

Utjecaj toplinske obrade prekursora na apsorpciju energije aluminijskih pjena

Marić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:081454>

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

DIPLOMSKI RAD

Ivan Marić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Ivan Marić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Krešimiru Gilecu, dipl. ing. i asistentici Ivani Bunjan, mag. ing. met. na pruženoj pomoći i korisnim savjetima za izradu diplomskog rada. Također, zahvaljujem se i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na pomoći pri izradi uzoraka te zaposlenicima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava koji su omogućili tlačna ispitivanja.

Posebno se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su mi bili velika podrška tijekom studiranja.

Ivan Marić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN MARIĆ** Mat. br.: 0035207758

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj toplinske obrade prekursora na apsorpciju energije aluminijskih pjena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of precursors heat treatment on the energy absorption of aluminum foams**

Opis zadatka:

Najčešći način proizvodnje aluminijskih pjena je tehnologijom plinom oslobođenih čestica otopljenih u čvrstoj fazi gdje nastaje gusta površinska kora koja poboljšava mehanička svojstva i izgled pjene. Ta kora često sadrži nevidljive napukline i praznine koje mogu negativno utjecati na mehanička svojstva (i apsorpciju energije), a jedan od mogućih načina da se spriječi rast tih napuklina je toplinska obrada samih prekursora prije proizvodnje aluminijske pjene.

U ovom radu je potrebno:

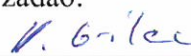
- 1) Objasniti svojstvo apsorpcije energije i opisati načine ispitivanja tog svojstva.
- 2) Navesti i opisati istraživanja u kojima se toplinski obrađivalo aluminijske prekursore.
- 3) Izraditi uzorke aluminijskih pjena sa i bez toplinske obrade prekursora.
- 4) Provesti tlačna ispitivanja uzoraka aluminijskih pjena.
- 5) Analizirati i usporediti apsorpcijska svojstva aluminijskih pjena sa i bez toplinske obrade prekursora.


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

Zadatak zadan:
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA	2
2.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi	2
3. APSORPCIJA ENERGIJE	3
3.1. Iskoristivost apsorpcije energije udara.....	4
3.2. Kvazi-statičko drobljenje aluminijske pjene	5
3.3. Dinamičko drobljenje aluminijske pjene	7
3.3.1. Ispitivanje pri većim brzinama udara	10
3.3.2. Ispitivanje pri nižim brzinama udara.....	14
3.4. Kvazi-statičko višeosno opterećenje aluminijske pjene.....	18
3.5. Dinamičko višeosno opterećenje aluminijske pjene	20
3.6. Apsorpcija energije aluminijske pjene gradirane gustoće.....	23
3.6.1. Voronoi model	23
3.6.2. Utjecaj relativne gustoće na apsorpciju energije gradirane pjene.....	25
3.6.3. Utjecaj brzine udara na apsorpciju energije gradirane pjene.....	26
3.6.4. Utjecaj trajanja opterećenja na apsorpciju energije gradirane pjene.....	27
3.6.5. Utjecaj debljine gradirane pjene na apsorpciju energije	29
3.7. Apsorpcija energije udara sendvič struktura s jezgrom od aluminijske pjene	29
3.7.1. Iskoristivost apsorpcije energije AFS-a	32
3.7.2. Utjecaj broja i rasporeda pinova u AFS strukturi	33
3.7.3. Utjecaj veličine pina.....	34
4. UTJECAJ TOPLINSKE OBRADNE PREKURSORA	35
4.1. Utjecaj TO prekursora na ekspanziju i konačnu ćelijastu strukturu Al pjene	35
4.1.1. Utjecaj na mikrostrukturu prekursora	36
4.1.1.1. Inicijalna poroznost	36
4.1.1.2. Stvaranje pukotina	36
4.1.1.3. Promjena teksture	37
4.1.2. Utjecaj na pjenavost	38
4.1.3. Utjecaj na ćelijastu strukturu	39
4.2. Optimizacija ćelijaste strukture toplinskom obradom prekursora i promjenom uvjeta hladenja na kraju procesa pjenjenja	40
4.2.1. Evaluacija stvaranja defekata u ranoj fazi pjenjenja	42
4.2.1.1. Unutarnja anizotropija mikrostrukture prekursora.....	42
4.2.1.2. Utjecaj toplinske obrade prekursora na ekspanziju i ćelijastu strukturu	43
4.2.2. Evaluacija stvaranja defekata tijekom faze skrućivanja.....	44

5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	46
5.1. Toplinska obrada prekursora	46
5.2. Izrada uzoraka aluminijske pjene	47
5.3. Statičko tlačno ispitivanje	51
5.4. Analiza dobijenih krivulja apsorpcije energije	53
5.4.1. Evaluacija rezultata	54
6. ZAKLJUČAK	66
LITERATURA.....	67
PRILOZI	69

