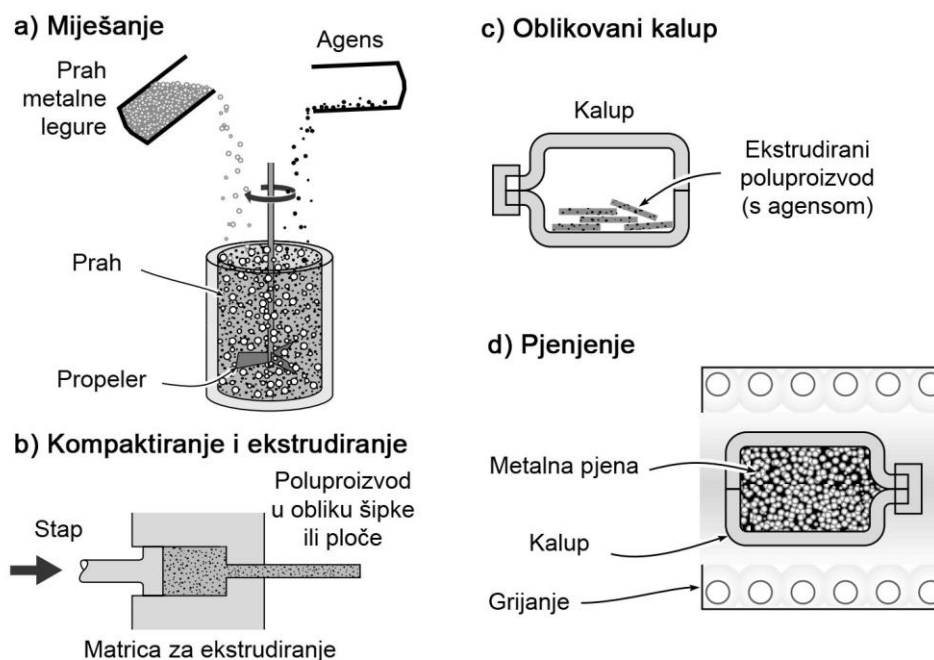
Ovakvim se postupkom dobivaju izdužene pore u smjeru solidifikacije, stožaste ili valovite. Veličina pora se kreće od 10 μm do 10 mm, dužina od 100 μm do 300 mm, a poroznost od 55 do 75%. Raspodjela veličina pora nije jednolika zbog istovremenog rasta velikih i malih pora te sjedinjavanja. Pjene dobivene ovakvim načinom proizvodnje zovu se „gasar“ što je ruski akronim za: plinom ojačan.[2]



Slika 7 – Presjek „gasar“ metalne pjene [8]

3.1.4. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi

Metalna pjena može se dobiti i iz metalnog praha. Ovaj postupak pripada prvoj grupi (postupci dobivanja metalnih pjena u rastaljenoj fazi) jer se upjenjivanje odvija u rastaljenom stanju.



Slika 8 – Postupak proizvodnje Alulight metalnih pjena [4]

Proces proizvodnje započinje miješanjem metalnog praha (osnovnog, legirnog ili mješavine različitih metalnih prahova) s agensom (najčešće TiH_2) koji pospješuje pjenjenje, nakon čega se smjesa kompaktira do željene čvrstoće u obliku šipke ili pločice.[1] Agens se sabija u metalnu matricu tako da se u cijelosti ugradi jer bi poroznost dala lošije rezultate u daljnjoj obradi. Pojedine tehnike sabijanja su: neaksijalna tehnika, izostatičko tlačenje, ekstrudiranje te valjanje praha. Sljedeći je korak zagrijavanje smjese blizu temperature taljenja; temperature solidusa legure. Agens koji je homogeno raspoređen unutar zgusnute metalne matrice se rastvara na Ti i plinoviti H_2 . Zbog tog plina kompaktirani osnovni metal se širi oblikujući visoko porozni materijal. Ove vrste pjena nazivaju se „Foaminal“ i „Alulight“.[2]



Slika 9 – Alulight pjena [9]

Ovakav način proizvodnje upotrebljava se u izradi sendvič konstrukcija. Metalnim pločama oblaže se kompaktirana smjesa te se valjanjem međusobno povezuje. Zatim se zagrijavanjem jezgra širi i postaje metalna pjena dok istodobno metalne ploče ostaju iste gustoće. Takve sendvič konstrukcije imaju visoku krutost, nisku gustoću te dobru smičnu i lomnu čvrstoću.[2]

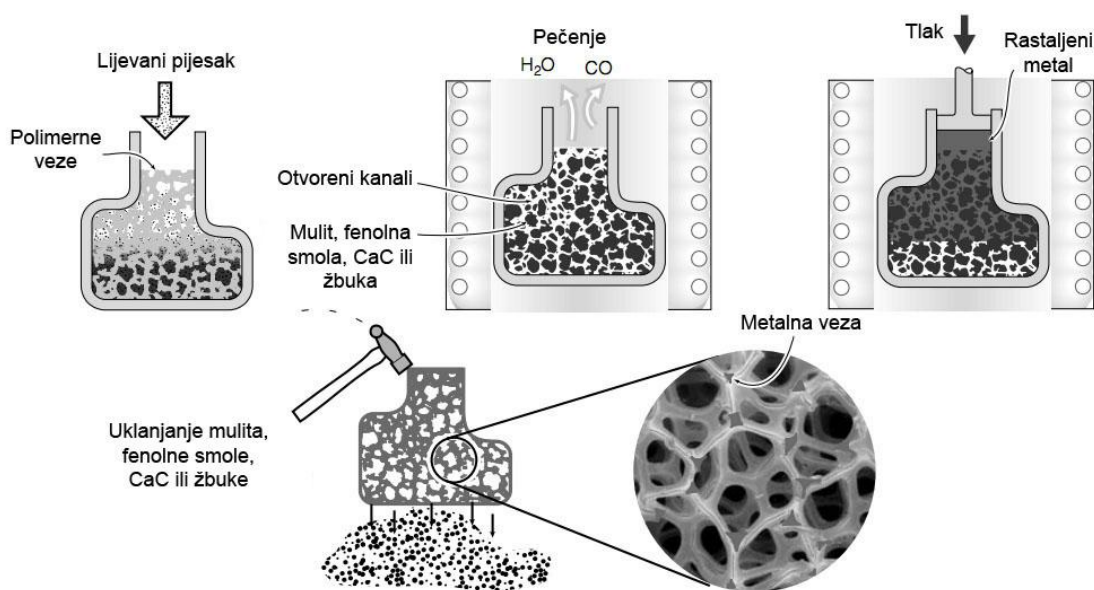


Slika 10 – Proizvodi od Alulight metalnih pjena [7]

3.1.5. Postupci lijevanja

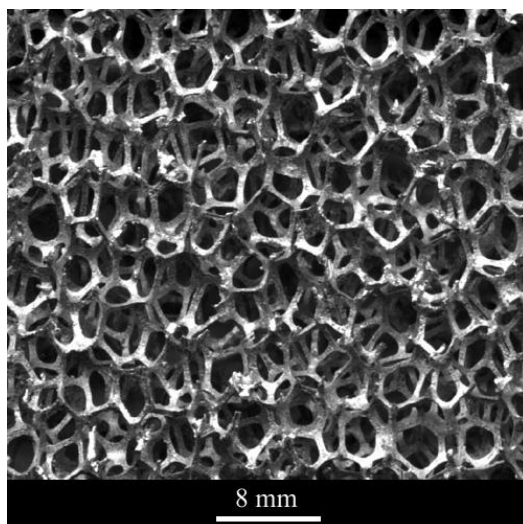
Metalne pjene mogu biti proizvedene od rastaljenog metala bez izravnog upjenjivanja.

Jedan od načina je uzimanje polimerne pjene s otvorenim ćelijama kao osnovom. U nju se ulijeva materijal otporan na visoke temperature kao što je mulit, fenolna smola, kalcijev karbonat ili žbuka. Zatim se polimerna pjena uklanja termičkom obradom, a u kalup ulijeva rastaljeni metal. Da bi se sve šupljine popunile, potreban je tlak i zagrijavanje. Na kraju se materijal kalupa uklanja, a ćelijasta struktura metala jednaka je originalnoj polimernoj pjeni. Poroznost tako dobivenih pjena iznosi od 80% do 97%, a na tržištu se nazivaju „Duocel“. [2]



Slika 11 – Proizvodnja Duocel metalnih pjena [4]

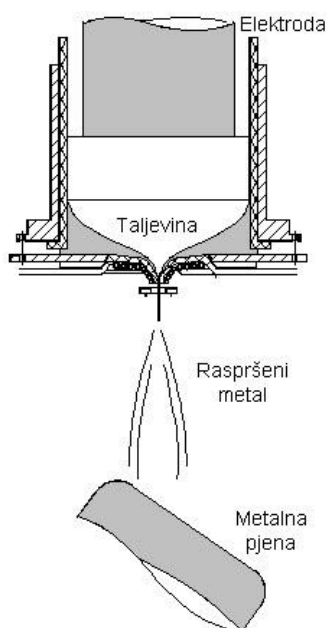
Drugi način dobivanja metalnih pjena lijevanjem je pomoću anorganskih ili organskih granula ili šupljih sfera. Metal se lijeva oko granula ili se one dodaju rastaljenom metalu. Nakon toga se granule uklanjaju ispiranjem otopinom, kiselinom ili termičkom obradom. Poroznost ovako dobivenih pjena je ograničena na ispod 80%, a gustoća iznosi $1,1 \text{ g/cm}^3$. [2]



Slika 12 – Izgled Duocel metalne pjene [6]

3.1.6. Oblikovanje raspršivanjem

Metoda oblikovanja pjena raspršivanjem omogućuje uporabu različitih metala i legura. Rastaljeni se metal neprestano atomizira stvarajući male kapljice velike brzine. Kapljice se skupljaju na podlozi i solidificiraju stvarajući čvrsti sloj metalne pjene.



Slika 13 – Proces proizvodnje raspršivanjem („Osprey process“) [10]

Tako dobivene pjene imaju nizak udio oksida, malu veličinu zrna ili visoki udio metastabilnih faza legure. Pjene dobivene raspršivanjem su porozne do 60%, ali oblik i građa pora nisu ujednačeni.[2]

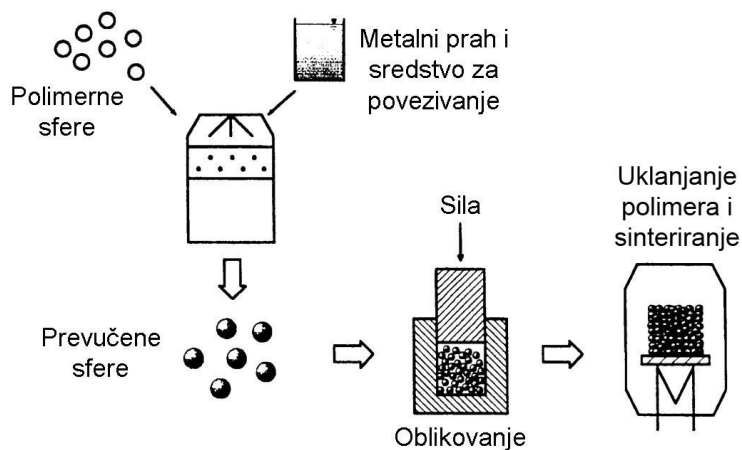
3.2. Dobivanje metalnih pjena u čvrstoj fazi

Osim rastaljenog metala i metalni se prah može upotrijebiti u proizvodnji metalnih pjena. Prah se ne tali već ostaje u krutom stanju tijekom cijelog procesa proizvodnje. U uporabi rastaljenog metala javlja se problem površinske napetosti taljevine pri stvaranju ćelija zatvorene strukture, a pjene dobivene sinteriranjem praha stvaraju otvorenu strukturu s izoliranim, sfernim, međusobno povezanim česticama.[2]

3.2.1. Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama

Metalne pjene visoke poroznosti čine šuplje sfere bakra, nikla, čelika ili titana. Dobivaju se na četiri načina:

- kemijskim i električnim taloženjem odabranog metala na polimerne sfere koje se kasnije uklanjaju;
- prevlačenjem polimernih sfera metalnim prahom te naknadnim sinteriranjem metala i uklanjanjem polimera;
- raspršivanjem sitnih sfera koaksijalnim brizgalicama iz emulzije metalnog praha, metalnog oksida u prahu ili metalnog hidridnog praha, njihovim sušenjem te sinteriranjem
- atomizacijom rastaljenog metala uz podešavanje uvjeta da bi nastale šuplje sfere.



Slika 14 – Postupak proizvodnje metalnih pjena s kuglastim šupljinama [2]

Šuplje se sfere na kraju sinteriranjem međusobno spajaju. Na taj se način proizvode pjene zatvorenih i otvorenih ćelija. Uobičajena veličina sfera iznosi od 0,8 mm do 8 mm, debljina stijenke od 10 μm do 100 μm .

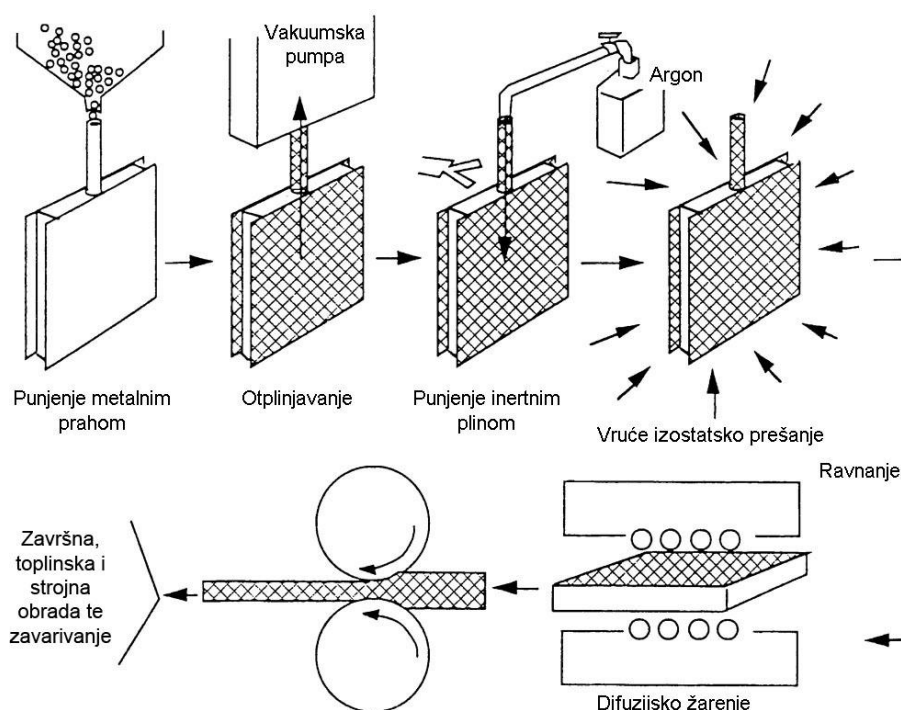


Slika 15 – Primjeri uporabe metalnih pjena s kuglastim šupljinama [7]

Velika je prednost ovakvih materijala da su raspored i veličina sfera (ćelija) točno određeni i nisu nasumični kao u slučaju kod „pravih“ metalnih pjena. Stoga su ovakvi materijali jako dobrih mehaničkih svojstava. Također, zbog načina proizvodnje veliki je raspon materijala koji se upotrebljavaju poput titana i superlegura te se dobiva proizvod postojan na visokim temperaturama.[2]

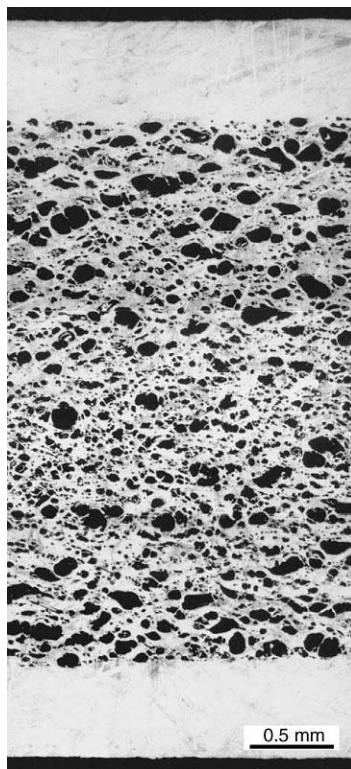
3.2.2. Ekspanzija plina u čvrstom stanju

Metalne se pjene mogu proizvesti na način sličan postupku plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi, ali bez taljenja ili dodavanja agensa. Prah prvo kompaktiramo do željene čvrstoće pri čemu je plin zarobljen unutar kompaktiranog materijala. Zagrijavanjem te smjese ekspandira metal zbog povećanja tlaka zarobljenog plina. Ekspanzija se događa u čvrstoj fazi te zbog toga to nije pravo „pjenjenje“ već proces puzanja u čvrstom stanju. Metodu je upotrebljavao američki proizvođač Boeing za proizvodnju poroznih titanskih elemenata. Slika 16 prikazuje proces proizvodnje.[2]



Slika 16 – Postupak proizvodnje metalnih pjena ekspanzijom plina u čvrstom stanju [2]

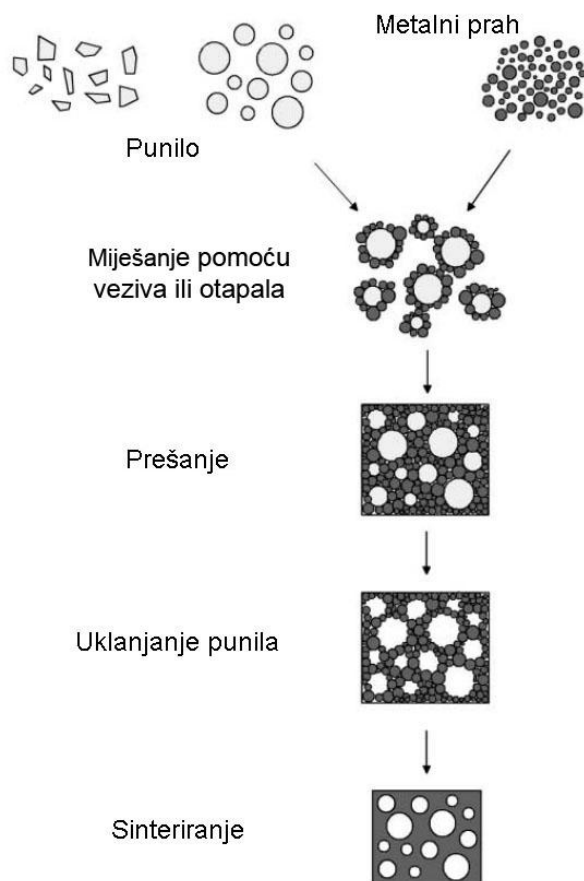
U spremnik se prvo stavi titanski prah, provede otplinjavanje pa napuni argonom pri tlaku od 3 do 5 atm. Spremnik se zatim zabrtvi i zapečati te vruće izostatski preša. Argon formira jednoliko raspršene pore koje pod velikim tlakom čine manje od 2% ukupnog volumena. Tek nakon žarenja formira se pjena čija poroznost ne prelazi 50%. Uobičajena veličina pora iznosi od 10 μm do 100 μm . [2]



Slika 17 – Sendvič konstrukcija s metalnom pjenom proizvedena ekspanzijom plina u čvrstom stanju [2]

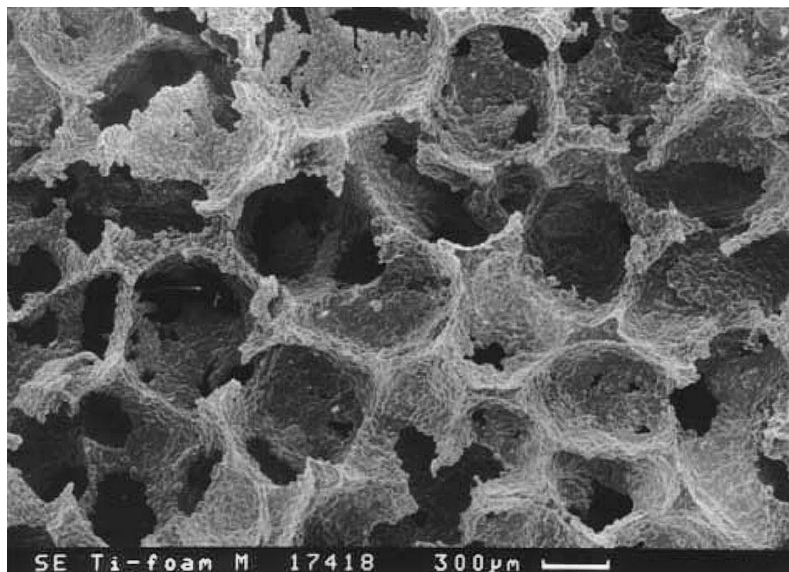
3.2.3. Prešanje metalnog praha i punila

Slično metodi lijevanja, porozni spužvasti materijali mogu se proizvesti upotrebom punila i metala. Razlika je u tome što se punilo dodaje metalni prah, a ne rastaljeni metal. Punilo u ovom slučaju upotrebljavamo kao jednu vrstu prostornog držača. [2]



Slika 18 – Postupak proizvodnje metalnih pjena prešanjem metalnog praha i punila [2]

Metalni se prah može miješati izravno s hrpom punila ili uz pomoć odgovarajućih otapala te čak organskih veziva. Kao punila mogu se upotrebljavati čestice keramike, keramičke šuplje sfere, polimerne granule, polimerne šuplje sfere, soli ili čak drugi metal. Mješavina se zatim kompaktira na sobnoj temperaturi ili se preša pri povišenoj temperaturi (ako je punilo otporno na toplinu) da bi se poboljšalo kompaktiranje te u tom slučaju često počne i proces sinteriranja između čestica metalnog praha. U oba se slučaja dobiva kompozit koji se sastoji od metalne matrice s ugrađenim česticama punila.[2]



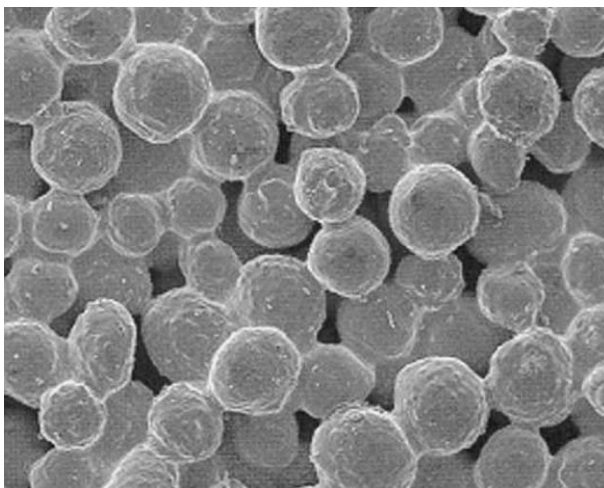
Slika 19 – Metalna pjena od titana s magnezijским granulama kao punilom [2]

Ako je udio metala relativno nizak, toplinskom obradom, razvodnjеним otapalom ili ispiranjem moguće je gotovo potpuno uklanjanje punila. Postupak sinteriranja naknadno se primjenjuje da bi se dodatno poboljšala svojstva materijala.[2]

3.2.4. Sinteriranje praha ili vlakana

Za proizvodnju metalnih pjena sinteriranjem upotrebljavamo razne metale, uključujući titan i superlegure iako su bronca i nehrđajući čelik najčešći. Postupak proizvodnje sastoji se uglavnom od sljedećih koraka:

- usitnjavanje praha i njegova priprema,
- kompaktiranje i oblikovanje,
- sinteriranje.[2]



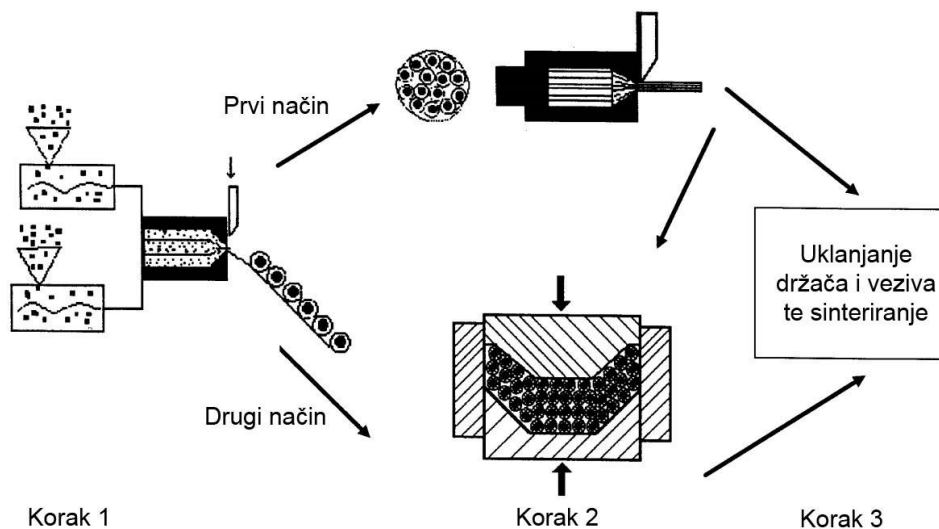
Slika 20 – Sinterirana bronca s česticama promjera 100 μm [2]

Temperatura sinteriranja je oko 820°C . Poroznost je između 20% i 50%, a čvrstoća je razmjerno niska. Proizvodnja aluminijskih pjena ovom metodom puno je teža nego proizvodnja pjena od drugih metala zbog oksidnog sloja koji prekriva površinu aluminija te onemogućuje postupak sinteriranja. Stoga se metalni prah pri postupku kompaktiranja i oblikovanja deformira da bi se razbio oksidni sloj ili se dodaje bakreni, silicijski ili magnezijски prah prije zagrijavanja da bi se prilikom sinteriranja (625°C) stvorila eutektička legura.[2]

Zamjena metalnog praha metalnim vlaknima otvara nove mogućnosti izrade ćelijastih materijala. Mnoge vrste metala mogu se oblikovati u vlakna koja se zatim sinteriraju. Na tržištu su već dostupni takvi komercijalni proizvodi.[2]

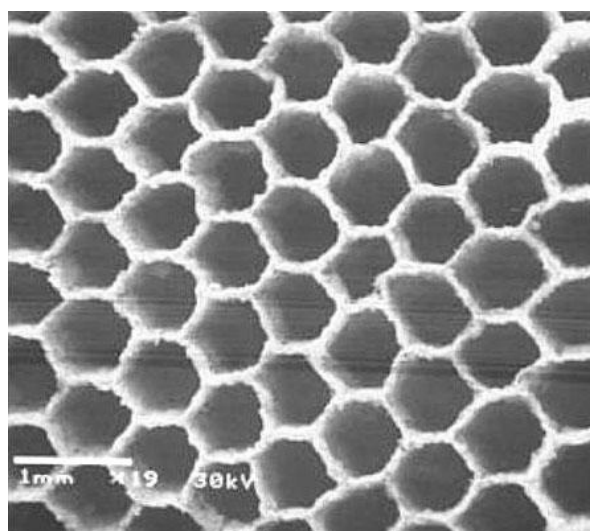
3.2.5. Metalni prah s vezivom

Ćelijasti materijali i konstrukcijski dijelovi mogu se dobiti iz mješavine metala i polimernog veziva koja se preša ili ekstrudira te zatim termički obrađuje. Iako se ne upotrebljavaju punila, moguće je postići poroznost do 50%. Na sličan se način mogu proizvesti materijali s usmjerenim šupljinama, mikrosaacaste strukture, promjera od nekoliko mikrona do nekoliko milimetara. Potrebni koraci proizvodnog procesa objašnjeni su na slici 21.[2]



Slika 21 – Postupak proizvodnje metalnih pjena od metalnog praha s vezivom [2]

Prvo se pripreme bimaterijalne šipke koje imaju jezgru smjese polimernog veziva s držačem što izgara pri zagrijavanju te plašt od mješavine metalnog praha i veziva. U sljedećem koraku prešaju se svežnjevi takvih šipki u predproizvod. To se može obaviti ekstrudiranjem čime se dobiva proizvoljan presjek ili aksijalnim prešanjem čime se dobivaju razni kompleksni oblici. U trećem koraku vezivo i držač izgaraju te se metalni prah sinterira. Na slici 22 je primjer takve mikrosačaste strukture.[2]



Slika 22 – Izgled mikrosaća [5]

3.2.6. Reakcijsko sinteriranje

Reakcijskim sinteriranjem mješavine metalnog praha također se dobivaju ćelijasti materijali. Najčešće se upotrebljavaju mješavine:

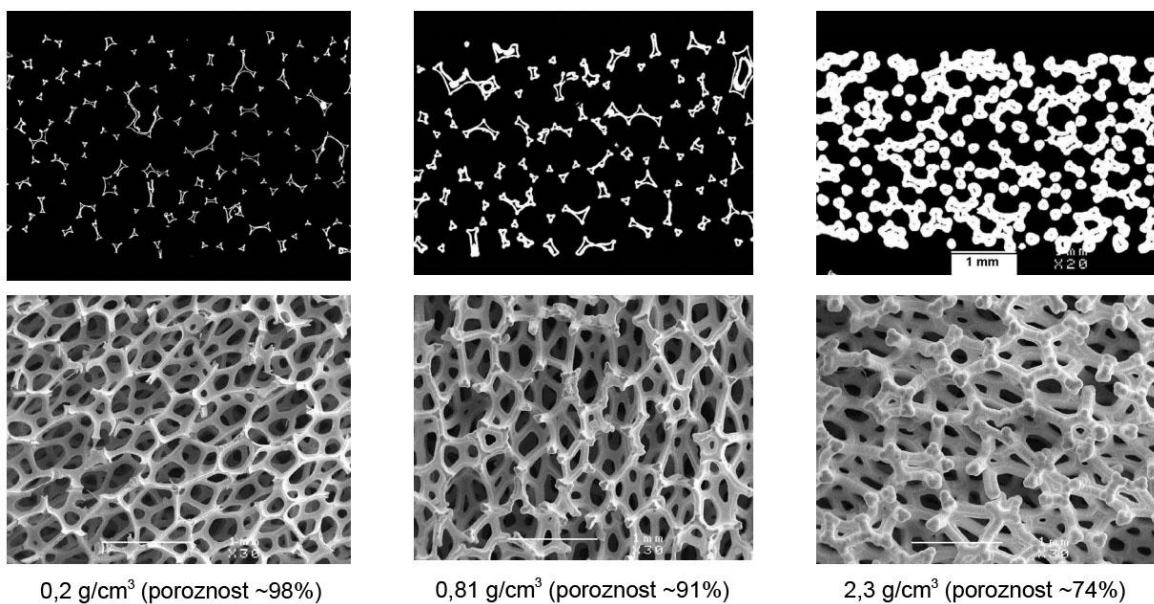
- titan i aluminij,
- željezo i aluminij,
- titan i silicij.

To se događa zbog međusobno različitih difuzijskih koeficijenata metala mješavine.[2]

3.3. Parna faza metala

3.3.1. Taloženje metala iz parne faze

Metalne se pjene proizvode i iz parne metalne faze ili plinovitih metalnih spojeva. U ovom procesu također upotrebljavamo isprepletenu polimernu pjenu kao model koji određuje oblik i geometriju metalne pjene što se proizvodi. U vakuumskoj komori se metal u parnoj fazi taloži na hladni polimerni model. Kondenzirani metal prevlači površinu modela i tvori film određene debljine. Debljina filma određuje se gustoćom pare i trajanjem procesa.[2]



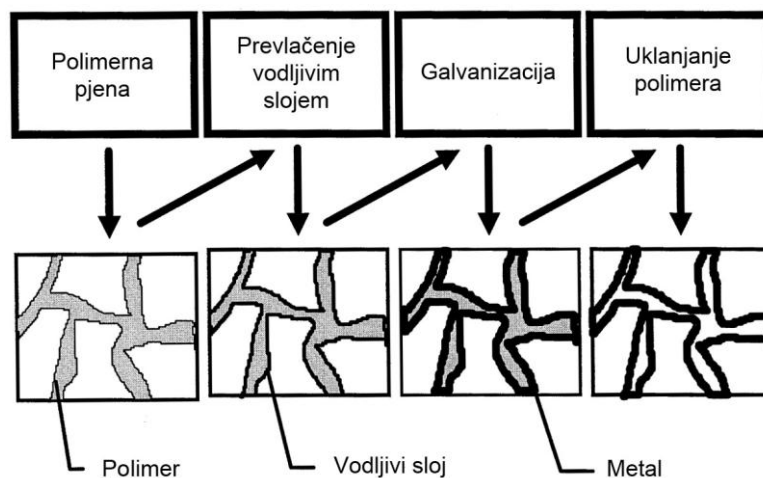
Slika 23 – Površina i presjek „Incofoam“ pjene od nikla s trima različitim stupnjevima poroznosti [11]

Pri prevlačenju niklom upotrebljava se i plinoviti metalni spoj – nikal-karbonil. Njime se polimerni model može prevlačiti i pri niskim temperaturama (120°C). Polimernu pjenu se drži na toj temperaturi i infracrvenom grijalicom. Nakon završetka procesa i hlađenja, polimer se može ukloniti toplinskom ili kemijskom obradom. Tako proizvedene pjene od nikla na tržištu se nazivaju „Infocoam“, njihova gustoća varira od 0,2 g/cm³ do 2,3 g/cm³, čistoća im je vrlo visoka (99,97% Ni) i vlačna čvrstoća im iznosi 0,6 Mpa za srednju gustoću.[2]

3.4. Metalni ioni

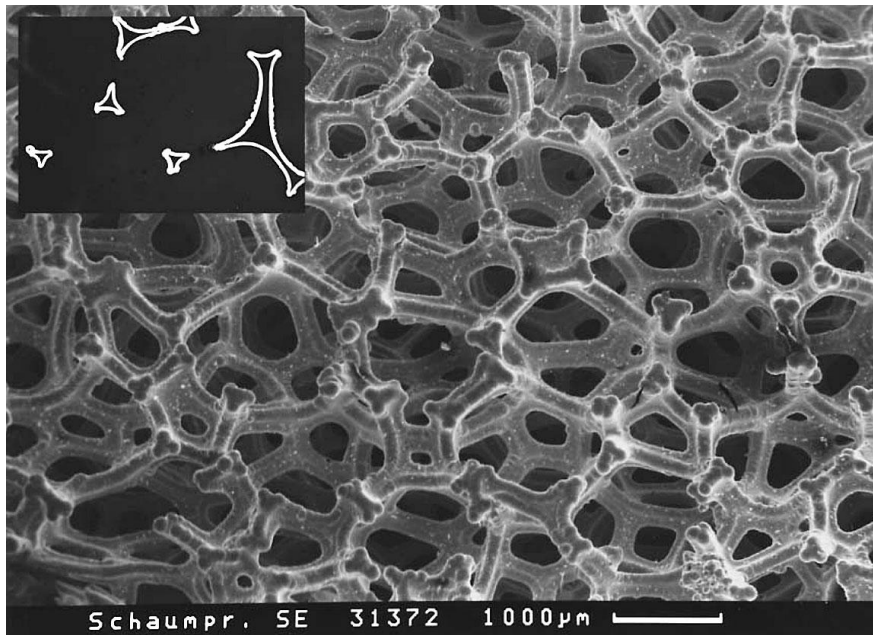
3.4.1. Elektrotaloženje iz tekuće faze

U ovoj metodi proizvodnje metalnih pjena upotrebljavaju se ioni metala, npr. otopine iona u elektrolitu. Metal se uz pomoć električne struje taloži na polimernu pjenu s otvorenim ćelijama koja se kasnije uklanja.[2]



Slika 24 – Postupak elektrotaloženja metala [2]

Polimerna pjena na početku procesa mora biti bar malo električno vodljiva što se ostvaruje uranjanjem polimerne pjene u otopinu koja sadrži grafit ili prevlačenjem pjene tankim vodljivim slojem. Metal se na polimernu pjenu nanosi galvanizacijom te se nakon završenog procesa polimer može ukloniti toplinskom obradom. Na slici 25 vidi se trodimenzionalna raspodjela stijenki, a gore lijevo dodatno su prikazane ćelije otvorenog tipa.[2]



Slika 25 – Metalna pjena dobivena elektrotaloženjem iz tekuće faze [2]

Veličina ćelija dobivenih ovom metodom je od 0,5 mm do 3,2 mm dok je njihova gustoća od $0,4 \text{ g/cm}^3$ do $0,65 \text{ g/cm}^3$. [2]

4. Metode karakterizacije ćelijastih materijala

Ćelijasti metali i legure karakteriziraju se na mnogo načina. Cilj je dobiti podatke o mehaničkim svojstvima i karakteristikama ćelijastog materijala ili provesti tehnološko ispitivanje, tj. karakterizaciju gotovog dijela koji je sastavljen od ćelijastog materijala. Postoje dva načina promatranja ćelijastog materijala:

- s atomskog odnosno molekularnog stajališta ćelijasti materijal je „konstrukcija“ sastavljena od spona, membrana i drugih elemenata koji sami po sebi imaju mehanička svojstva,
- s makroskopskog stajališta ćelijasti materijal je vrsta tehničkog materijala (homogeni medij) kojem se dodjeljuju izmjerena (prosječna) svojstva te ga tako onda i ispituje.[2]

U ovom će se poglavlju ukratko opisati metode karakterizacije ćelijastih metala (metalnih pjena). Općenito, razlikuju se nerazorni i razorni načini ispitivanja ovisno o tome je li metalna pjena nepovratno deformirana (promijenjena) ili je ostala nepromijenjena, tj. utjecaj ispitivanja je minimalan ili zanemariv.[2]

4.1. Nerazorna ispitivanja

Široki je raspon metoda za nerazorna ispitivanja, ali u ovom će poglavlju biti opisana samo ona koja su primjenjiva na metalnim pjenama.[2]

4.1.1. Mjerenje gustoće

Ukupna gustoća poroznog materijala može biti izmjerena vaganjem te nakon toga mjerenjem njegova volumena Arhimedovim zakonom. Ako uzorak koji se želi okarakterizirati nema zatvorenu vanjsku površinu (opnu), penetracija tekućine može se spriječiti prevlačenjem njegove vanjske površine polimernim filmom.[2]