POPIS SLIKA

Slika 1. Metalna pjena s otvorenim (a) i zatvorenim ćelijama (b)	1
Slika 2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi	2
Slika 3. Tipična krivulja apsorpcije energije pri tlačnom opterećenju Al pjene	3
Slika 4. Dijagram naprezanja i deformacije pri tlačnom opterećenju	4
Slika 5. Tipična krivulja iskoristivosti apsorpcije energije metalne pjene	5
Slika 6. Odgovor na kvazi-statičko opterećenje Al pjene.....	6
Slika 7. Eksperimentalna postavka za ispitivanje udara.....	7
Slika 8. Dva načina ispitivanja udara s obzirom na početni položaj uzorka pjene	9
Slika 9. Snimljeni dijagram naprezanja u vremenu za Al pjenu udarenu pri $v_i = 90$ m/s	10
Slika 10. Fotografski zapisi visokobrzinske kamere pri $v_i = 90$ m/s	10
Slika 11. Obradeni fotografski zapisi visokobrzinske kamere.....	11
Slika 12. Odnos između brzine ispaljene mase i brzine udarnog vala	12
Slika 13. Ovisnost deformacije zgušnjavanja o brzini udara	13
Slika 14. Ovisnost naprezanja o brzini tijekom udarnog opterećenja	13
Slika 15. Odnos između apsorbirane energije po jedinici volumena i brzine udara	14
Slika 16. Krivulje apsorpcije energije tijekom ispitivanja izravnog udara pri $v_i = 35$ m/s.....	15
Slika 17. Fotografski zapisi visokobrzinske kamere prilikom ispitivanja izravnog udara pri $v_i = 35$ m/s	16
Slika 18. Zone lokalne deformacije koje se javljaju pri brzini udara $v_i = 35$ m/s (b) te za njih pripadajući dijagram naprezanja u vremenu (a)	17
Slika 19. Komparacija zgušnjavanja Al pjene uslijed kvazi-statičkog opterećenja i udarnih opterećenja pri različitim v_i	18
Slika 20. Kvazi-statička ispitivanja Al pjene pod različitim kutovima opterećenja	18
Slika 21. Shematski prikaz kvazi-statičkog višeosnog opterećenja	19
Slika 22. Krivulje tlačna sila – pomak za različite kutove kvazi-statičkog opterećenja	20
Slika 23. Shema SHPB naprave	20
Slika 24. Prikaz cijelog SHPB sustava	21
Slika 25. SHPB naprave različitog kuta opterećenja uzorka pjene	22
Slika 26. Krivulje tlačna sila – pomak pri različitim kutovima dinamičkog opterećenja	23
Slika 27. Voronoi modeli s različitom veličinom pravilnosti	24
Slika 28. Voronoi model pjene gradirane gustoće	24
Slika 29. 3D Voronoi model pjene	25
Slika 30. Ponašanje pjene na udarenoj (a) i stacionarnoj strani (b) ovisno o rel. gustoći	25
Slika 31. Ponašanje gradirane pjene na udarenoj (a) i stacionarnoj strani (b) ovisno o brzini udara	26
Slika 32. Utjecaj brzine udara na iskoristivost apsorpcije energije.....	27
Slika 33. Utjecaj trajanja opterećenja na gustoću energije na udarenoj strani gradirane pjene	27
Slika 34. Utjecaj trajanja opterećenja na gustoću energije na stacionarnoj strani gradirane pjene	28
Slika 35. Utjecaj trajanja opterećenja na iskoristivost apsorpcije energije	28
Slika 36. Utjecaj debljine gradirane pjene na iskoristivost apsorpcije energije.....	29
Slika 37. Primjena AFS-a u automobilskoj industriji.....	29
Slika 38. Primjena AFS-a u industriji vlakova	30
Slika 39. Pomak AFS-a uslijed udarnog opterećenja ovisno o rel. gustoći jezgre.....	30
Slika 40. Krivulje apsorpcije energije AFS struktura s i bez pinova	31

Slika 41. Izvijanje pinova i cijepanje pjene AFS strukture.....	32
Slika 42. Krivulje iskoristivosti apsorpcije energije AFS strukture.....	33
Slika 43. Utjecaj rasporeda pinova na apsorpciju energije AFS-a.....	33
Slika 44. AFS s 1 pinom nakon djelovanja tlačnog opterećenja.....	34
Slika 45. Utjecaj veličine i materijala pinova na apsorpciju energije AFS-a.....	34
Slika 46. Poroznost inducirana u materijalu prekursora nakon TO.....	36
Slika 47. Pukotine nakon TO.....	36
Slika 48. Rezultati analize Bruker-ovim difraktometrom.....	37
Slika 49. Radioskopske slike (pogled na presjek) za dvije faze postupka pjenjenja.....	38
Slika 50. Presjeci pjena proizvedenih nakon različitih TO prekursora.....	39
Slika 51. Različite faze tijekom izrade Al pjene.....	40
Slika 52. Prekursor nakon ekspanzije u polukrutoj fazi (a) i anizotropija ćelija pjene (b).....	41
Slika 53. Orijentacija čestica silicija u mikrostrukтури prekursora na bazi AlSi10.....	42
Slika 54. Rana ekspanzija prekursora.....	42
Slika 55. Rana ekspanzija prekursora nakon TO.....	43
Slika 56. Ćelijaste strukture pjene generirane od toplinski neobrađenog (lijevo) i obrađenog prekursora (desno).....	43
Slika 57. Ovisnost povezanosti pora s poroznošću pjene.....	44
Slika 58. Unutarnja ćelijasta struktura pjena skrućivanih različitim brzinama.....	45
Slika 59. Prekursori.....	46
Slika 60. Prekursori u peći za toplinsku obradu.....	46
Slika 61. Prikaz toplinski obrađenih i neobrađenih prekursora.....	47
Slika 62. Toplinski neobrađeni prekursori u kalupu.....	48
Slika 63. Kalup u peći.....	48
Slika 64. Užareni kalup u peći (lijevo) i višak pjene na izvađenom kalupu (desno).....	49
Slika 65. Izrađeni uzorak aluminijske pjene.....	49
Slika 66. Univerzalna kidalica WPM EU 40 mod.	51
Slika 67. Program TIRAtest System povezan s kidalicom.....	51
Slika 68. Uzorci prije tlačenja.....	52
Slika 69. Tlačenje uzorka 1.....	52
Slika 70. Uzorci nakon tlačenja.....	52
Slika 71. Prikaz krivulje apsorpcije energije u programu TIRAtest System.....	53
Slika 72. Prikaz krivulje apsorpcije energije u programu Graph.....	53
Slika 73. Usporedni dijagram za sve krivulje apsorpcije energije.....	54
Slika 74. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 10$ mm).....	61
Slika 75. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 20$ mm).....	61
Slika 76. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 30$ mm).....	62
Slika 77. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 40$ mm).....	62
Slika 78. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($F = 10$ kN).....	63
Slika 79. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($F = 20$ kN).....	63
Slika 80. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($F = 30$ kN).....	64
Slika 81. Pojedinačni izgled uzoraka nakon tlačenja.....	64
Slika 82. Tlačenje uzorka 2 (lijevo) i uzorka 4 (desno).....	65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Utjecaj relativne gustoće pjene na apsorpciju energije	25
Tablica 2. Ispitni uzorci	50
Tablica 3. Uzorak 1 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje).....	55
Tablica 4. Uzorak 1 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)	55
Tablica 5. Uzorak 2 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje).....	56
Tablica 6. Uzorak 2 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)	56
Tablica 7. Uzorak 3 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje).....	57
Tablica 8. Uzorak 3 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)	57
Tablica 9. Uzorak 4 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje).....	58
Tablica 10. Uzorak 4 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje).....	58
Tablica 11. Uzorak 5 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje).....	59
Tablica 12. Uzorak 5 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje).....	59
Tablica 13. Uzorak 6 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje).....	60
Tablica 14. Uzorak 6 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje).....	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
A_0	-	kvadratno područje nukleacije ćelija u Voronoi modelu
$A_{\text{šipka}}$	mm ²	površina poprečnog presjeka šipke
A_{uzorak}	mm ²	površina poprečnog presjeka uzorka
C_0	m/s	brzina longitudinalnog vala
d	mm	promjer uzorka
d_0	-	udaljenost između susjednih točaka nukleacije
e	%	faktor iskoristivosti apsorpcije energije
E	N/mm ²	modul elastičnosti
E	J	apsorbirana energija
$E_{\text{šipka}}$	N/mm ²	modul elastičnosti šipke
E_V	J/m ³	apsorbirana energija po jedinici volumena
F	N	tlačna sila
F_{izlaz}	N	izlazna sila
F_r	N	horizontalna sila
F_{ulaz}	N	ulazna sila
F_v	N	vertikalna sila
l	mm	visina uzorka
Δl	mm	skraćenje
l_c	mm	duljina zdrobljenog dijela uzorka pjene
l_i	-	duljina stijenki ćelija u Voronoi modelu
l_i	mm	duljina netaknutog dijela uzorka pjene
l_0	mm	početna duljina uzorka pjene
L	-	duljina uzorka u Voronoi modelu
L	mm	duljina kubičnog uzorka pjene
m	g	masa uzorka
n	-	broj ćelija u Voronoi modelu
P	N/mm ²	srednji tlak
P	%	poroznost
R_e	N/mm ²	granica tečenja
R_{et}	N/mm ²	granica stlačivanja pjene
S	mm	pomak čeljusti
S_b	mm ²	površina poprečnog presjeka šipke SHPB uređaja
S_0	mm ²	početna površina poprečnog presjeka uzorka
S_s	mm ²	površina uzorka koja je u kontaktu s unutarnjim šipkama
t	ms	vrijeme
t_2	ms	vrijeme pri kojemu dolazi do deformacije zgušnjavanja

t_i	-	debljina stijenki ćelija u Voronoi modelu
v_i	m/s	brzina udara
v_m	m/s	brzina ispaljene mase
v_{uv}	m/s	brzina propagiranja udarnog vala
v_{izlaz}	m/s	izlazna brzina
v_{ulaz}	m/s	ulazna brzina
V	m ³	volumen uzorka
W_{izlaz}	MJ/m ³	gustoća izlazne energije
W_{ulaz}	MJ/m ³	gustoća ulazne energije
α	-	parametar pravilnosti
δ	-	min. dopuštena udaljenost između nukleacijskih točaka
ε	%	deformacija
ε_D	%	deformacija zgušnjavanja
$\varepsilon_{\text{šipka}}$	%	deformacija šipke
η	%	iskoristivost apsorpcije energije
θ	°	kut opterećenja
ρ	kg/m ³	gustoća uzorka aluminijske pjene
ρ^*	-	gustoća ćelijastog materijala u Voronoi modelu
ρ_r	%	relativna gustoća uzorka pjene
ρ_s	-	gustoća osnovnog materijala ćelija u Voronoi modelu
σ	N/mm ²	naprezanje
σ_1	N/mm ²	naprezanje prije djelovanja udarnog vala
σ_2	N/mm ²	naprezanje poslije djelovanja udarnog vala
σ_x	N/mm ²	normalno naprezanje
τ_{xy}	N/mm ²	smično naprezanje
ϕ	mm	promjer šipke