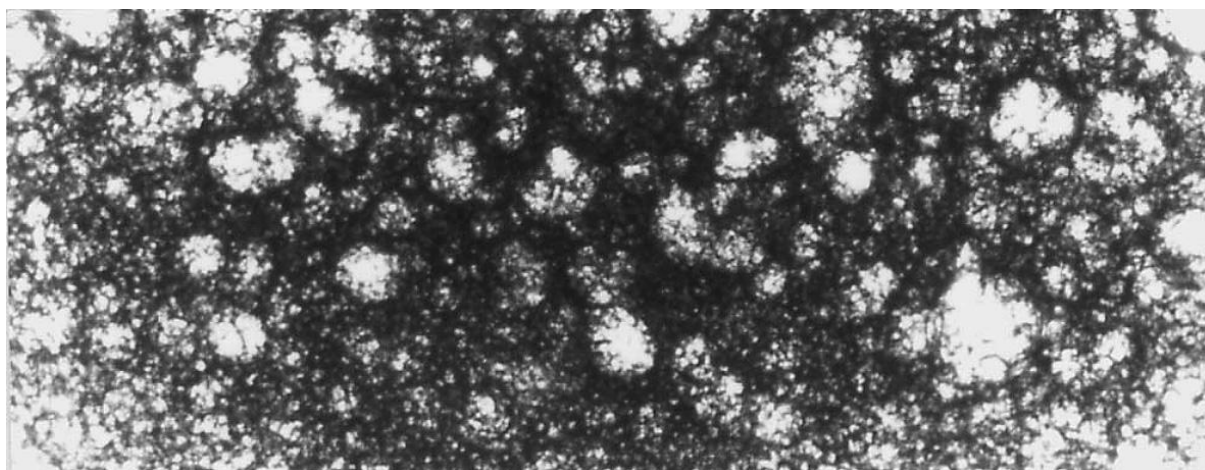
4.1.2. Ispitivanje upotrebom obojanog penetranta

Proizvodnjom metalnih pjena zatvorenih ćelija i onih sa zatvorenim vanjskim površinama praktično se ne mogu izbjeći nesavršenosti i rupe na površini. Ispitivanje obojanim penetrantima idealno je za pronalaženje takvih nesavršenosti i rupa. Nakon čišćenja

površine, nanosi se sloj obojenog penetranta, uklanja se višak te nanosi razvijlač. Nakon nekoliko minuta, vizualnom metodom mogu se jednostavno uočiti greške.[2]

4.1.3. Radiografija X-zrakama i radioskopija

Ispitivanje se izvodi tako da puštanjem snopa X-zraka kroz uzorak i mjeri se prigušenje u dva smjera te se tako dobiva dvodimenzionalna slika uzorka. Ako se ispituju uzorci koji sadrže više pojedinih redova pora (deblji uzorci), ne može ih se točno razlikovati. No, ispitivanjem tankih uzoraka koji prosječno sadrže samo jedan red pora može se točno vidjeti morfologija presjeka.[2]

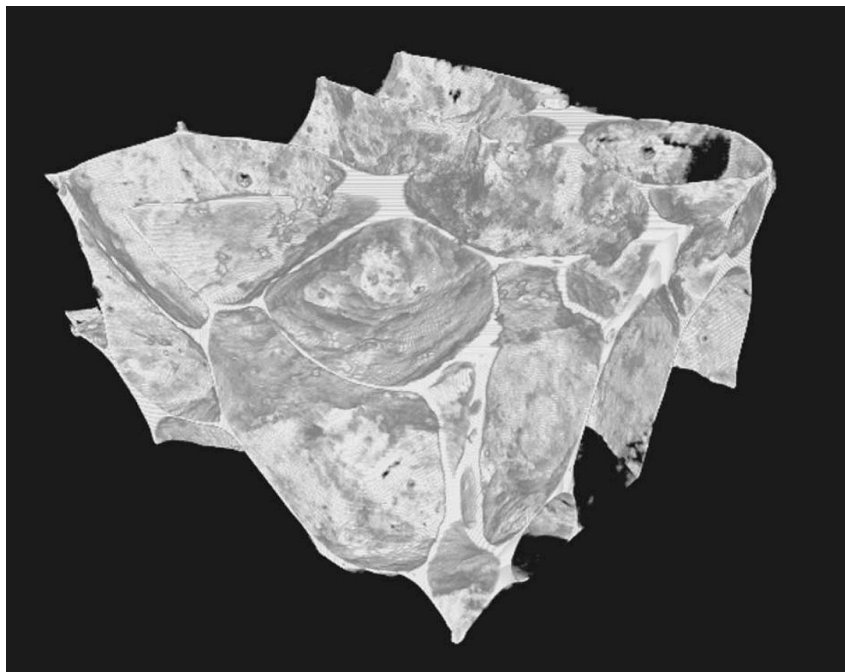


Slika 26 – Izgled olovne pjene ispitivane X-zrakama, debljine 6 mm, dimenzija 60 x 20 mm
[2]

4.1.4. Računalna tomografija (X-zrakama)

Trodimenzijski prikaz gustoće dobiva se računalnom tomografijom X-zrakama, Computed X-ray Tomography (CT). Uređaj bilježi slike dobivene prolaskom X-zraka iz puno različitih smjerova, obično rotiranjem i translacijom izvora i senzora (detektora) oko uzorka. Uređaj matematičkim operacijama obrađuje podatke o prigušenju s mnogo snimljenih „slika“ da bi mogao izraditi simulaciju gustoće u 3D prikazu. Tomografija nuklearnom magnetnom

rezonancijom koja je neprocjenjiva u skeniranju ljudskog tijela, nažalost, nije primjenjiva na metalnim pjenama jer je penetracija RF polja vrlo mala.[2]



Slika 27 – Trodimenzionalni prikaz cinkove pjene dobiven računalom tomografijom [2]

4.1.5. Ispitivanje vrtložnim strujama

Metalne pjene karakteriziraju se također njihovim relativnim gustoćama i veličinama pora provodeći multifrekvencijsko mjerenje električne impedancije. Kao izvor upotrebljava se zavojnica koja pobuđuje alternirajuće magnetsko polje. Indukcijom se pobuđuju vrtložne struje u uzorku te odgovarajuće magnetno polje koje se mjeri drugom zavojnicom. Vrtložne struje ne ovise samo o geometrijskim čimbenicima i frekvenciji već i o svojstvima metalne pjene. Dokazano je da porozitet znatno utječe na izlazni signal mjerenja tako da se ovom metodom može mjeriti lokalna gustoća i drugi parametri pora u uzorku nakon kalibracije mjernih uređaja.[2]

4.1.6. Mjerenje akustičnih svojstava

Svojstvo apsorpcije zvuka poroznih medija obično se mjeri u „impedancijskim cijevima“ koje omogućuju brza i precizna mjerenja. No, da bi ispitali prigušenje vertikalnih komponenti zvučnih valova moraju se provesti dodatna ispitivanja novih materijala prije upotrebe, tj. primjene. Impedancijska cijev sastoji se od uzorka u obliku diska na jednom kraju koji se može pomicati od stražnje stijenke i prema njoj te od izvora zvučnih valova na suprotnom kraju. Obično se prigušenje mjeri kao funkcija frekvencije. Ako se varira udaljenost uzorka od zadnje stijenke, dobiva se serija funkcija koje opisuju apsorpcijski koeficijent u odnosu na frekvenciju. U slučaju da uzorak ima povezane pore, krivulja apsorpcije pomiče se prema nižim frekvencijama ovisno o tome koliko se veličina pora povećava. Apsorpcijska krivulja uzoraka sa zatvorenim porama neovisna je o veličini pora jer zvuk ne može penetrirati u uzorak te se apsorpcija u cijelosti događa na njegovoj površini. Važno je provesti ispitivanje na više uzoraka, posebno za impedancijske cijevi manjeg promjera. Također je preporučljivo izvesti dva mjerenja na svakom uzorku koji ima zatvorenu vanjsku površinu, za svaku stranu diska.[2]

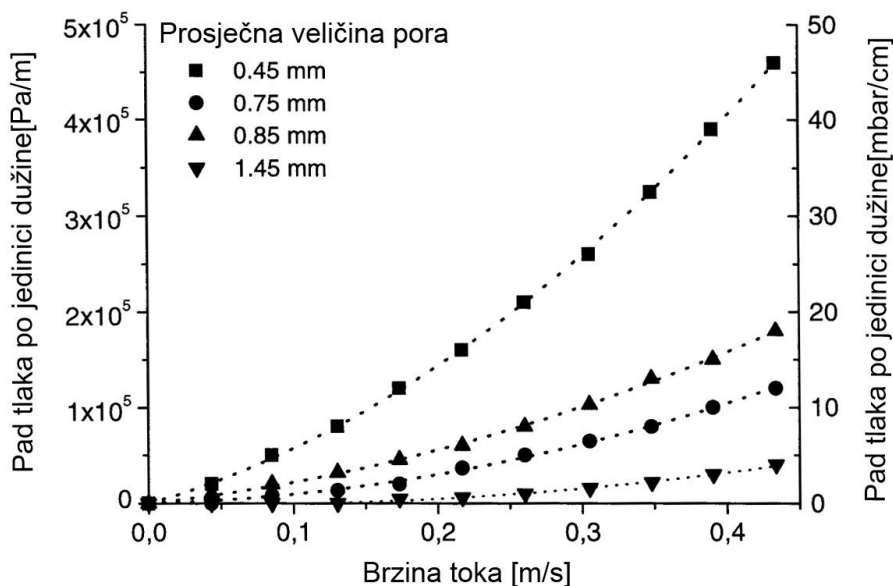
4.1.7. Analiza vibracijskih svojstava

Analizom vibracijskih svojstava određuje se Youngov modul i faktor gubitaka. U najjednostavnijoj tehnici ispitivanja dugačka cijev (okruglog ili kvadratnog presjeka) ili kvadratna ploča izloži se izvoru vibracija. Izazivaju se longitudinalne, transverzalne ili torzijske pobude. Prihvat uzorka izvodi se stezaljkama na jednom ili oba kraja ili ga se objesi na tankim žicama. Pobuđuje se magnetnim poljem, a vibracije se prate promjenama na drugoj zavojnici ili se uzorak izravno spoji na elektromagnetski vibrator. Mjerenje svojstava ćelijastih materijala ovom metodom nije jednostavno jer je materijal nehomogen s nepoznatom distribucijom mase po duljini i presjeku.[2]

4.1.8. Porozimetrija i analiza protoka fluida

Kad se radi s poroznim (otvorenim) materijalima, određuju se parametri vezani uz unutarnje strukture: veličina pora, raspored pora i raspored kanala. Postoji nekoliko metoda koje su trenutno u upotrebi:

- Porozimetrija živom – ovo se ispitivanje temelji na prolasku žive kroz pore pod određenim tlakom. Količina utisnute tekućine i podaci o tlaku u vezi su s veličinom ćelija u materijalu. No, ovom metodom teško otkrivamo pore veće od nekoliko stotina mikrona.
- Ispitivanje apsorpcijom plina (BET) – ovo ispitivanje daje prilično dobar uvid u ukupnu unutarnju površinu pora ćelijastih materijala. Mogu se otkriti i najmanje pore na atomskoj razini.
- Analiza protoka fluida – kao što ime kaže, u ovoj se metodi promatra prolazak plina ili tekućine kroz porozni medij. Mjeri se pad tlaka u stupcu metalne pjene kao funkcija prosječne brzine fluida. Ako je poznata viskoznost fluida može se procijeniti prigušivanje i koeficijent trenja za specifično područje pod pretpostavkom da trenje ovisi o površini, tj. volumenu pora u materijalu. Rezultati dobiveni ovom vrstom ispitivanja su manji od onih dobiveni BET metodom jer je samo dio unutarnje površine u kontaktu s fluidom.
- Točka stvaranja mjehurića – ovom tehnikom ispitivanja, volumen pora ispuni se fluidom te se nakon toga izvana počne povećavati tlak. Pri određenoj vrijednosti tlaka prevladava se kapilarnost fluida, stvaraju se mjehurići te pada prigušenje. Ako se dalje povećava tlak, postupno se prazne sve manje pore dok se potpuno ne „osuši“ uzorak. Uspoređujući protok (kao funkciju tlaka) s krivuljom „suhog“ uzorka dobiva se podatak o veličini kanala unutar metalnih pjena.[2]



Slika 28 – Pad tlaka fluida pri ispitivanju metalnih pjena s različitim veličinama pora [2]

4.1.9. Ispitivanje električne i toplinske vodljivosti

Ispitivanje električne vodljivosti nije potrebno posebno opisivati jer je uobičajeno i jednostavno. Kontakt se ostvaruje bakrenim kontaktnim pločama. Ispitivanje toplinske vodljivosti također je standardno i izvodi se na uzorcima dimenzija presjeka 20x20 mm.[2]

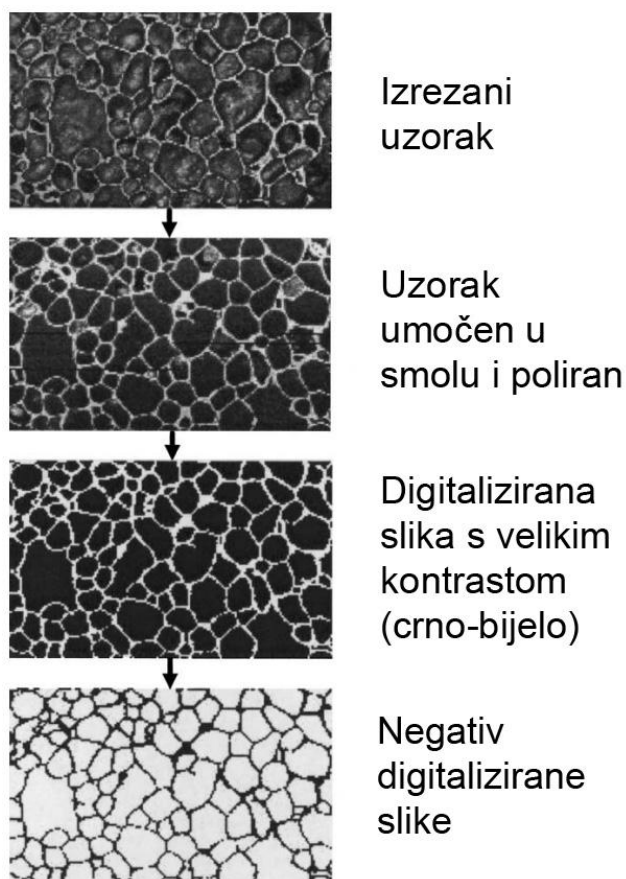
4.1.10. Ostale metode

Postoje još neke nerazorne metode ispitivanja (spektroskopija, ultrazvuk...) koje bi se mogle primijeniti na metalne pjene, ali ih do sada nitko nije upotrebljavao za njihovu karakterizaciju.[2]

4.2. Razorna ispitivanja

4.2.1. Analiza vizualnom metodom

Morfologiju i mikrostrukturu ćelijastih materijala može se analizirati vizualno pri različitim povećanjima. Iako je sama analiza nerazorna, priprema uzorka obično zahtijeva izrezivanje, lijevanje i poliranje, a to su razorni postupci. Upotrebom računalnih programa za obradu slika dolazi se do podataka o udjelu pora po fotografiranom presjeku. No, ti podaci ne mogu uzeti kao referentne vrijednosti jer uvelike ovise o pravilnom izrezivanju i pripremi uzoraka. Membrane ćelija i njihova unutrašnjost moraju biti različitog intenziteta zatamnjenja. Jedno od rješenja tog problema je umakanje uzorka u crnu smolu te nakon toga brušenje presjeka koji će se kasnije fotografirati. Unutar samog programa potrebno je ručno podesiti neke parametre da bi se dobili što bolji rezultati. Također, mora se uzeti u obzir to da se promatra samo jedan presjek, a ćelije su nasumično raspoređene u tri dimenzije unutar materijala, što znači da se rezultati moraju oprezno interpretirati.[2]



Slika 29 – Priprema uzorka i obrada slike za vizualnu metodu ispitivanja [2]

4.2.2. Mehanička ispitivanja

Mehanička ispitivanja su najčešći oblik karakterizacije materijala. Podaci dobiveni mehaničkim ispitivanjima važni su za dobru procjenu prilikom primjene materijala u proizvodnji, ili još bitnije za računalno modeliranje i simulacije proizvoda izrađenih od metalnih pjena. Metode su jednake kao i kod „običnih“ neporoznih materijala, ali ponekad zahtijevaju određene preinake zbog drugačijih svojstava metalnih pjena. To se uglavnom odnosi na statistiku. Zbog neujednačene mase, heterogene strukture i sličnih parametara dolazi do velikog raspršivanja rezultata. Stoga se mora ispitati velik broj uzoraka da bi rezultate mogli uspoređivati s onima za konvencionalne materijale. S obzirom na to da makroskopske pore ponekad mogu biti velike i nekoliko milimetara ponekad se moraju uzeti nestandardni uzorci većih dimenzija. Vrste ispitivanja dijele se prema:

- Tipu naprezanja – jednoosno, dvoosno, složeno stanje naprezanja i hidrostatsko. Donedavno je tip jednoosnog naprezanja bio standard u eksperimentalnim radovima, a u posljednje vrijeme nailazi se i na složena stanja naprezanja poput dvoosnog međusobno okomitog ili jednoosnog u kombinaciji s hidrostatskim.
- Tipu opterećenja – tlačno, vlačno, smično, na savijanje ili torziju. Tlačna su ispitivanja najčešća jer se upotrebljavaju kvadratni oblici uzoraka te nema potrebe za stezanjem. Uzorci mogu biti i u obliku „kosti za pse“. Ispitivanja smičnih i savojnih opterećenja su komplicirana te se mora jako paziti na uklještenja i valjke koji prenose silu zbog pojave lokalnih deformacija (uvlačenja). Stoga se preporučuje poseban oprez s pjenama koje imaju zatvorenu vanjsku površinu.
- Promjeni opterećenja u jedinici vremena – konstantno, polako rastuće, dinamičko i cikličko.[2]

U pojedinim slučajevima mehaničke deformacije unutar metalnih pjena dodatno se prate snimanjem zvuka emitiranog pucanjem mostova između ćelija. Postoje još i posebna ispitivanja za sendvič konstrukcije s ćelijastim materijalima koja ispituju vezivo, tj. kvalitetu veziva između različitih materijala.[2]

4.2.3. Ispitivanje korozijske postojanosti

Do trenutka pisanja ovog rada nema standardiziranog postupka ispitivanja korozijske postojanosti za ćelijaste metalne materijale. Jednostavno se primjenjuju industrijski postupci npr. ispitivanje za korozijsku postojanost automobilskih dijelova. U jednom primjeru iz prakse sendvič paneli od aluminijske pjene bili su ispitivani 7 dana u 10 ciklusa, i to 24 sata su bili izloženi štrcanju slanom vodom, 4x24 sata promjenjivoj vlažnosti, i 48 sati sobnoj temperaturi i normalnoj vlažnosti (23°C, 50%).[2]