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AFS	<i>aluminium foam sandwich</i> – sendvič struktura s jezgom od aluminijske pjene
CA	<i>cellular anisotropy</i> – veličina anizotropije konačne ćelijaste strukture
DIC	<i>Digital image correlation</i> – korelacija digitalne slike
EA	<i>expansion anisotropy</i> – veličina anizotropije rane ekspanzije
EAI	<i>energy absorption improvement</i> – mjera za poboljšanje apsorpcije energije
SHPB	<i>Split – Hopkinson pressure bar</i> – naprava koja imitira udarno opterećenje
TO	toplinska obrada
μ CT	<i>computed microtomography</i> – računalna mikrotomografija

SAŽETAK

Zbog svoje porozne strukture, aluminijske pjene pokazuju mnoga povoljna svojstva što ih čini pogodnima za mnoge primjene. Cilj ovoga rada je objasniti svojstvo apsorpcije energije aluminijskih pjena i opisati načine njegovog ispitivanja. Kako bi se poboljšala kvaliteta ćelijaste strukture aluminijskih pjena proizvedenih putem metalurgije praha, primjenjuje se toplinska obrada prekursora. U konačnici, ona izaziva značajne promjene u mikrostrukturi pjene u smislu reduciranja stvaranja defekata. U ovom radu, bilo je potrebno istražiti utjecaj toplinske obrade na svojstvo apsorpcije energije.

Ključne riječi: aluminijske pjene, apsorpcija energije, toplinska obrada

SUMMARY

Aluminium foams show many favorable properties due to their porous structure, which makes them suitable for many applications. The aim of this paper is to explain the energy absorption property of aluminium foams and describe its test methods. In order to improve the cellular structure quality of aluminium foams, produced by the powder metallurgical route, the precursor heat treatment is applied. The precursor thermal treatment induces notable changes in the foam microstructure in terms of reducing defects generation. In this study, it was necessary to investigate its influence on the energy absorption property.

Key words: aluminium foams, energy absorption, heat treatment

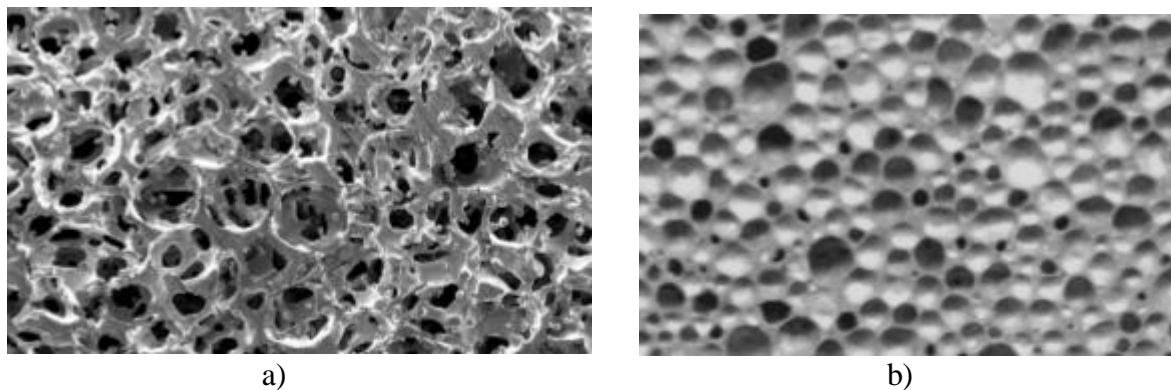
1. UVOD

Metalne pjene spadaju u novi oblik metalnih materijala koji ima širok raspon svojstava. Komercijalno su danas najčešće dostupne metalne pjene na bazi aluminija (Al) i nikla (Ni), ali proizvode se i pjene na bazi magnezija (Mg), olova (Pb), cinka (Zn), bakra (Cu), bronce, titana (Ti), čelika pa čak i zlata (Au). Svojstva metalnih pjena ovise o njihovoj strukturi, odnosno o tipu ćelija koje mogu biti otvorene ili zatvorene. Pjene sa zatvorenim ćelijama jako dobro apsorbiraju energiju udara, dok pjene s otvorenim ćelijama imaju dobra toplinska svojstva. Također, metalne pjene karakterizirane su veličinom, oblikom i stupnjem anizotropije ćelija, vrstom materijala te relativnom gustoćom ρ/ρ_s (omjer gustoće pjene i gustoće metala stijenki ćelija). [1]

Najznačajnija i industriji najzanimljivija svojstva su:

- iznimno mala masa
- velika specifična krutost
- vrlo dobra mogućnost apsorpcije energije udara i elektromagnetskih valova
- toplinsko-izolacijska svojstva
- vrlo dobro upijanje zvuka
- vatrootpornost
- recikličnost
- neotrovnost. [1]

Slika 1. prikazuje presjek metalne pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama.