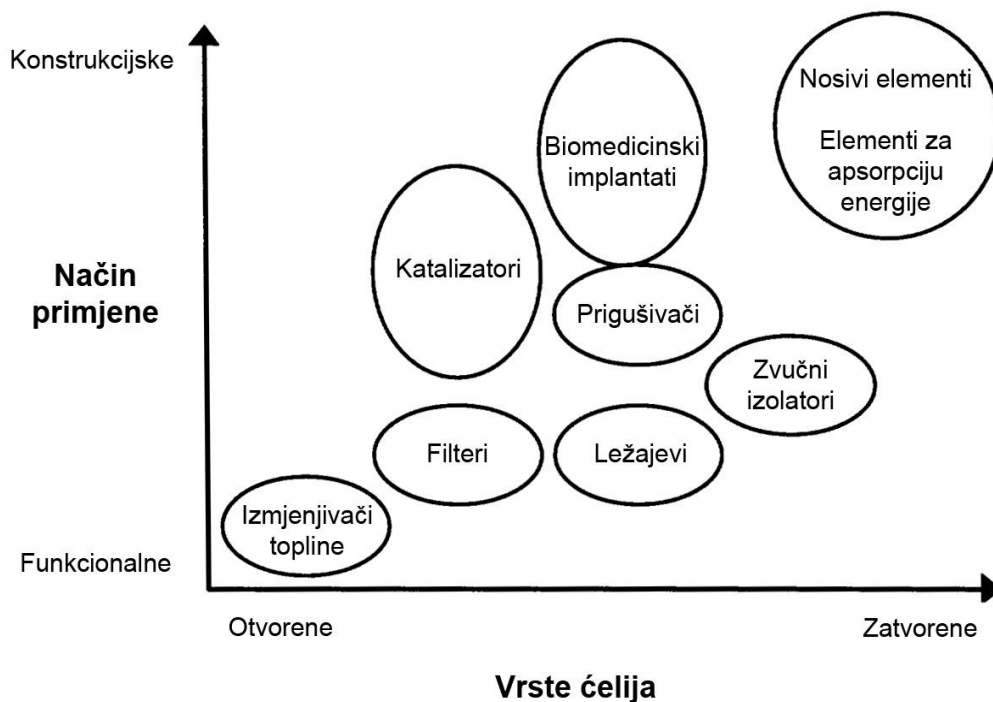
5. Primjena metalnih ćelijastih materijala

5.1. Općenito

Područje primjene ćelijastih metalnih materijala se širi. Postoji nekoliko ključnih uvjeta o kojima ovisi hoće li se naći odgovarajući porozni metal ili metalna pjena da bi se riješio konstrukcijski problem:

1. morfologija: vrsta poroznosti (otvorene ili zatvorene ćelije), volumen ćelija, veličina ćelija i ukupna unutarnja površina ćelija;
2. metalurški čimbenici: odgovarajući metal ili legura ili zadana mikrostruktura;
3. proizvodnja: mogućnost oblikovanja pjene, ćelijaste krutine ili kompozita napravljenog od metalne pjene i konvencionalnih limova ili profila;
4. ekonomičnost: trošak, pogodnost za velikoserijsku proizvodnju.[2]

Prva je točka kritična za bilo koju procjenu primjene metalnih ćelijastih materijala. Nova područja primjene zahtijevaju da medij, tekućina ili plin mogu prolaziti kroz ćelijasti materijal. Može postojati potreba za točno određenim stupnjem poroznosti, tj. „prohodnosti“, od „vrlo otvorenih“ (za fluid koji teče velikom brzinom) do „potpuno zatvorenih“ (za konstrukcijske primjene, tj. za neki oblik opterećenja) ovisno o zahtjevima u primjeni. Stupnjevit je razlika između dviju različitih primjena, funkcionalne ili konstrukcijske. Također, vrlo je važno od kojih vrsta metala ili legura se određeni tip ćelijaste strukture može proizvesti. Proizvodi konstrukcijske namjene (npr. nosivi dijelovi) moraju biti lagani jer bi se inače mogli proizvesti i od konvencionalnih metala i legura.



Slika 30 – Način primjene metalnih pjena ovisno o stupnju otvorenosti ćelija [2]

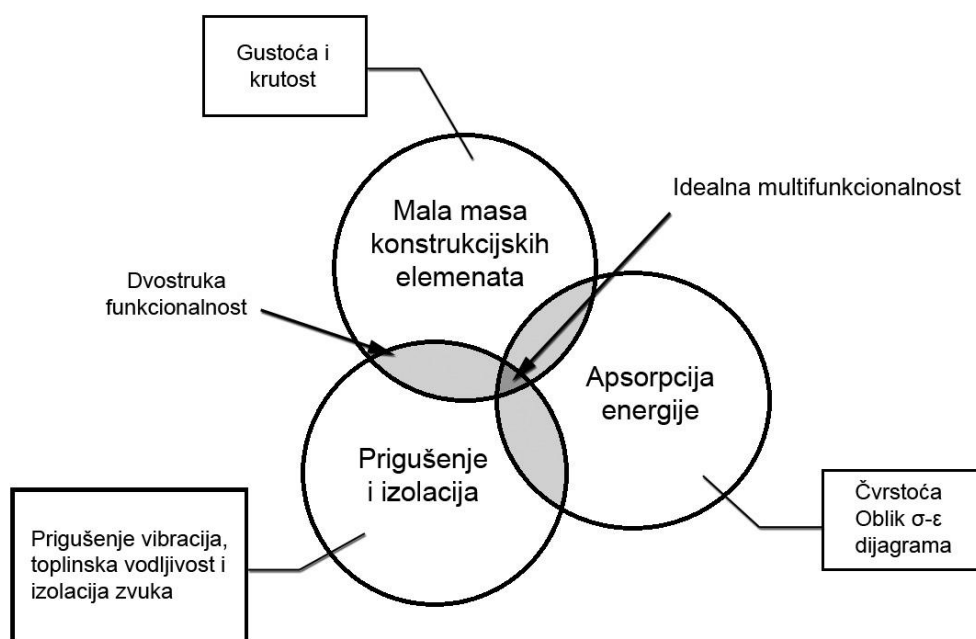
Upravo stoga aluminijske, magnezijske i titanske pjene upotrebljavaju se za tu namjenu. U medicini vjerojatno će se prednost dati titanu zbog njegove kompatibilnost sa živim tkivom. Nehrđajući čelik ili titan primjenjuju se tamo gdje je agresivni medij ili gdje su visoke temperature. Naravno, pri tom se mora uzeti u obzir proces proizvodnje i pitanje isplativosti. Tehnologija proizvodnje kojom se određeni ćelijasti metal dovede u željeni oblik i inkorporira ga se u stroj ili vozilo gdje će ispunjavati svoju funkciju nema smisla ako se ta komponenta ne može proizvesti po razumnoj cijeni. U sljedeća dva poglavlja opisuje se primjena ćelijastih metala. U mnogim se slučajevima radi o konceptima koji se još uvijek ispituju. Najprije će biti riječ o pjenama sa zatvorenim ćelijama, a nakon toga o onima s otvorenim ćelijama.[2]

5.2. Konstrukcijska primjena metalnih pjena u različitim industrijskim sektorima

5.2.1. Automobilaska industrija

Povećani zahtjevi sigurnosti unutar automobila u mnogim su slučajevima povećali težinu vozila. Ta je činjenica kontradiktorna zahtjevima za malu potrošnju goriva te stoga

inženjeri ipak moraju naći način da smanje ukupnu masu. Također, posebno u Europi i Japanu, na tržištu je velika potražnja za automobilima malih dimenzija. Međutim, smanjenje dimenzija ne bi smjelo biti na račun putničke kabine, pa stoga proizvođači konstruiraju nove kompaktne pogonske agregate i reduciraju veličinu drugih struktura unutar automobila da bi održali komfor putničkog prostora. To stvara probleme s rasipanjem topline u predjelu pogonskog agregata i sa sigurnošću u slučaju sudara zbog smanjene veličine struktura za upijanje energije prilikom udara. Na kraju postoji zahtjev za smanjenjem buke koji je također doveo do novih materijala – zvučnih izolatora (Slika 31).



Slika 31 – Glavna područja primjene pjena u automobilskoj industriji [2]

Metalne pjene su moguće rješenje za neke od ovih problema (Slika 31). Unutar krugova su tri glavna područja primjene, a u kućicama pokraj njih su svojstva pjena koja im daju prednost u tim područjima. Sjecište svih triju krugova predstavlja idealnu pjenu koja bi zadovoljila svim uvjetima. No, u praksi takve metalne pjene teško se nađu pa se obično upotrebljavaju pjene koje zadovoljavaju zahtjevima dvaju od tri glavna područja primjene.[2]

5.2.2. Mala masa konstrukcija

Mala masa konstrukcije ovisi o dva svojstva metalnih pjena:

- da pokazuju određeni iznos skoro reverzibilne, kvazi-elastične deformacije
- da im je omjer čvrstoće i mase što veći.[2]

U primjeni, ćelijasti materijali moraju se „natjecati“ s konvencionalnim materijalima s optimiziranom masom, npr. aluminijske pjene uspoređuju se s ekstrudiranim aluminijskim profilima, ili sendvič konstrukcije od aluminijskih pjena uspoređuju se s aluminijskim saćima. Ipak, materijali od metalnih pjena mogu biti bolje rješenje:

1. Lakše i jeftinije je proizvesti dijelove komplicirane geometrije od metalnih pjena. Saćasti materijali imaju bolja svojstva od metalnih pjena ali ih je vrlo teško i skupo proizvesti.
2. Konstrukcije napravljene od ćelijastih materijala su robusnije i bolje podnose jake udarce i štetu.
3. Metalne pjene imaju još neka dodatna korisna svojstva kao npr. zvučna ili toplinska izolacija.[2]

Lagane čvrste konstrukcije napravljene od aluminijskih pjena (ako je moguće u obliku sendvič konstrukcije) mogu pridonijeti smanjenju mase automobila (npr. poklopac motora, poklopac prtljažnika i kližući krovovi, gdje je potrebna visoka krutost da bi se izbjegla torzijska deformacija i da se izbjegne prenošenje vibracija). U konstrukcijskoj studiji DaimlerChryslera jedan od stražnjih panela napravljen od aluminijske pjene (gustoća $0,6 \text{ g/cm}^3$) uspoređen je s magnezijским tlačno-lijevanim dijelom. Rezultati su pokazali da je torzijska krutost otprilike jednaka. Njemački proizvođač Karmann trenutno testira trodimenzijski oblikovane sendvič konstrukcije u trkaćim automobilima i kabrioletima gdje je problem krutosti i težine još izraženiji. Dva dijela proizvedena od aluminijske pjene zamijenjena su konvencionalnim komponentama napravljenim od prešanih čeličnih limova. Na taj je način težina smanjena za 25% a krutost u jednom slučaju povećana i do 700%. Dijelovi napravljeni od aluminijskih pjena skuplji su od konvencionalnih pa takva primjena ne bi bila dobar primjer ako bi se postiglo samo smanjenje mase. No, upotrebljavajući čvrste sendvič konstrukcije dolazi se do novih konstrukcijskih rješenja u izradi glavnog

konstrukcijskog okvira vozila. Na taj se način može smanjiti broj potrebnih komponenti, pa tako i troškove.[2]

5.2.3. Apsorpcija energije udara

Kada se radi o apsorpciji energije, uvijek se upotrebljava plastična nepovratna deformaciju materijala. Mnogi ćelijasti materijali odlično apsorbiraju energiju zahvaljujući gotovo konstantnoj razini naprežanja pri različitim razinama deformacija. Metalne se pjene ponašaju bolje od običnih polimernih pjena zbog njihove znatno veće čvrstoće. Stoga je apsorpcija energije vrlo važno područje za primjenu ćelijastih materijala.



Slika 32 – Primjena aluminijske pjene kao elemenata za apsorpciju energije [12]

Pravila o pasivnoj sigurnosti vozila zahtijevaju da se energija udara dijeli po za to određenim područjima i da je čvrsta putnička kabina zaštićena. Različiti su rasponi brzine udara. U donjem rasponu (od 3 do 10 km/h, ovisno o proizvođaču) energija se apsorpira bez deformacije elastičnim materijalima ili hidrauličnim sistemima. U srednjem rasponu brzine (do 20 km/h) dolazi do kontrolirane očekivane deformacije posebnih elemenata („sudarnih zona“) koji mogu biti od šupljih okruglih aluminijskih profila. Te je elemente relativno jednostavno zamijeniti nakon sudara pa je popravak isplativ. Jedino se u najgornjem rasponu brzina šasija nepovratno deformira i velika je šteta na vozilu.

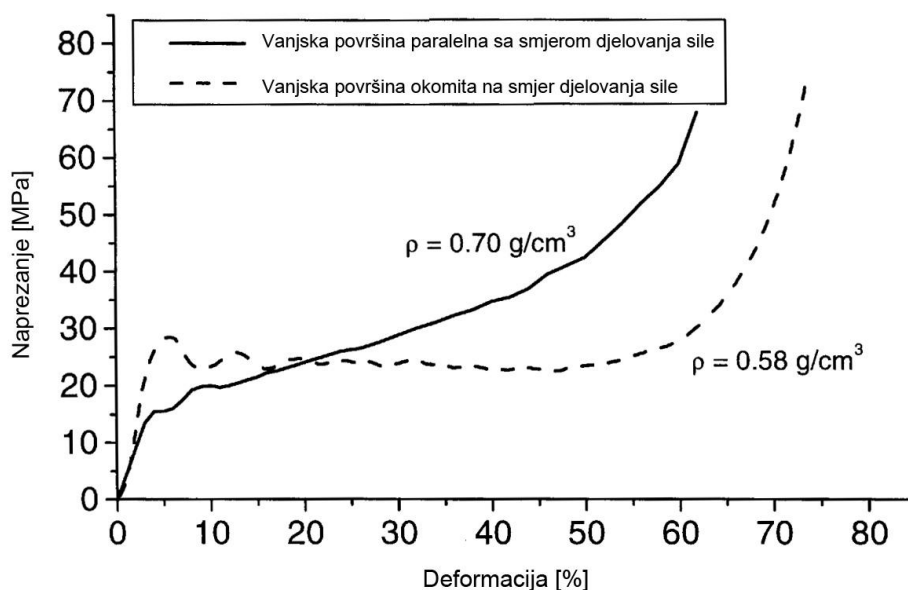


Slika 33 – Duocel aluminijska pjena promjera 5 cm u FMTV vozilu za zaštitu posade pri udaru [13]

Različite su vrste sudara: frontalni, bočni, prevrtanje itd. U svakoj situaciji dio koji apsorbira energiju deformira se na drugačiji način i mora zadovoljiti neke opće kriterije:

1. idealna svojstva apsorpcije energije;
2. visoki kapacitet apsorpcije po volumenu, dužini ili masi;
3. izotropnost svojstava apsorpcije energije, tj. moraju se zadržati dobra svojstva apsorpcije energije za različite smjerove udara.[2]

Aluminijske pjene pokazuju prilično izotropno svojstvo apsorpcije energije osim u slučajevima kad postupkom proizvodnje stvaramo anizotropnosti. Većina studija temelji se na ćelijastim metalima kojih je vanjska površina veće gustoće ili kojih vanjsku površinu čini lim i obuhvaća ćelijastu jezgru. Jedan od razloga proizvodnje takvih, moglo bi se reći kompozitnih materijala, uz poboljšanu otpornost koroziji jest i bolja apsorpcija energije udara.



Slika 34 – Usporedba ponašanja pjena pri naprežanju i deformaciji ovisno o smjeru djelovanja sile [2]

Na slici 33 je usporedba dviju vrsta aluminijskih pjena od kojih jedna ima vanjsku površinu paralelnu sa smjerom sile a druga okomitu na smjer djelovanja sile.[2]

5.2.4. Prigušenje zvuka

Polimerne pjene se često upotrebljavaju kao zvučni izolatori, pa je stoga logično zaključiti da je to jedna od primjena metalnih pjena. Postoje različiti načini na koje aluminijska pjena može pridonijeti smanjenju buke. Prvi je problem neželjenih vibracija koje mogu prouzročiti štetu i dovesti do emisije zvučnih valova (buke). Kako je Youngov modul metalnih pjena manji od odgovarajućega običnog metala, rezonantna frekvencija metalnih pjena će općenito biti pomaknuta na niže frekvencije u usporedbi s konvencionalnim konstrukcijskim rješenjima. Također faktor prigušenja pjena je veći nego običnog metala što također doprinosi smanjenju vibracija.



Slika 35 – Konstrukcija od aluminijske pjene za apsorpciju zvuka i vibracija na nadvožnjaku

[12]

Ponekad je zadaća smanjiti buku ne samo u putničkoj kabini nego i njenu propagaciju u okoliš. Dio se vala uvijek apsorbira u metalnoj pjenu prije nego što se reflektira natrag prema izvoru. Zvuk koji ulazi u unutarnju strukturu pjene, pogotovo ako su pore spojene malim kanalima, tlači zrak u tim kanalima određeni broj puta u sekundi. Dok zrak putuje tim kanalima trenje između zraka i stijenki ćelija te turbulentno strujanje rasipaju se i smanjuju tu energiju. Ako se imaju u vidu svi ti mehanizmi, metalne pjene mogu apsorbirati do 99% buke na određenim frekvencijama (obično 1-5 kHz). Prostor ispunjen zrakom između pjene i vanjske stijenke uzrokuje pomak u područje nižih frekvencija ako se radi o ćelijama otvorenog tipa. Izolacija i apsorpcija zvuka vrlo je važna tema u automobilske industriji. Čest je problem da elementi koji trebaju apsorbirati zvuk moraju biti samonoseći i otporni na više temperature. Kombinacija polimernih pjena i aluminijskih folija čine se kao rješenje, ali je često nepoželjno. Aluminijske pjene proizvedene trenutnom tehnologijom nemaju najbolja svojstva apsorpcije zvuka zbog malog broja kanala malih dimenzija koji spajaju ćelije, ali su zato samonoseće i otporne na više temperature. Kad bi se mogla povećati zvučna izolacijska svojstva aluminijskih pjena dobila bi savršena svojstva za tu primjenu.