Slika 1. Metalna pjena s otvorenim (a) i zatvorenim ćelijama (b) [2]

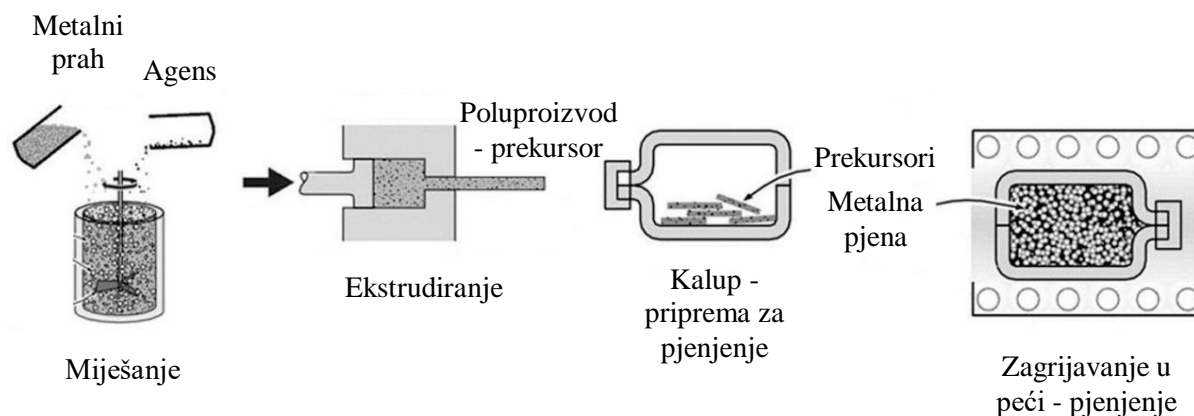
2. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH PJENA

Početne sirovine koje služe za proizvodnju metalnih pjena mogu biti u obliku taljevine ili praha. Važno je napomenuti da se samo upjenjavanje metala uvijek provodi iz tekuće faze, tako da se i prah dovodi u oblik taljevine povišenjem temperature. Izvor plina nužan je preduvjet za stvaranje šupljina unutar rastaljenog metala. On može biti vanjski ili se u taljevinu dodaje raspršujući agens (npr. TiH_2) koji pospješuje pjenjenje. Stvaranje pjene može biti trenutno ili odgođeno. U ovom poglavlju opisan je jedan od najčešćih postupaka proizvodnje aluminijskih pjena. [1]

2.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi

U prvoj fazi procesa odvija se miješanje praha čistog metala ili legure i dodatka koji je neizbježan za stvaranje pjene. Kao dodatak (agens) najzastupljeniji je TiH_2 . Tako nastala mješavina ekstrudiranjem se sabija u poluproizvod u obliku šipke ili pločice. Izrezani komadi poluproizvoda stavljaju se u kalup gdje se zagrijavaju na temperaturu nešto višu od solidus temperature legure. Agens se raspada na Ti i plinoviti H_2 koji uzrokuje stvaranje visoko poroznog materijala. Budući da se TiH_2 raspada na temperaturi od $465^\circ C$ koja je puno niža od tališta aluminijske legure ($660^\circ C$), upjenjavanje se odvija u polučvrstoj fazi. Nastala metalna pjena zatvorenih ćelija, promjera 1 – 5 mm, ima oblik kalupa te relativnu gustoću $\rho/\rho_s \geq 0,08$. [1]

Na slici 2. nalazi se shema procesa proizvodnje aluminijske pjene metodom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi.

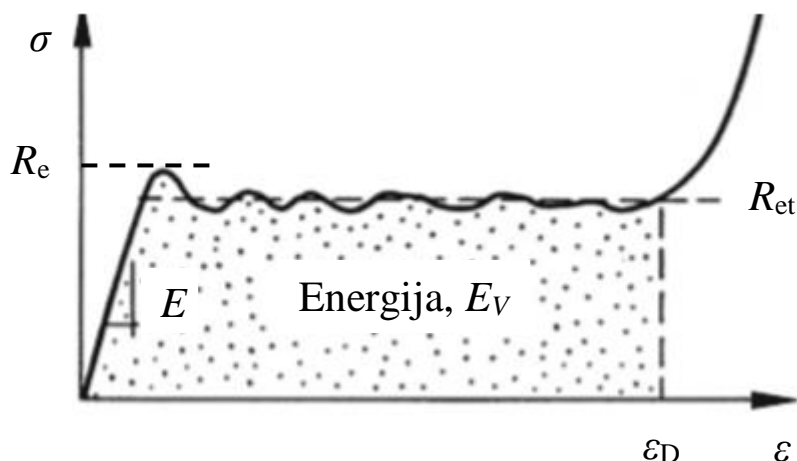


Slika 2. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi [3]

3. APSORPCIJA ENERGIJE

Materijali koji dobro apsorbiraju energiju trebaju pokazivati veliku deformaciju pri relativno malim vrijednostima konstantnog naprežanja. Zbog svojeg ponašanja pri tlačnom opterećenju, metalne pjene prikladne su za slučajeve kada je, radi sigurnosti, nužna dobra apsorpcija energije. Upravo se to svojstvo pokazalo kao jedno od najtraženijih uporabnih svojstava metalnih pjena, zbog kojega su našle primjenu u industriji transportnih sredstava. Koriste se u izradi dijelova vozila koji u eksploataciji mogu biti izloženi udarnim opterećenjima, poput branika automobila i nosača motora. Također, svojstvo apsorpcije energije važno je u industriji pakirne ambalaže koja je prilikom transporta potencijalno izložena raznim udarima. U odnosu na druge materijale, prednosti metalnih pjena, u ovoj primjeni, su njihova relativno niska gustoća, izuzetno povoljna granica stlačivanja (R_{et}), otpornost na visoke temperature i nezapaljivost. [4]