Slika 36 – Aluminijske pjene za apsorpciju zvuka, obojane otpornije na koroziju [12]

Alporas pjene se trenutno upotrebljavaju kao elementi za apsorpciju zvuka s autocesta i željezničkih tunela u Japanu. Za tu su primjenu ćelijasti materijali valjani nakon proizvodnje što je reduciralo debljinu s 10 mm na 9 mm i stvorilo dovoljne količine pukotina i drugih defekata u ćelijama da se poboljšaju svojstva apsorpcije zvuka. Ipak, ni zvučna izolacijska svojstva takvih pjena ne mogu se usporediti s polimernim pjenama ili staklenom vunom. Ipak, kao prednosti takvih pjena navode se nezapaljivost, odsutnost otrovnih plinova pri izgaranju, otpornost na vremenske prilike i lagano čišćenje. Alporas se ponekad primjenjuje i kao zvučni izolator u predvorjima javnih građevina jer daje zanimljiv vizualni dojam.[2]



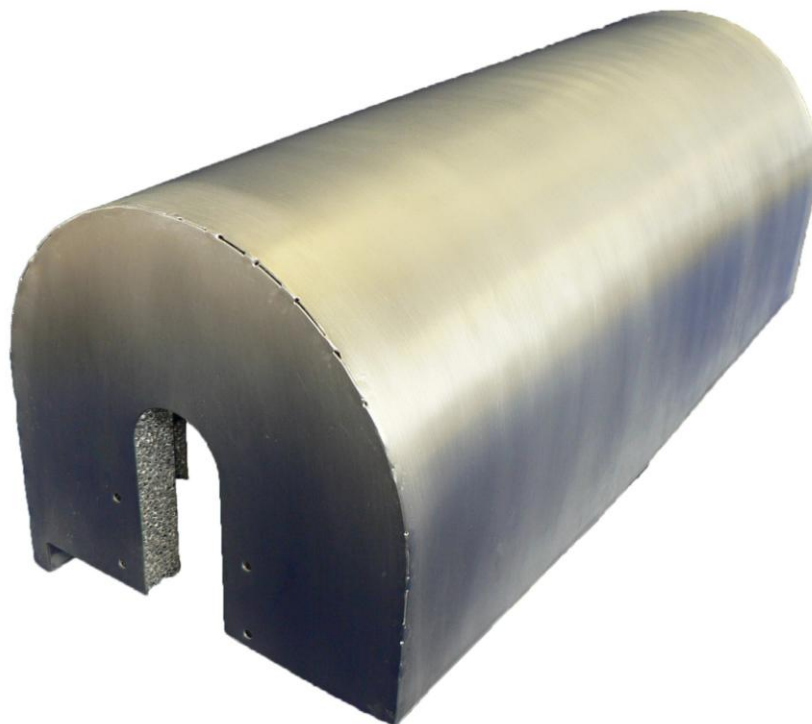
Slika 37 – Vrata od aluminijske pjene [12]

5.2.5. Zrakoplovna i svemirska industrija

U zrakoplovnoj i svemirskoj industriji, kao i u automobilskoj industriji, iznimno je bitno svojstvo male mase, odnosno smanjenje težine. U zrakoplovnoj industriji zamjena skupih sačastih struktura s aluminijskim pjenama ili sendvič konstrukcijama od metalnih pjena daje bolje performanse uz smanjene troškove. Iako je potrebno da materijal ima veliku otpornost na izvijanje što nije najbolja karakteristika metalnih pjena, ipak je njihova velika prednost izotropnost mehaničkih svojstava i mogućnost proizvodnje kompozitnih konstrukcija bez ljepila što je vrlo važno u slučaju požara kada je bitno da konstrukcija što je duže moguće zadrži svoj integritet. Boeing trenutno ispituje upotrebu velikih sendvič konstrukcija od titanskih i aluminijskih pjena u proizvodnji repova helikoptera. Velika prednost takvih sendvič konstrukcija su dobra svojstva u sve tri dimenzije, a ne poput sačastih struktura samo u dvije. Stoga proizvođači helikoptera pokušavaju uvesti primjenu dijelova od aluminijskih pjena i zamijeniti sačaste komponente koje su trenutno u upotrebi.[2]

Sljedeći primjer upotrebe su konstrukcijski dijelovi turbina za koje se traži povećana krutost u kombinaciji s dobrim svojstvima prigušenja. Brtve između različitih dijelova motora također se mogu raditi od poroznih metala. Pri prvom pogonu lopatice turbine izrežu točnu konturu u ćelijastom materijalu i tako oblikuju gotovo plinonepropusni odjeljak u kojem ta turbina rotira.[2]

U svemirskoj industriji aluminijske pjene upotrebljavaju se kao konstrukcijski elementi za apsorpciju energije udara, za platforme na koje slijeću svemirska vozila ili kao konstrukcijski elementi na satelitima na kojima zamjenjuju materijale što uzrokuju probleme u okolišnim uvjetima u svemiru poput promjena temperature, vakuuma itd.



Slika 38 – Panel za zaštitu ključne NASA-ine opreme od udara meteorita u svemiru [13]

U svemiru također se mogu upotrebljavati i visoko reaktivne, vrlo lagane pjene poput litij-magnezijskih zato jer u vakuumu nisu prisutni plinovi, pa te pjene ne mogu kemijski reagirati.[2]

5.2.6. Upotreba u brodogradnji

Lagana konstrukcija postala je važna i u brodogradnji. Moderni putnički brodovi mogu biti cijeli izrađeni od aluminijskih ekstrudiranih profila, aluminijskih limova i aluminijskih saćastih struktura. Veliki paneli napravljeni od aluminijskih pjena u budućnosti bi mogli zamijeniti navedene materijale. U brodogradnji je važno da se takve pjenaste, odnosno sendvič strukture mogu efikasno spajati i pritezati u izgradnji broda. Još je nekoliko primjera

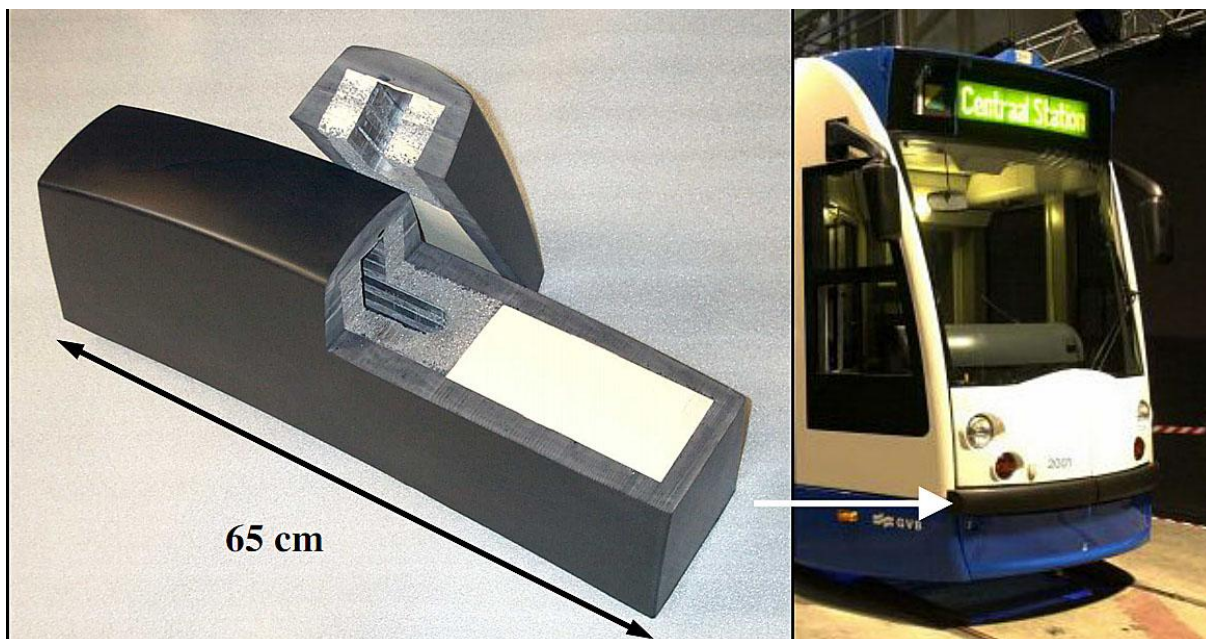
primjene ćelijastih materijala u brodogradnji poput platformi za dizala, platformi za antene i pirotehničkih ormarića.[2]



Slika 39 – Model broda Bioship1 sa dnom i oplatom trupa zamijenjenima aluminijskom pjenom te tako smanjenom težinom 30% [14]

5.2.7. Željeznička industrija

Da bi se metalne pjene primijenile u željeznici i željezničkoj opremi moraju zadovoljiti tri jednaka glavna kriterija kao i u automobilskoj industriji. Apsorpcija energije je posebno bitna u slučaju lagane željeznice i tramvaja koji voze u urbanim područjima te ako se dogode sudari s automobilima. Japanski vlakovi opremljeni su s 2,3 m³ blokom Alporas pjene da bi poboljšali apsorpciju energije pri sudaru.



Slika 40 – Primjena aluminijskih pjena na tramvajima [20]

Prednosti pjenjenih laganih konstrukcijskih elemenata su jednake kao i u automobilskoj industriji s jednom velikom razlikom, a to je što konstrukcijski elementi za željeznicu i željezničke vagona moraju biti mnogo veći.[2]

5.2.8. Građevinska industrija

Široki je raspon moguće primjene metalnih pjena u građevinskoj industriji. Moderne poslovne zgrade napravljene su od betona, a njihova su pročelja ukrašena panelima koji skrivaju beton i poboljšavaju vizualni dojam građevine. Ti paneli moraju biti lagani, čvrsti i negorivi. Vrlo se često upotrebljavaju tanke ploče mramora ili drugoga dekorativnog kamena koje se pričvršćuju na nosače na zidovima građevine. Ti nosači mogu biti od aluminijskih pjena koje zamjenjuju vrlo skupe saćaste strukture što su se prije upotrebljavale.



Slika 41 – Primjena aluminijskih pjena u zgradama [12]

Rukohvati na balkonima moraju zadovoljavati rigorozne sigurnosne propise. Neki od materijala koji se danas upotrebljavaju za izradu rukohvata su preteški i problematični u slučaju požara. Ako bi ih se zamijenilo s aluminijskim pjenama, neki od tih problema bili bi jednostavno riješeni.[2]

Aluminijske pjene mogle bi biti vrlo korisne u smanjenju potrošnje energije u dizalima. Zbog čestih ubrzanja i retardacije te velikih brzina dizala, vrlo je bitno da je konstrukcija lagana. Ipak, sigurnosni propisi često ne dopuštaju primjenu takvih konstrukcija male mase i male težine. Ipak, u budućnosti će ih se možda moći upotrebljavati i za tu namjenu jer aluminijske pjene istodobno mogu služiti kao elementi za apsorpciju energije udara te kao konstrukcijski nosivi dijelovi.[2]

Niska toplinska vodljivost i mala masa aluminijskih pjena pogoduju upotrebi tog materijala za vatrootporna vrata i poklopce. Bez obzira na to što je talište aluminijske pjene relativno nisko (manje od 660°C), aluminijske pjene su iznenađujuće stabilne kada su izložene otvorenom plamenu i jakoj oksidaciji u takvim uvjetima.[2]

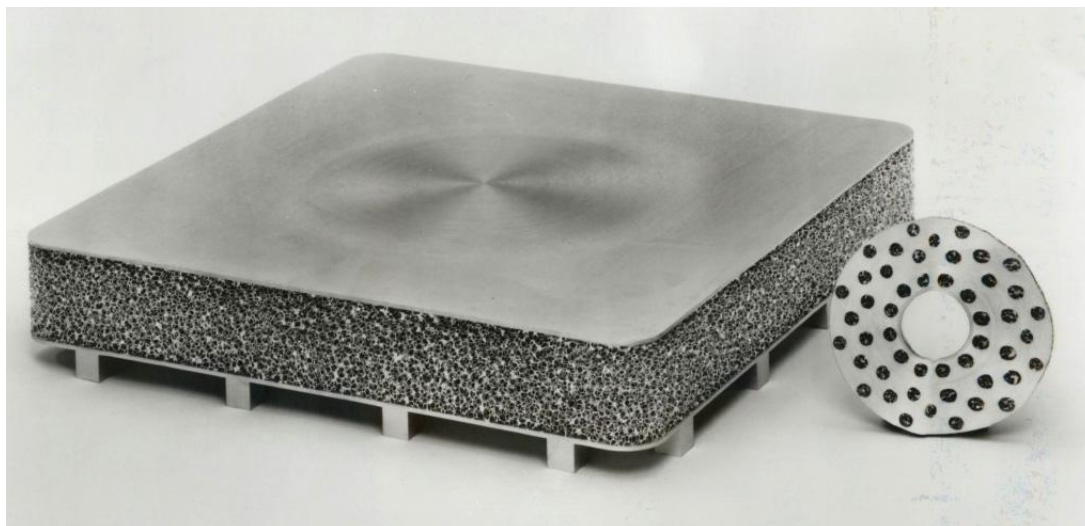


Slika 42 – Primjena u izgradnji poslovnih prostora [12]

Pri spajanju raznih elemenata na zidovima građevina također se mogu upotrebljavati metalne pjene. U rupe se stavljaju metalni prah i agens te naknadnim zagrijavanjem dobivaju se „čepovi“ za spajanje koji pokazuju jako dobre rezultate ako je gustoća tako proizvedene pjene dovoljno visoka.[2]

5.2.9. Upotreba u konstrukciji strojeva

Nekoliko je zanimljivih primjena metalnih pjena u konstrukciji strojeva. Dijelovi napravljeni od čvrste metalne pjene ili profili punjeni metalnom pjenom mogu smanjiti inerciju i poboljšati prigušenje te tako zamijeniti konvencionalne metale od kojih se danas proizvode osovine, platforme ili kućišta. Takve se komponente mogu upotrijebiti za izradu bušilica ili glodalica te za tiskarske strojeve. Kućišta za male ručne bušilice od aluminijskih pjena pružaju određene prednosti u odnosu na tradicionalna kućišta npr. poboljšano prigušenje vibracija. Proizvodnjom kućišta za električne strojeve dobiva se i zaštita od elektromagnetskih valova. Također bi se moglo upotrijebiti diskove proizvedene od aluminijskih pjena za bruseve tako da se čestice brusa nanose na obod diska. Time bi disk imao manju inerciju i manju masu, a potrošene čestice bi mogle ući unutar pora.



Slika 43 – Upotreba aluminijskih pjena na teleskopskim ogledalima [12]

Aluminijske pjene se upotrebljavaju i kao potpornji za teleskopska ogledala. Primjenjuju se i za lagane plovke unutar agresivnog, korozivnog ili vrućeg medija. S obzirom na to da se u tim slučajevima ne mogu upotrijebiti polimerne pjene, takvi su plovci obično jako skupi, jer su od titana koji ima vrlo visoku cijenu. Njih bi se moglo zamijeniti aluminijskim pjenama sa zatvorenim vanjskim sjenkama, te po potrebi unutra staviti elektromagnetske uređaje. Aluminijska bi pjena zbog svoje poroznosti imala dovoljan uzgon da pluta i mogla bi izdržati velik vanjski pritisak.[2]



Slika 44 – Aluminijska pjena sa zatvorenim ćelijama pluta na vodi [19]

5.2.10. Oprema za sport

Ovi novi materijali bi se mogli primjenjivati i za sportsku opremu zbog prihvatljivosti visokih cijena. No, autori raznih publikacija baš nisu naveli puno ideja za primjenu čelijastih metala. Jedan od rijetkih primjera je zaštita potkoljenične kosti za igrače američkog nogometa zbog dobre sposobnosti apsorpcije energije udara aluminijskih pjena.[2]



Slika 45 – Ulošci za tenisice od aluminijske pjene [15]

5.2.11. Biomedicinska industrija

Titan ili kobalt-krom legure upotrebljavaju se za izradu proteza ili dentalnih implantata jer su biokompatibilni. Da bi se osiguralo zarastanje tkiva, obično se proizvodi porozni sloj istoga ili drugoga biokompatibilnog materijala na protezu pomoću metode toplinskog naštrcavanja. Alternativno, mogao bi upotrebljavati porozni titan ili titanska pjena jer tijekom njihove proizvodnje može se prilično točno osigurati raspored gustoće koja je potrebna da se zadovolji čvrstoća i poroznost. Poroznost je vrlo bitna zbog urastanja u tkivo. U slučaju dentalnih implantata, znanstvenici se još nisu uspjeli dogovoriti kako implantant mora biti konstruiran da bi se osigurao maksimalni vijek trajanja i funkcionalnost. Prema mišljenju jednih, modul dentalnog implantata mora biti jednak modulu vilice (na kojoj se nalaze zubi).

Kada bi se znao odnos između modula i gustoće metalnih pjena moglo bi se jednostavno proizvesti implantat s modulom koji bi osigurao biokompatibilnost te stimulirao urastanje implantata u kost. Magnezijske pjene mogle bi se upotrebljavati kao biorazgradivi implantati koji bi preuzeli opterećenje dok kost ne zaraste, a kasnije bi bili stupnjevito rastavljeni i apsorbirani od strane samog tijela.[2]

5.3. Funkcionalna primjena metalnih pjena

Metalurgijom praha proizvode se porozni sinterirani metali s vrlo širokom primjenom. Ne čudi podatak da ćelijasti metali mogu pronaći sličnu primjenu, ako imaju dovoljan stupanj poroznosti.[2]

5.3.1. Filtriranje i odvajanje

Postoje dvije vrste filtera:

- filteri koji zadržavaju i odvajaju krute čestice ili vlakna raspršena u tekućini (suspenzija);
- filteri koji zadržavaju krute ili tekuće čestice raspršene u plinu.[2]

Primjeri filtera prve vrste su filteri za čišćenje recikliranih polimernih taljevina, za uklanjanje kvasca iz piva ili za onečišćena ulja. Druga vrsta se upotrebljava za filtriranje dizelskih para ili uklanjanje vode iz ventilacijskih sustava.



Slika 46 – Uljni separator [13]

Važna svojstva filtera su: mogućnost finog filtriranja, dobro zadržavanje čestica, lako čišćenje, dobra mehanička svojstva, dobra otpornost na koroziju te niska cijena.[2]

5.3.2. Izmjenjivači topline i rashladni uređaji

Visoko vodljive pjene od bakra i aluminijske upotrebljive su za izmjenjivače topline. U ovom je slučaju također uvjet otvorena struktura ćelija. Toplinu možemo dovoditi ili odvoditi plinovima i tekućinama tako da hladimo ili grijemo metalnu pjenu dok fluid prolazi kroz nju. Zbog relativno velike poroznosti pad tlaka je minimalan.



Slika 47 – Izmjenjivač topline [13]

Primjenjuju se za kompaktne rashladne uređaje, mikroelektroničke uređaje s velikim rasipanjem topline poput računalnih čipova ili elektronike za napajanja. Čelijasti materijali mogu se upotrebljavati i za hlađenje isparavanjem. Velika površina, malo prigušenje toka i dobra toplinska vodljivost pojedine pjene čine pogodnima za takvu upotrebu.[2]

5.3.3. Katalizatori

Učinkovitost katalizatora jako ovisi o velikoj kontaktnoj površini između katalizatora i plinova ili tekućina. Stoga se katalizator ili oblikuje u visoko porozni proizvod ili se, ako to nije moguće, dodaje drugom poroznom materijalu. Katalizator se može valjanjem dodati metalnoj pjenu otpornoj na koroziju te se konzerviranjem pri povišenim temperaturama dobiva konačni proizvod. Takav katalizator ima dobra svojstva jer nakon mnogo temperaturnih ciklusa ne izlazi iz „kućišta“ koje je sastavljeno od metalne pjene. Primjer iz prakse su katalizatori za uklanjanje dušikovih oksida iz ispušnih plinova termoelektrana.[2]

5.3.4. Skladištenje i transport tekućina

Jedna od najstarijih primjena poroznih metalnih materijala su samopodmazujući ležajevi u kojima ulje pohranjeno u međuprostoru između čestica polako izlazi van zamjenjujući iskorišteno ulje. S obzirom na to da metalne pjene imaju veći volumen u koji možemo pohraniti ulje, izgleda da bi bile idealan materijal za ovu primjenu. Primjena metalnih pjena ne mora biti ograničena samo na ulja, već se može pohraniti i voda koja bi polako isparavala i tako bi se kontrolirala vlažnost. Prednost je i što transport tekućine unutar metalnih pjena može sam krenuti pod utjecajem kapilarnosti. Pjene su primjenjive i za transport fluida kad je potrebno održavati konstantnu temperaturu ili kad se želi smanjiti utjecaj gibanja fluida u djelomično napunjenim rezervoarima.[2]

5.3.5. Kontrola protoka fluida

Porozni materijali mogu se upotrebljavati za kontrolu brzine protoka tekućine i plinova. Primjena materijala dobivenih metalurgijom praha puno je pouzdanija od primjena konvencionalnih „mikroventila“. Zbog različitih stupnjeva otvorenosti ćelija metalnih pjena, za svaku bi se kontrolu protoka mogao izabrati odgovarajući ćelijasti metal. Metalne pjene već se upotrebljavaju u zračnim tunelima ili kao distributori protoka u ventilima.[2]

5.3.6. Prigušivači

Materijali s određenim stupnjem poroziteta, tj. otvorenosti ćelija mogu biti prilagođeni da selektivno prigušuju pojedine frekvencije. Metalne pjene mogle bi se upotrebljavati za prigušenje nagle promjene tlaka u kompresorima ili pneumatskim uređajima.[2]



Slika 48 – Prigušivači [3]

5.3.7. Raspršivači

Porozni metali mogu biti superiorniji materijal od keramike, ako se plin mora homogeno raspršivati u tekućini pri konstantnoj brzini. Primjer takve upotrebe je gaziranje pića. Taj proces zahtijeva porozni konstrukcijski dio koji može stvoriti dovoljno male mjehuriće plina i zadovoljiti druge kriterije poput otpornosti koroziji, toplini ili udarcima.[2]

5.3.8. Elektrode za baterije

Pjene od nikla već se upotrebljavaju za elektrode u punjivim NiCd baterijama kod kojih je važna mala masa i velika gustoća pohranjene energije. Logično je pretpostaviti da bi se olovne pjene mogle puniti s elektrokemijski aktivnom supstancom (pastom koja sadrži vrlo fini prah olovnih oksida) gdje elektroda dolazi u kontakt s elektrolitom (sumpornom kiselinom).[2]

5.3.9. Protupožarna primjena

Ćelijasti metali s velikom toplinskom vodljivošću vanjske stijenke mogu zaustaviti širenje plamena u zapaljivim plinovima. Pojedine pjene s otvorenim ćelijama mogu zaustaviti plamen čak i ako putuje brzinom od 550 m/s. U praksi dugački cjevovodi kojima se

transportiraju zapaljive plinove štite se metalnim pjenama u blizini potencijalnih mjesta zapaljenja da se širenje plamena ne bi odvijalo velikom brzinom i ako dođe do zapaljenja.[2]



Slika 49 – Vatrootporne ploče aluminijske pjene za toplinsku izolaciju [16]

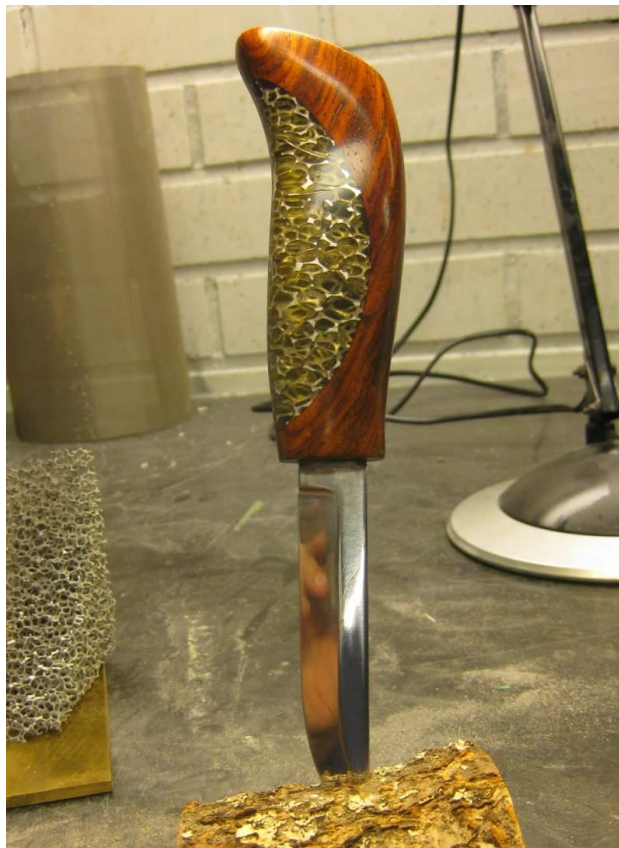
5.3.10. Čišćenje vode

Ćelijasti metalni materijali mogu se upotrebljavati za smanjenje koncentracije neželjenih iona u vodi. Onečišćena voda teče kroz visoko porozni ćelijasti metal u kojem ioni reagiraju s metalom redoks reakcijom. Već je ispitivana primjena aluminijskih pjena u neelektričnoj redukciji Cr(VI) iona u vodi.[2]

5.3.11. Upotreba ćelijastih metala u umjetnosti i prostornom uređenju

Otkad je čovjek proizveo metalne pjene kao novi tehnički materijal one nadahnjuju i intrigiraju maštu dizajnera i umjetnika. Primarni cilj dekorativne ili umjetničke primjene

metalnih pjena je stvoriti određeni vizualni dojam što se konvencionalnim materijalima ne može postići.



Slika 50 – Drška noža od aluminijske pjene i smole [18]

Pretpostavlja se da zlatne i srebrne pjene imaju veliki potencijal za neviđeni vizualni dojam uz veliki volumen i malu težinu. Od aluminijskih pjena izrađuje se moderni namještaj, satovi i rasvjetna tijela. Pri takvim primjenama mehanička svojstva aluminijskih pjena nisu važna osim možda u izradi stolica ili stolova. Visokokvalitetni i skupi stereo sustavi izrađuju se upravo od aluminijskih pjena. Osim što aluminijska pjena daje visoku specifičnu krutost i umjereno mehaničko prigušenje, njime se postiže i moderni „high-tech“ imidž pa djeluje ekskluzivnije od tradicionalnih materijala.



Slika 51 – Audiofilska polica s unutrašnjosti od Alporas pjene [17]

Za inženjera materijala takva upotreba možda nije najzanimljivija i pitanje je vremena kad će izaći iz mode. Međutim, neosporno je da se od metalnih pjena može stvoriti vizualno svjež proizvod i skupo prodati.[2]

6. Eksperimentalni dio

6.1. Idejni projekt

U eksperimentalnom dijelu ovog rada trebalo je izraditi minimalno devet uzoraka ojačanih aluminijskih pjena, s trima različitim vrstama ojačanja te provesti statičko tlačno ispitivanje. Nakon analize podataka dobivenih ispitivanjem bilo je potrebno donijeti zaključak o količini i iskoristivosti apsorbirane energije ojačanih uzoraka ovisno o vrsti ojačanja te ih usporediti s rezultatima ispitivanja uzoraka aluminijskih pjena bez ojačanja slične mase (gustoće).

6.2. Izrada uzoraka

U kalup za izradu uzoraka promjera 85 mm i visine 100 mm stavljena su ojačanja te je raspoređeno 430 g prekursora ALULIGHT AlMgSi 0,6 TiH₂ - 0,4. Masa prekursora izmjerena je na vagi ScoutPro. Nakon što je zatvoren kalup i provjerena protočnost oduška kalup je stavljen u peć koja je bila prethodno zagrijana na 750°C.



Slika 52 – Postupak određivanja količine (mase) prekursora i punjenja kalupa

Radi se o elektrootpornoj peći Feliks Metal u Laboratoriju za nemetale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Vrijeme odvijanja procesa proizvodnje aluminijskih pjena pomoću prekursora nemoguće je prethodno odrediti ili izračunati pa je potrebno često provjeravati stanje unutar peći. Prosječno vrijeme u ovom slučaju bilo je 20 min. Kad

aluminij u tekućem stanju počne izlaziti kroz odušak, kalup se izvadi iz peći i oprezno djelomično ohladi namakanjem i uranjanjem u vodu. Dok je kalup još topao, gumenim se čekićem izbije uzorak aluminijske pjene iz kalupa.


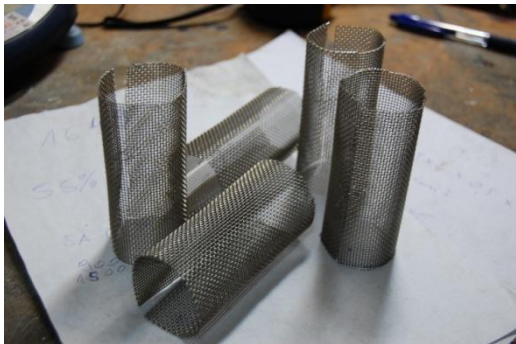
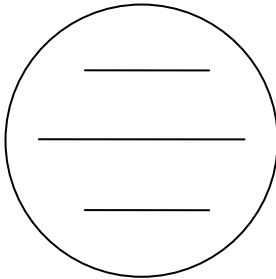


Slika 53 – Elektrootporna peć i hlađenje kalupa uranjanjem u vodu

6.3. Tipovi ojačanja

U ovom su ispitivanju upotrijebljena tri različita tipa ojačanja: čelično ojačanje tipa „H“ izrađeno od žice općega konstrukcijskog čelika promjera 4 mm te dva tipa ojačanja („O“ i „III“) izrađena od tanke, sitno pletene mreže.

Tablica 2 – Tipovi ojačanja i njihove karakteristike

Oznaka ojačanja	Vrsta ojačala	Dimenzije i raspored prekursora ako postoji	Fotografija ili skica
H	Čelična žica	48 mm x 48 mm x 95 mm	
O	Tanka mreža	Ø 132 mm x 95 mm 125 g prekursora unutar mreže, 305 g izvan mreže	
III	Tanka mreža	Jedna mreža: 52 mm x 95 mm Dvije mreže: 40 mm x 95 mm	

Izrada uzoraka s „H“ ojačanjem bila je problematična jer se na dnu kalupa nije mogla postići homogena struktura. Ti su uzorci označeni su kao H1, H2 i H3. Produljenjem vremena toplinske obrade u peći iscurila je veća količina tekućeg aluminija kroz odušak i tako pala gustoća, ali je homogenost bila zadovoljavajuća, te su ti uzorci označeni kao H4 i H5. Uzorci O1, O2, O3, III1, III2 i III3 ispali su očekivano dobro.



Slika 54 – Neujednačenost strukture aluminijske pjene sa „H“ tipom ojačanja

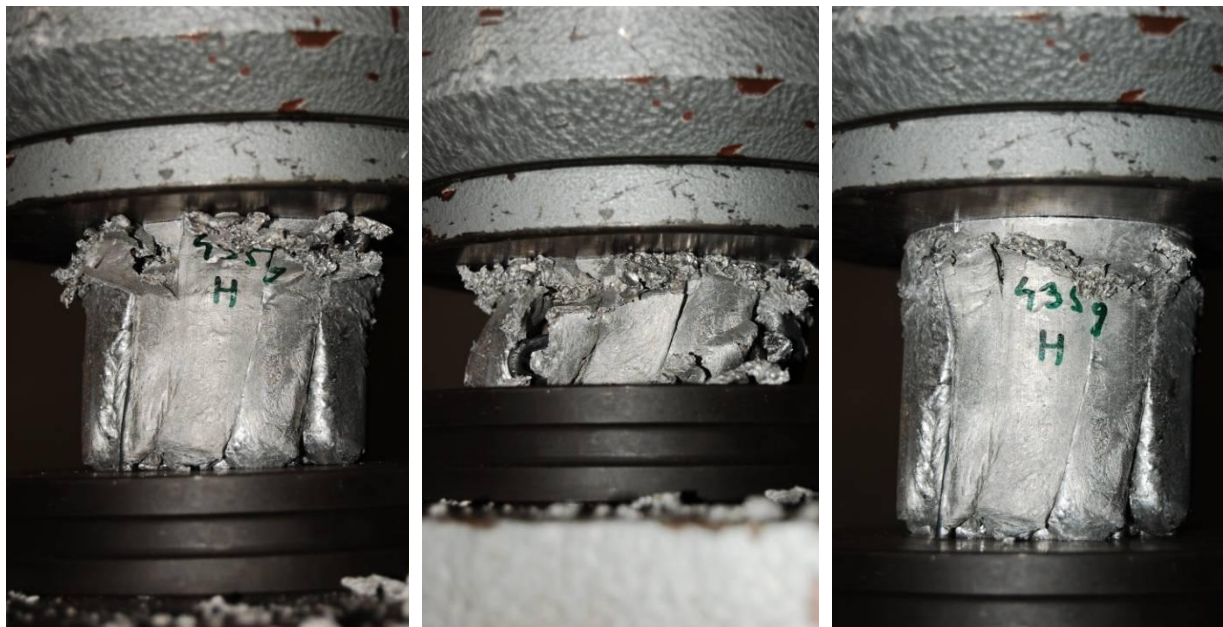
6.4. Statičko tlačno ispitivanje

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na kidalici proizvođača WPM, model EU 40 mod., maksimalne tlačne sile 400 kN. Brzina ispitivanja statičkoga tlačnog pokusa bila je 60 mm/min.



Slika 55 – Kidalica WPM EU 40 mod. na kojoj je obavljeno ispitivanje

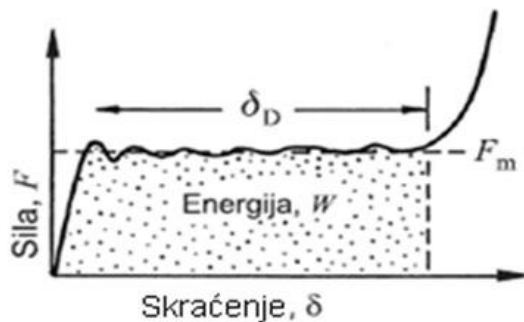
Rezultati statičkoga tlačnog ispitivanja uzoraka sažeti su u pojedinačnim dijagramima tlačna sila – skraćenje koji su u cijelosti prikazani u sljedećem poglavlju.



Slika 56 – Tijek statičkoga tlačnog ispitivanja i uvid u nehomogenost H1 uzorka

6.5. Analiza metode i rezultata ispitivanja

Metalne pjene podvrgnute vanjskoj tlačnoj sili zapravo vrše rad, tj. pretvaraju njeno djelovanje u mehaničku energiju urušavanja vlastite strukture. Površina ispod krivulje u dijagramu tlačna sila – skraćenje određuje količinu apsorbirane energije.



Slika 57 – Apsorbirana energija kao površina ispod krivulje u dijagramu tlačna sila – skraćenje [1]

Apsorbirana energija računa se izrazom:

$$W = \int_0^{\delta} F d\delta$$

u kojem je:

W – apsorbirana energija [J]

F – tlačna sila [kN]

δ – skraćenje [mm]

Razne su metode i programski alati koji olakšavaju postupak računanja površine ispod kompleksne krivulje. U ovom je radu upotrijebljen internetski dostupan besplatni program Graph. Program regresijskom analizom pronalazi jednadžbu krivulje koja prolazi unesenim karakterističnim točkama (očitanima iz rezultata ispitivanja) te računa određeni integral pomoću Simpsonovog pravila s 1000 iteracija.

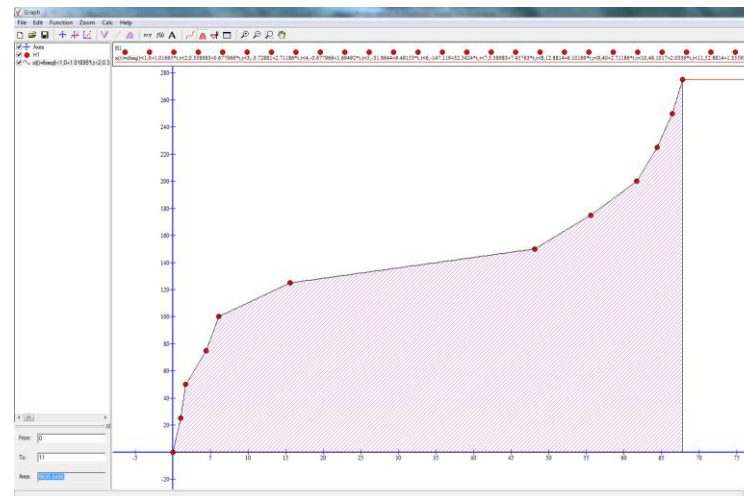
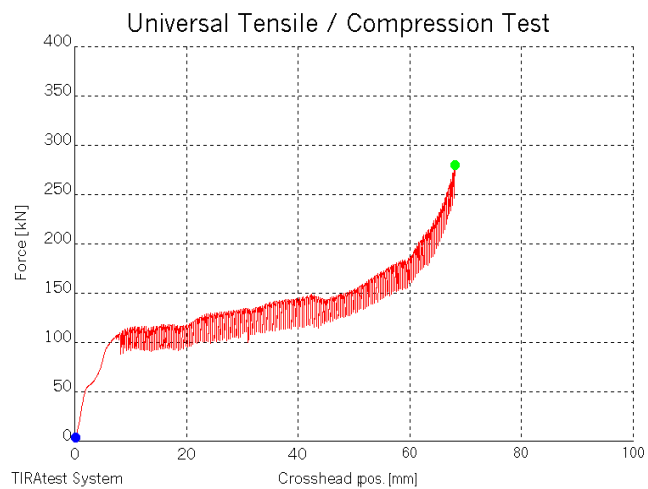
Nakon što je određena vrijednost apsorbirane energije, uzorak se može usporediti s idealnim apsorpcijskim materijalom kojega je energija površina pravokutnika s konačnim vrijednostima tlačne sile i skraćenja kao stranicama. Omjer tih dviju energija je iskoristivost apsorbirane energije - η .

$$\eta = \frac{W}{W_{idealno}} \quad W_{idealno} = F \cdot \delta$$

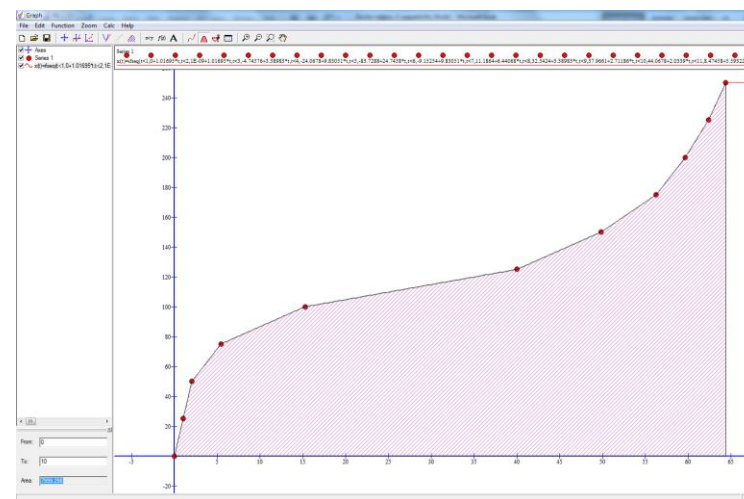
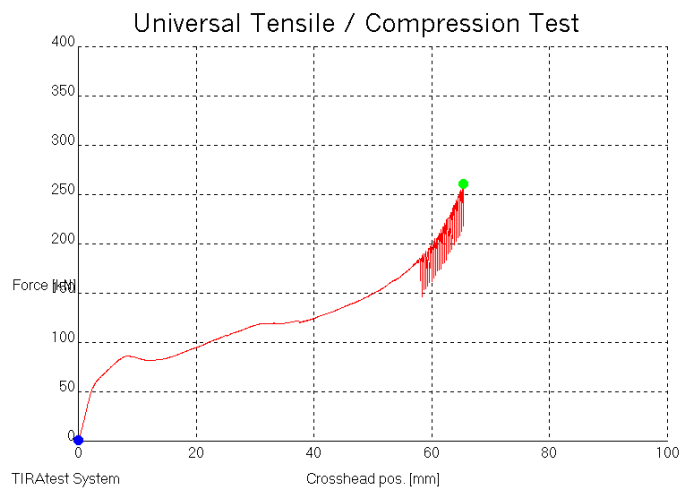
U nastavku je tablica s vrijednostima energija i iskoristivostima η za svaki pojedini uzorak te slike koje prikazuju usporedbu dijagrama dobivenih ispitivanjem i njihovih aproksimacija iz programske aplikacije Graph. Za usporedbu dodani su i dijagrami i vrijednosti četiri uzorka neojačanih aluminijskih pjena oznaka N1, N2, N3 i N4.