Za apsorpciju energije, važno je da spomenuta granica stlačivanja (R_{et}) bude tek nešto manja od naprežanja pri kojem dolazi do potpunog uništenja materijala. Ono se događa pri kritičnoj deformaciji zgušnjavanja (ε_D). Na slici 3. nalazi se tipična krivulja apsorpcije energije koja je karakteristična za tlačna opterećenja aluminijskih pjena. [5]



Slika 3. Tipična krivulja apsorpcije energije pri tlačnom opterećenju Al pjene [5]

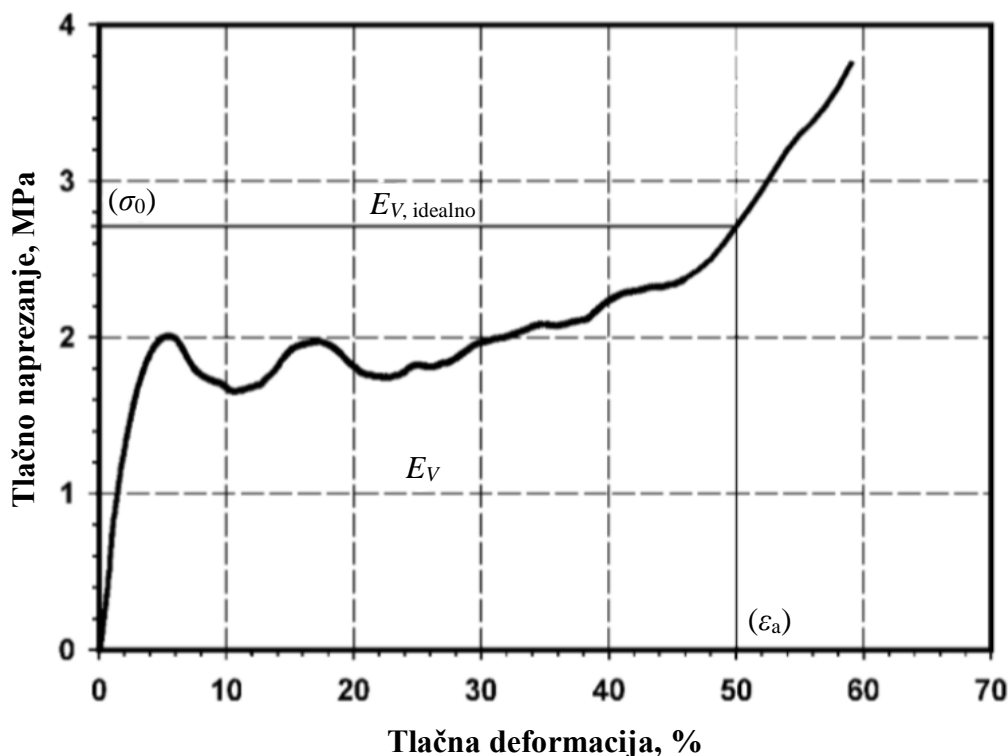
Označeno područje, odnosno površina ispod krivulje u prikazanom dijagramu, predstavlja apsorbiranu energiju po jedinici po volumena (E_V) koja se može prikazati sljedećom relacijom:

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

gdje je: σ – naprežanje, a ε – deformacija. [5]

3.1. Iskoristivost apsorpcije energije udara

Slika 4. daje prikaz dijagrama tlačnog naprežanja i deformacije u kojem se nalazi krivulja apsorpcije energije udara ispitivanog materijala te pravac koji predstavlja idealnu apsorpciju.



Slika 4. Dijagram naprežanja i deformacije pri tlačnom opterećenju [4]

Apsorbirana energija po jedinici volumena (E_V), u određenom intervalu deformacije, jednaka je području ispod krivulje u „ $\sigma - \varepsilon$ “ dijagramu i izražava se kao:

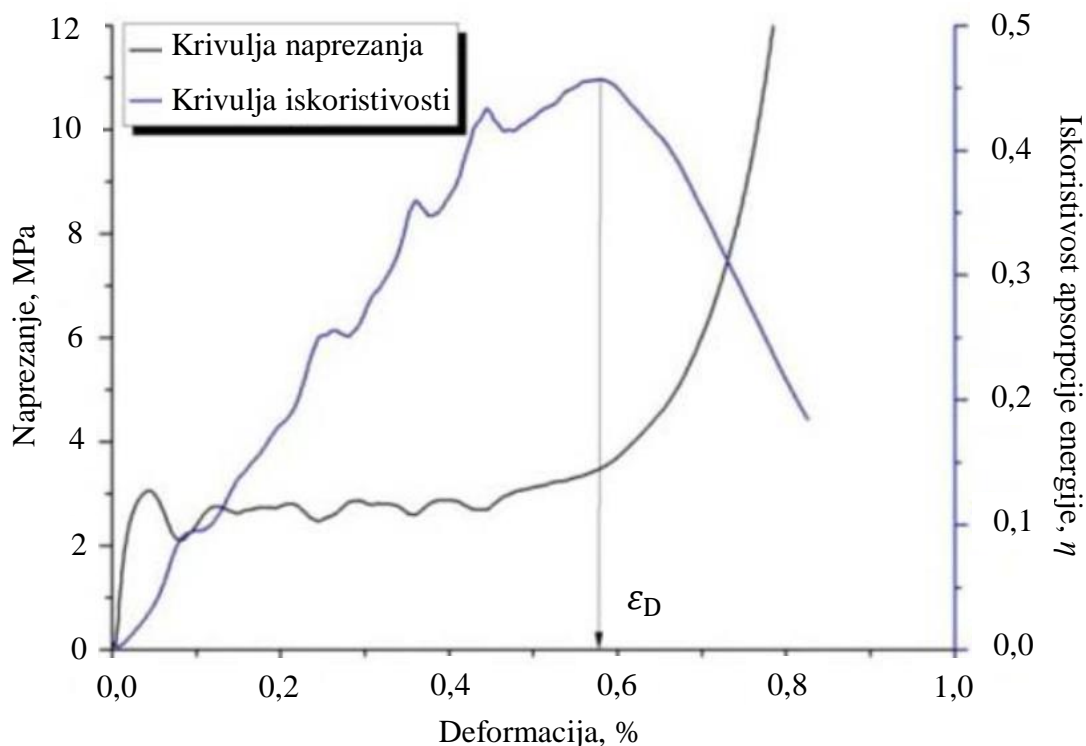
$$E_V = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