Tablica 3 – Vrijednosti apsorbirane energije realnog i idealnog materijala te iskoristivost svih uzoraka

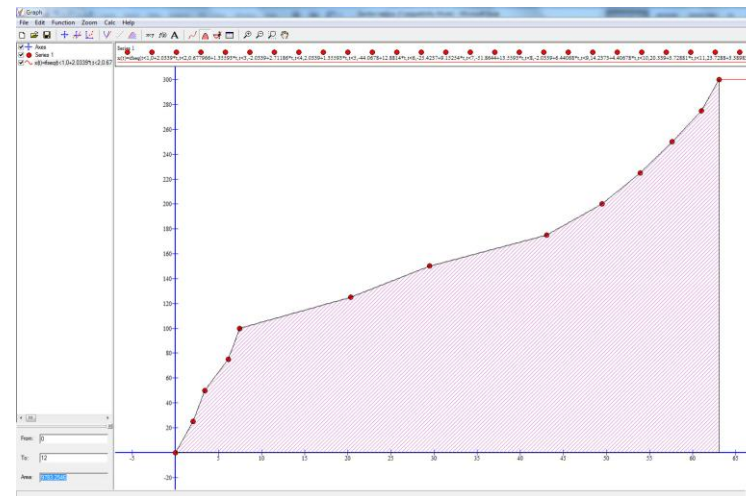
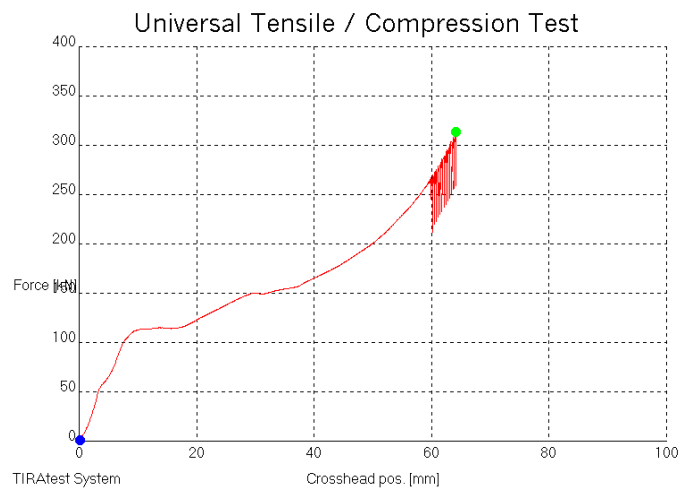
Uzorak	W [J]	W _{idealno} [J]	η [%]
H1	9.699,65	18.644,07	52,03%
H2	7.999,30	16.101,69	49,68%
H3	9.783,25	18.915,25	51,72%
H4	3.040,70	12.101,69	25,13%
H5	7.058,44	23.389,83	30,18%
O1	9.016,89	19.525,42	46,18%
O2	10.109,00	19.016,95	53,16%
O3	6.771,92	14.872,88	45,53%
III 1	9.785,91	20.135,59	48,60%
III 2	8.810,04	19.220,34	45,84%
III 3	8.765,08	19.627,12	44,66%
N1	8.870,14	16.775,00	52,88%
N2	9.198,60	17.400,00	52,87%
N3	8.381,30	15.950,00	52,55%
N4	8.435,25	16.500,00	51,12%



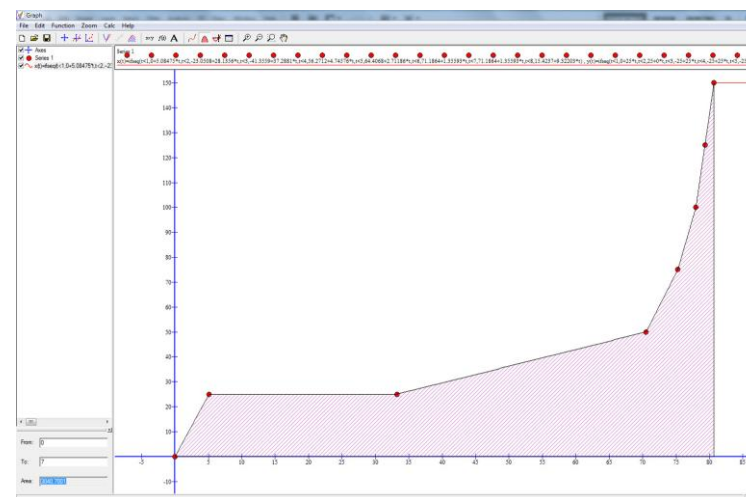
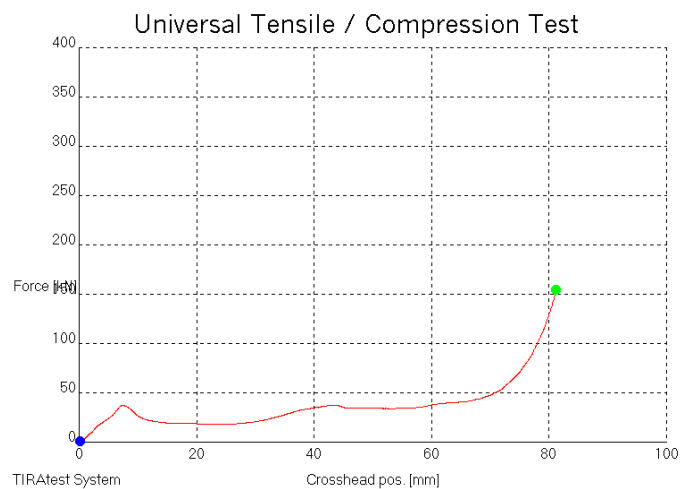
Slika 58 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H1



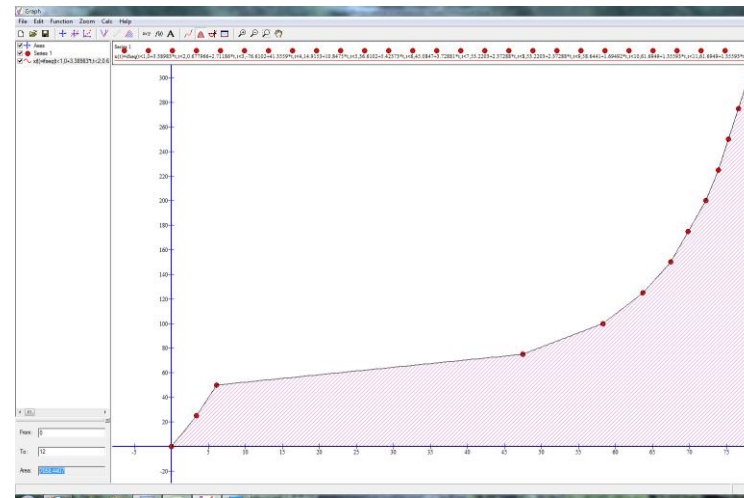
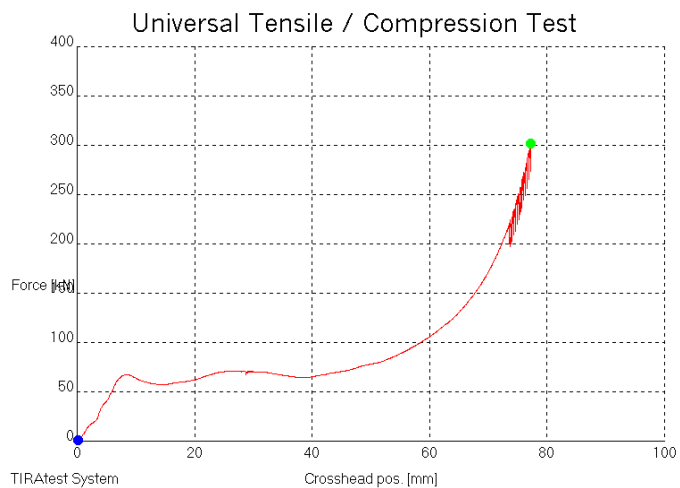
Slika 59 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H2



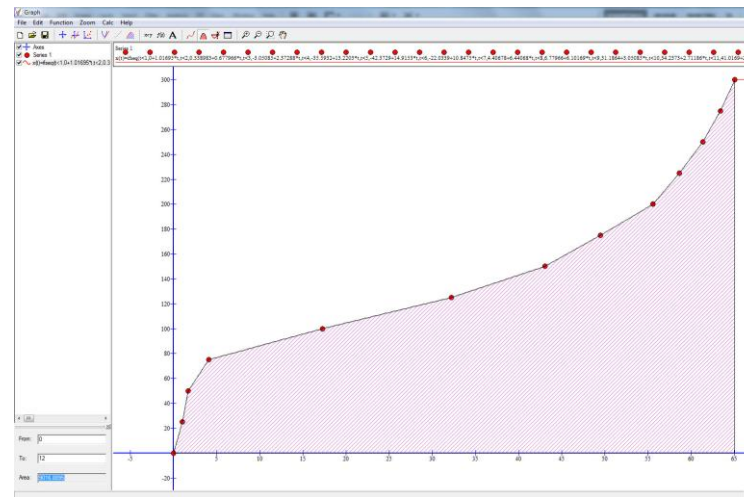
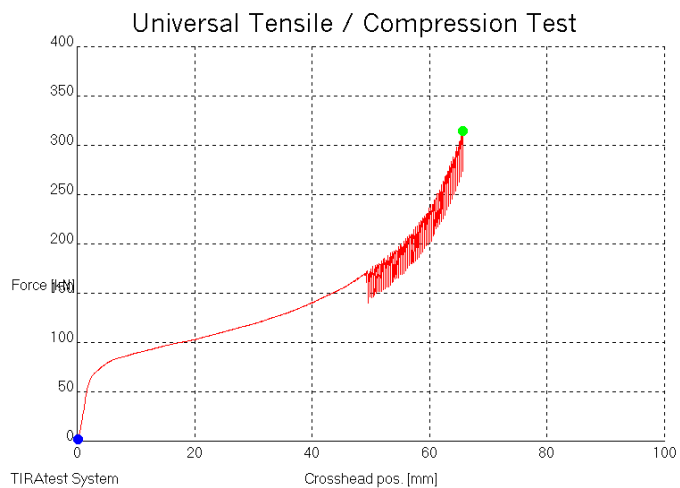
Slika 60 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H3



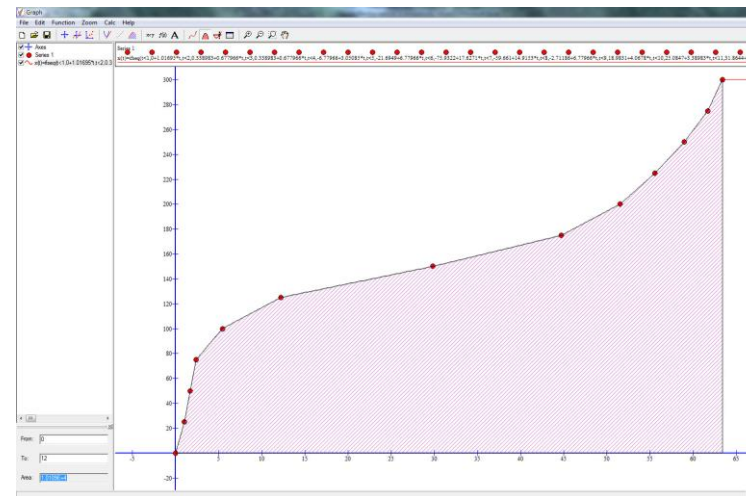
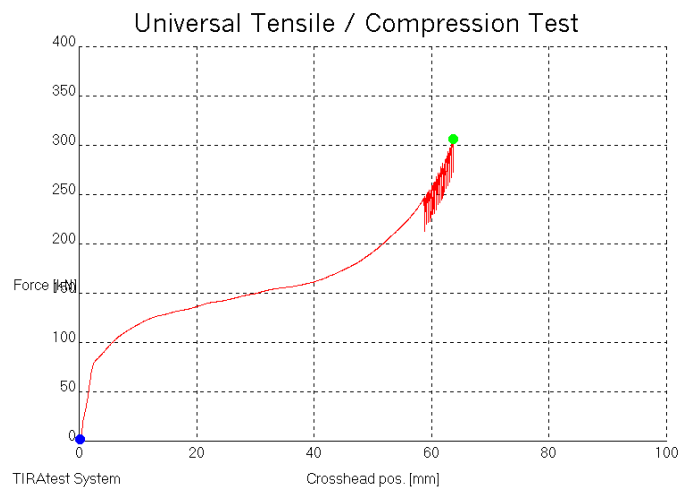
Slika 61 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H4



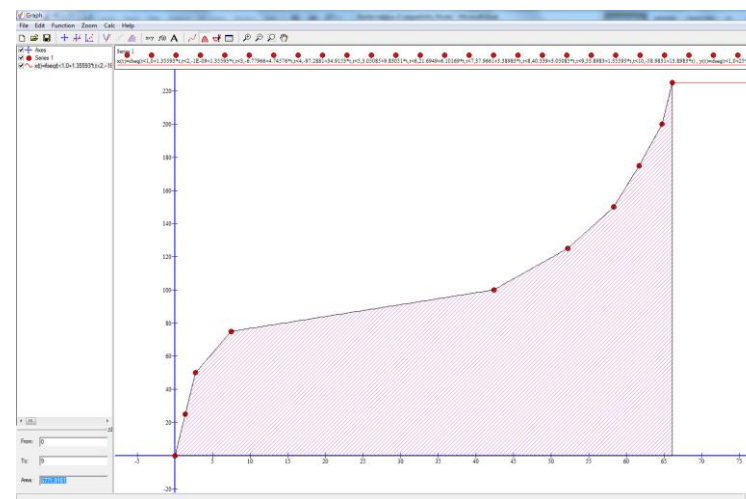
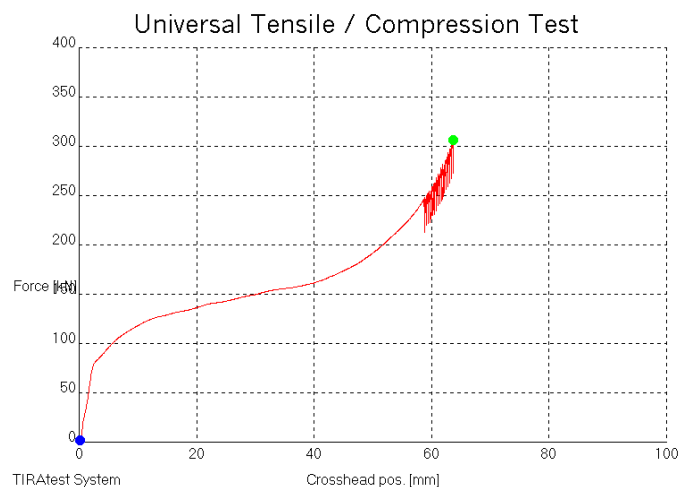
Slika 62 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka H5



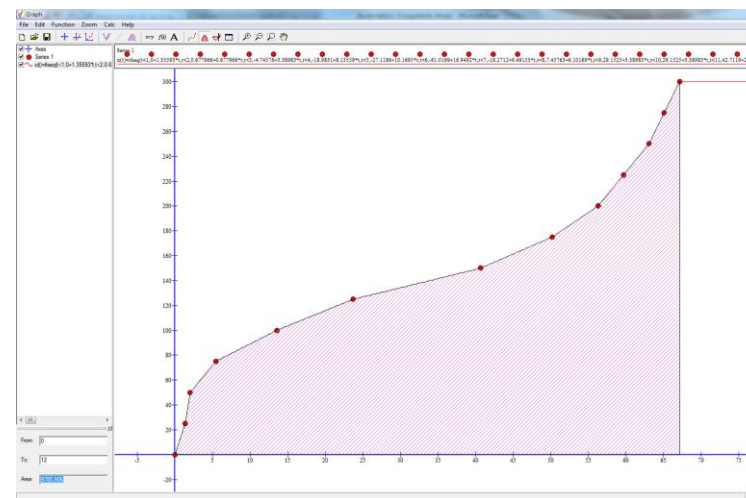
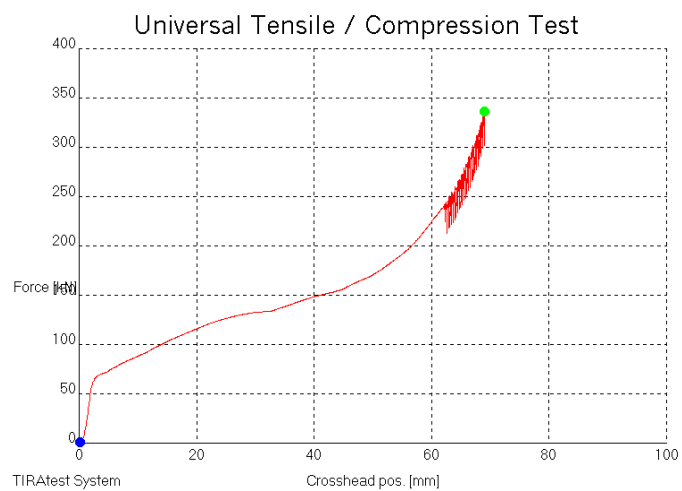
Slika 63 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka O1



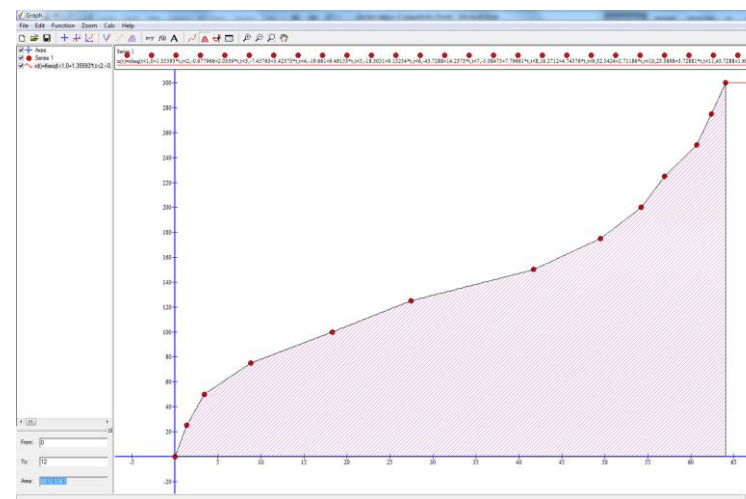
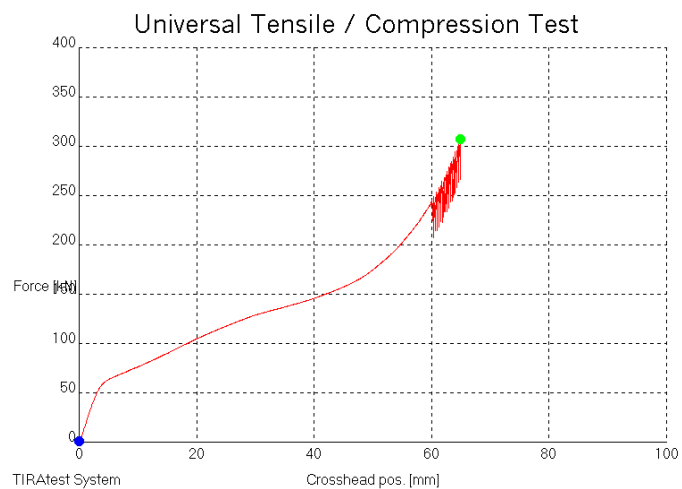
Slika 64 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka O2



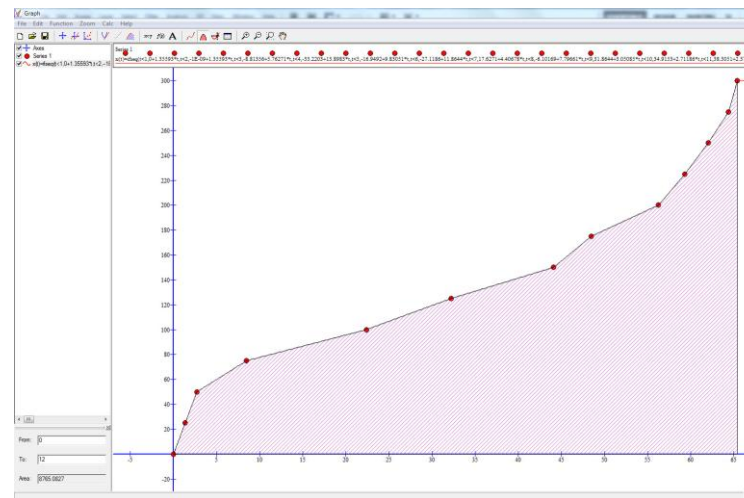
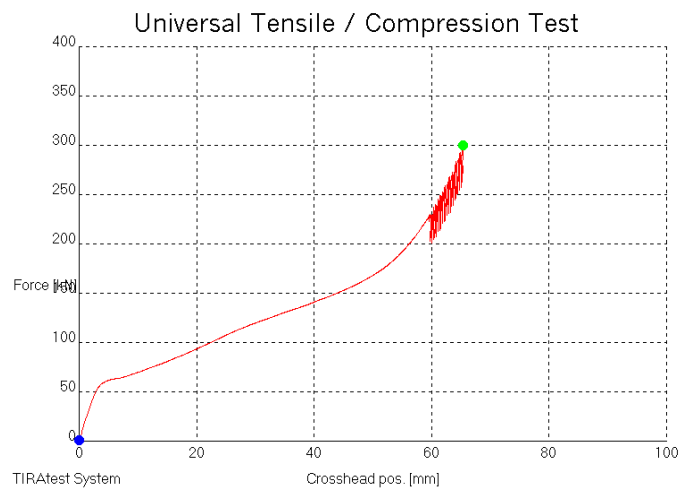
Slika 65 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka O3



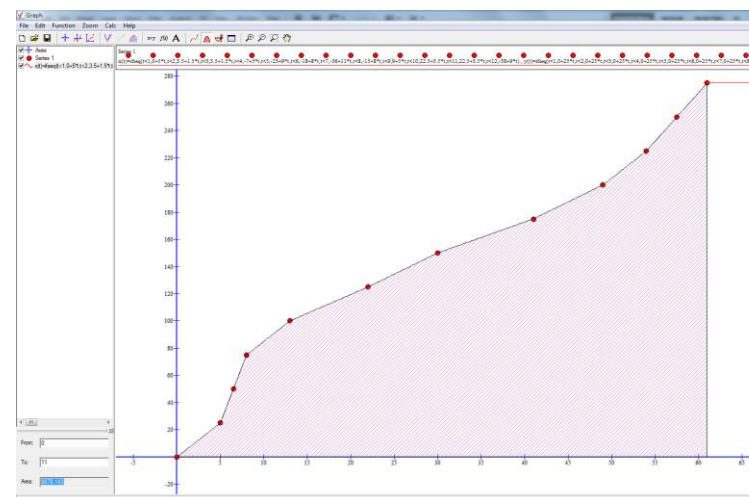
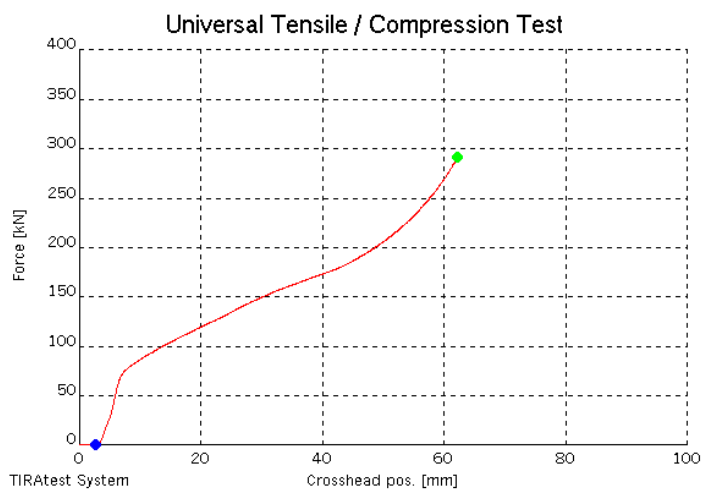
Slika 66 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka III 1



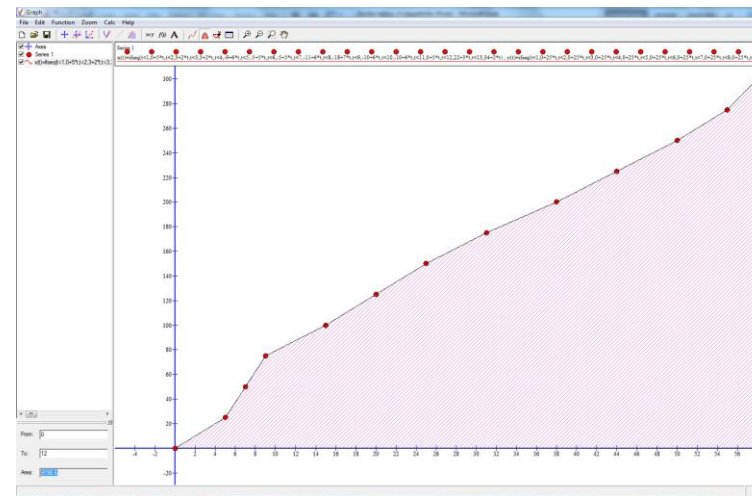
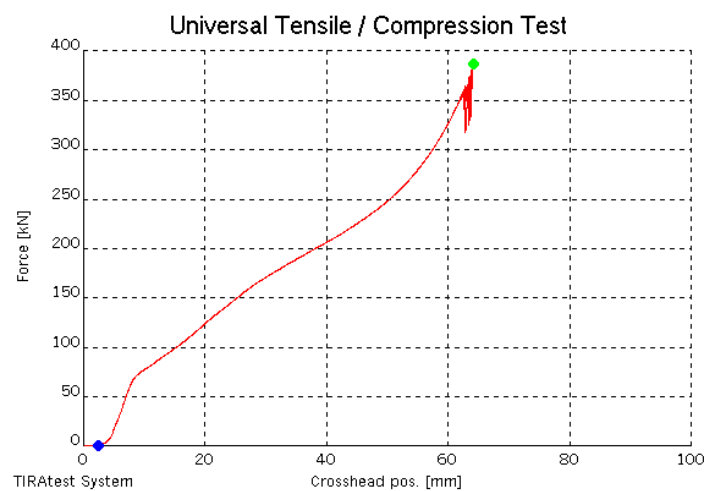
Slika 67 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka III 2



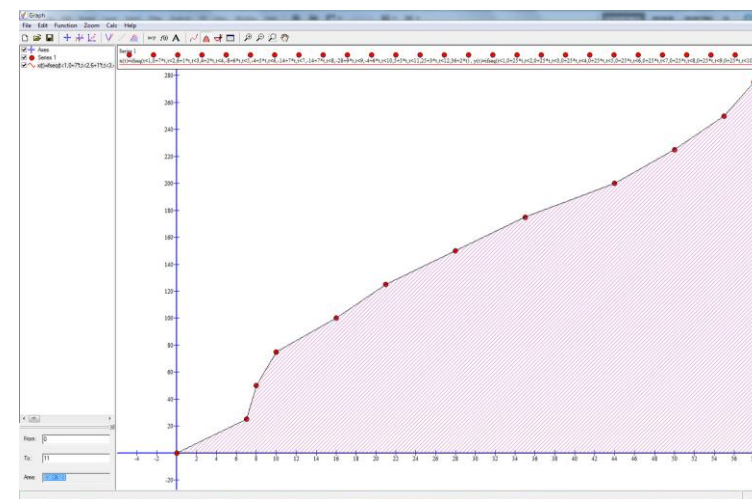
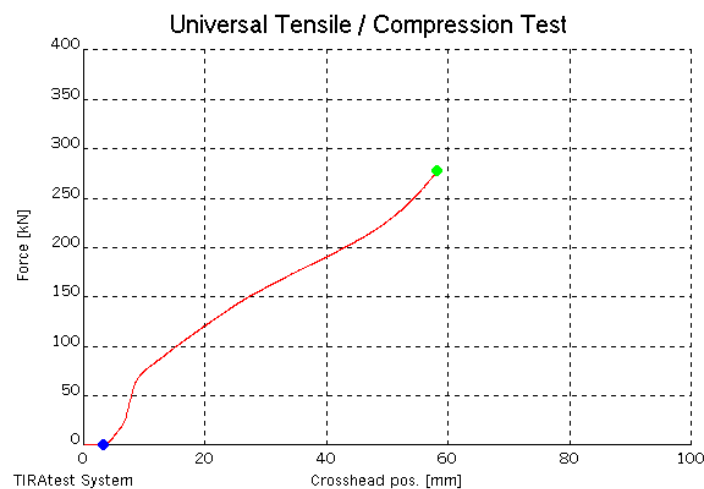
Slika 68 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka III 3



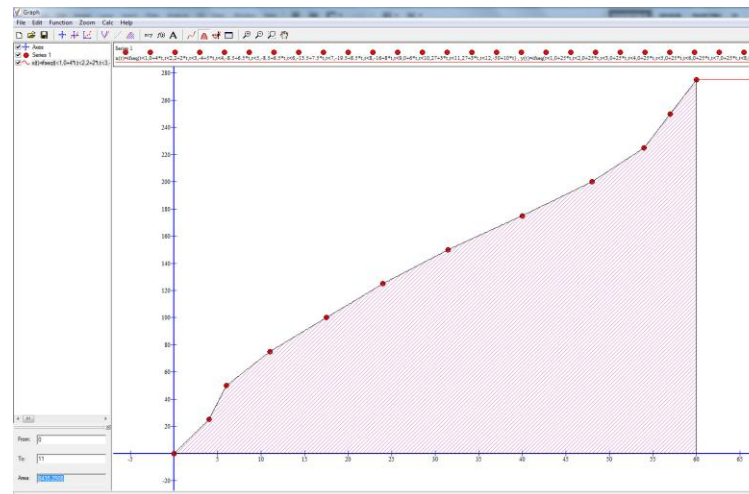
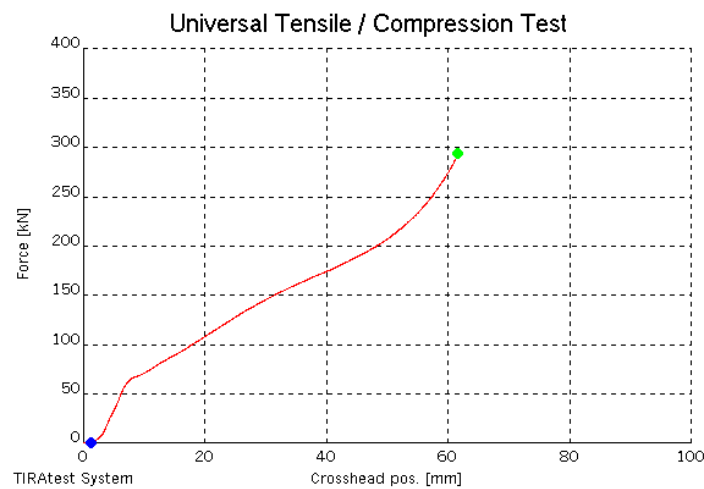
Slika 69 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N1



Slika 70 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N2



Slika 71 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N3



Slika 72 – Usporedba dijagrama tlačna sila – skraćenje i aproksimacije dijagrama u Graph aplikaciji uzorka N4

7. Zaključak

Aluminijske su pjene polako dio svakodnevne tehničke stvarnosti jer zahvaljujući dobrim svojstvima istiskuju pojedine uobičajene materijale. Ako bude dovoljno hrabrosti i inovativnosti taj bi se novi materijal mogao primjenjivati u svim strojarskim granama. Njihova se visoka cijena može opravdati niskom masom i velikim spektrom funkcionalnih osobina poput filtriranja ili apsorpcije energije udara. Neki su primjeri primjene navedeni u ovom radu, ideje ili prijedlozi, ali jasno pokazuju da metalne pjene općenito mogu biti neiscrpan izvor inspiracije svim inženjerima.

Nakon analize dijagrama i izračunavanja vrijednosti energija i iskoristivosti, dojam je da se umetanjem različitih ojačanja u kalupe ne postižu znatno bolja svojstva apsorbiranja energije. To se vjerojatno događa zbog toga što je teško formirati pjenu preko ojačanja što najjasnije dolazi do izražaja kod uzoraka H1, H2 i H3 gdje očigledno proces „pjenjenja“ nije uspio do kraja jer su se po obodu nazirali obrisi rubova nabreklih pločica prekursora ostavljajući dojam totalne nehomogenosti strukture.

Unatoč tomu, uz sličnu iskoristivost, vrijednost apsorbirane energije malo je rasla u odnosu na uzorke bez ojačanja. Produženjem toplinske obrade pri izradi H uzoraka (H4 i H5) na prvi se pogled činilo da je postignuta bolja ujednačenost, ali je zbog manje gustoće iskoristivost i količina apsorbirane energije značajno pala.

Slično se može zaključiti promatrajući i rezultate ispitivanja O uzoraka. Samo O2 uzorak pokazuje nešto veću vrijednost apsorbirane energije uz sličnu iskoristivost.

Uzorci s III ojačanjima imaju vrlo slične vrijednosti energija apsorpcije uzorcima bez ojačanja, ali s nešto manjom iskoristivosti.

Ako se provedeno ispitivanje promatra općenito, a ne pojedinačno, može se zaključiti da se ojačavanjem u najboljem slučaju može postići minimalni porast vrijednosti apsorbirane energije uz sličnu iskoristivost, ali i uz veliki rizik jer približno dvije trećine uzoraka s ojačanjima imaju slična ili lošija svojstva od neojačanih. Pri tom je važno istaknuti da apsorbirana energija nije jedini kriterij prema kojem se konačno odlučuje nego se mora uzeti u obzir i iznos sile pri kojem se aktivira proces apsorpcije.

Literatura

- [1] T. Filetin, I. Kramer, G. Marić: „Metalne pjene - proizvodnja, svojstva i primjena“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [2] Banhart J (2001). „Manufacture, Characterisation, and Applications of Cellular Metals and Metal Foams“, Progress in Materials Science 46: 559-632.
- [3] Magistarski rad: Denis Prusac, dipl.ing.: „Otpornost na trošenje keramičkih prevlaka na aluminijskim pjenama“, voditelj: prof. dr. sc. Vinko Ivušić, 2007
- [4] M. F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley: „Metal foams: A design guide“, Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000
- [5] „Medical device materials: proceedings from the Materials & Processes for Medical Devices Conference 2003“, 8-10 September 2003, Anaheim, California
- [6] <http://www.flickr.com/photos/core-materials/>, posjećena 17.02.2011.
- [7] <http://www.ifam.fraunhofer.de/>, posjećena 17.02.2011.
- [8] Simone, Anthony E.: „The tensile strength of porous copper made by the GASAR process“, Massachusetts Institute of Technology, 1994
- [9] <http://www.stylepark.com/>, posjećena 20.02.2011.
- [10] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9904/Carter/Carter-9904.Fig.1a.large.gif>, posjećena 24.02.2011.
- [11] Louis Philippe Lefebvre, John Banhart, David C. Dunand: MetFoam 2007: „Porous metals and metallic foams: Proceedings of the fifth International Conference on Porous Metals and Metallic Foams“, 5-7 September, 2007, Montreal, Canada
- [12] <http://www.chinabeihai.net/About.Asp?ID=15>, posjećena 04.03.2011.
- [13] <http://www.ergaerospace.com/products/projectgallery.htm>, posjećena 10.03.2011.
- [14] <http://articles.maritimepropulsion.com/?tag=/bioship>, posjećena 15.03.2011.
- [15] <http://www.tootoo.com/s-ps/aluminum-foam-insole-tinfoil-insole--p-1595907.html>, posjećena 16.03.2011.

- [16] http://i00.i.aliimg.com/photo/v1/330939560/fire_resistant_material_aluminum_foam_panel.jpg, posjećena 16.03.2011.
- [17] <http://www.audiocinema-art.hr/vijesti/finite-elemente-emperor/>, posjećena 20.03.2011.
- [18] <http://stari-nakovanj.forumcroatian.com/t166-drska-od-smole>, posjećena 20.03.2011.
- [19] <http://hrcak.srce.hr/file/13525>, posjećena 20.03.2011.
- [20] E. Amsterdam: „Structural performance and failure analysis of aluminium foams“, Groningen University Press, Groningen, 2008.