Učinkovitost, odnosno iskoristivost apsorpcije energije metalne pjene može se dobiti iz omjera njezine apsorbirane energije i apsorbirane energije idealnog apsorpcijskog materijala, što se može vidjeti u sljedećem izrazu.

$$\eta = \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_0 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (3)$$

Većina ćelijastih metala ima veliko područje deformacije pri približno konstantnom naprežanju u „ $\sigma - \varepsilon$ “ dijagramu te stoga i visoku učinkovitost apsorbiranja energije. [4]

Tipična krivulja iskoristivosti apsorpcije energije metalne pjene može se vidjeti na slici 5. Može se uočiti da se iskoristivost apsorpcije energije povećava s deformacijom do određene vrijednosti deformacije zgušnjavanja, ε_D , a nakon toga se smanjuje. [6]



Slika 5. Tipična krivulja iskoristivosti apsorpcije energije metalne pjene [6]

Deformacija zgušnjavanja, ε_D je vrijednost deformacije koja odgovara stacionarnoj točki na krivulji iskoristivosti, gdje je iskoristivost globalni maksimum. [6]

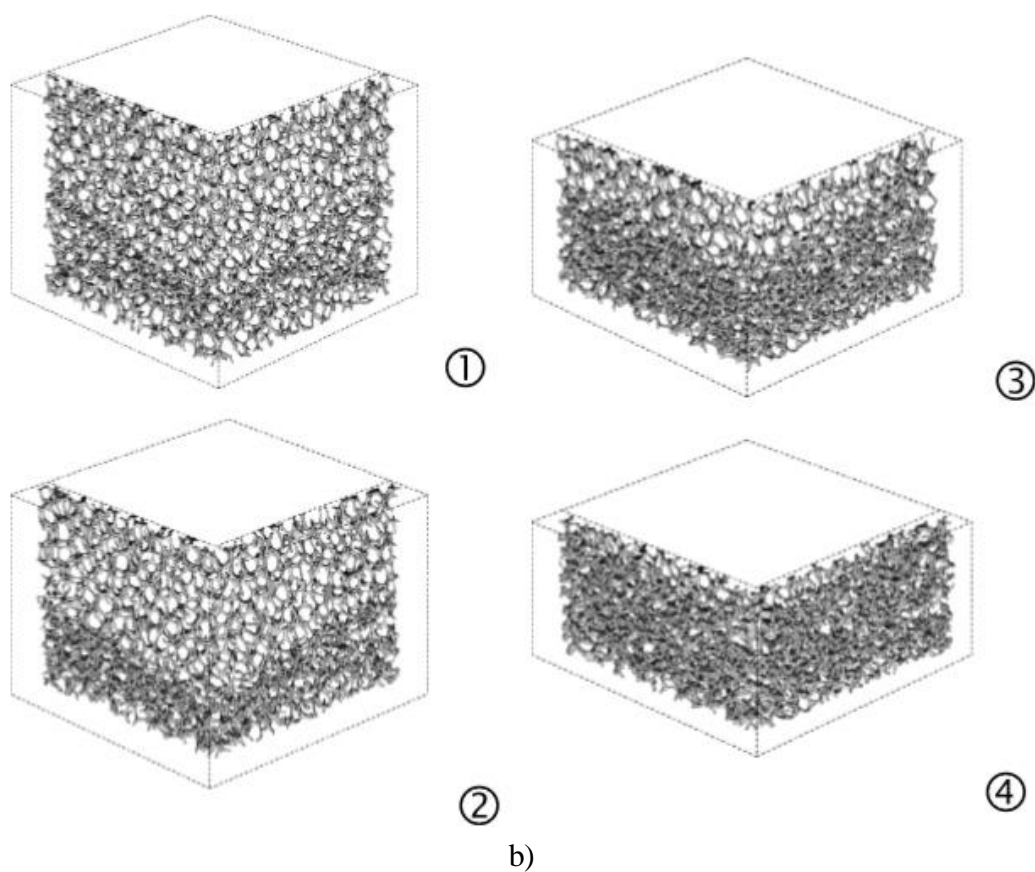
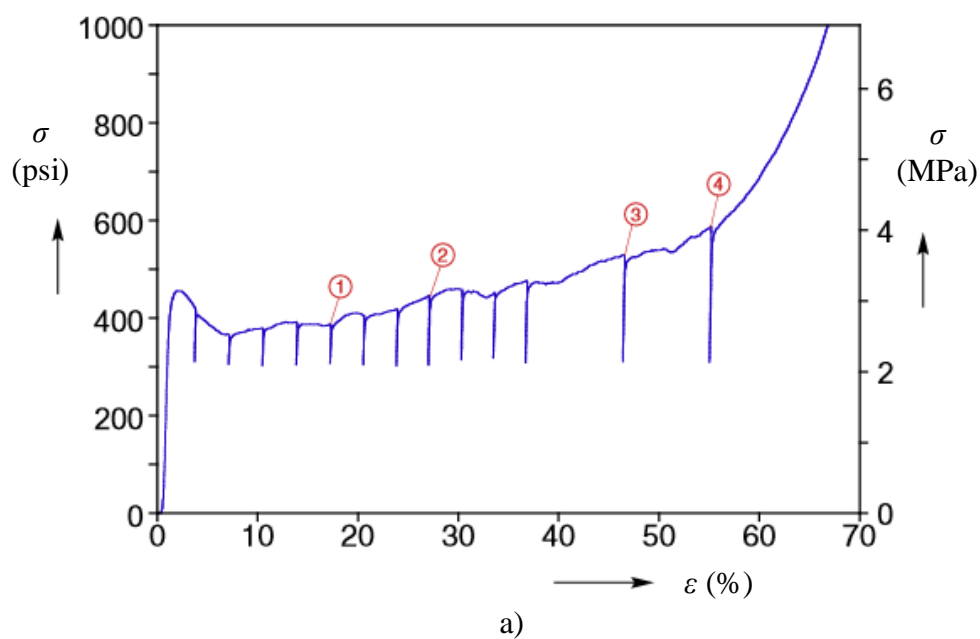
$$\frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} = 0 \quad (4)$$

3.2. Kvazi-statičko drobljenje aluminijske pjene

Odgovor Al pjene na kvazi-statičko opterećenje nalazi se u dijagramu na slici 6a. Rezultat je krivulja apsorpcije energije s početnim linerano elastičnim režimom koji završava s lokalnim maksimumom naprezanja. On simbolizira granicu tečenja pri kojoj dolazi do početka lokaliziranog izvijanja i kolapsa ćelija. Nakon toga slijedi približno konstantno naprezanje (granica stlačivanja) koje se proteže do prosječne deformacije od oko 55 %. Do tada se deformacija pjene odvija nehomogeno, a nakon toga dolazi do režima zgušnjavanja. [7]

Lokalne deformacije javljaju se na najslabijim mjestima u pjeni gdje su prisutne stijenke ćelija manje čvrstoće. Lokalizacija urušavanja ćelija organizira se u jedan ili više nepravilnih pojaseva. Uz kontinuirano komprimiranje, pojasevi drobljenja šire se destabilizacijom susjednih ćelija. Numerirane pozicije krivulje u dijagramu odgovaraju snimkama rendgenske

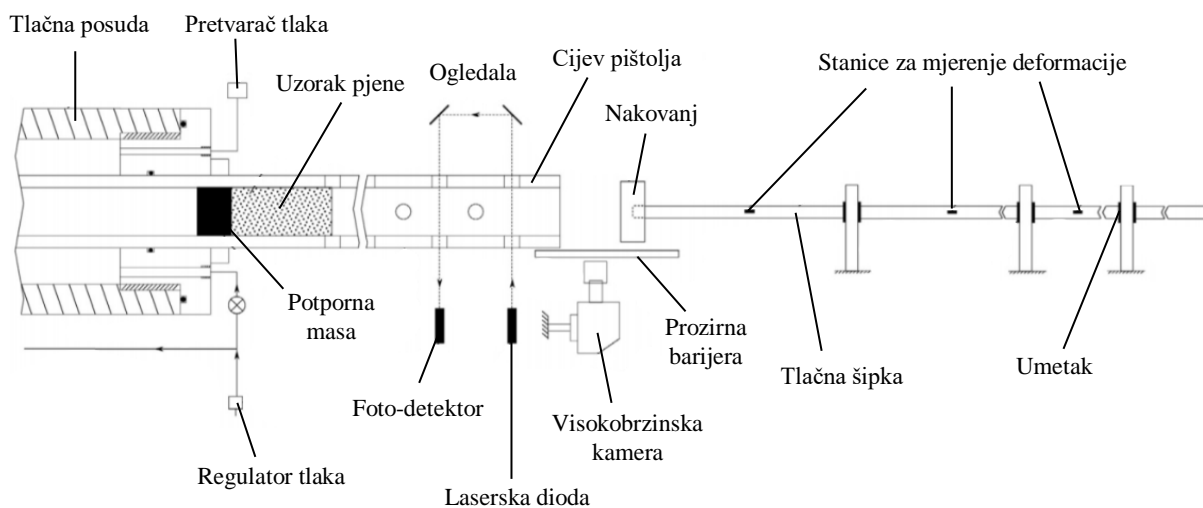
tomografije (slika 6b.). Na snimkama 1, 2 i 3 vidi se formiranje i širenje pojaseva deformacije, a na snimci 4 slijedi jednolično stanje deformacije – režim zgušnjavanja. [7]



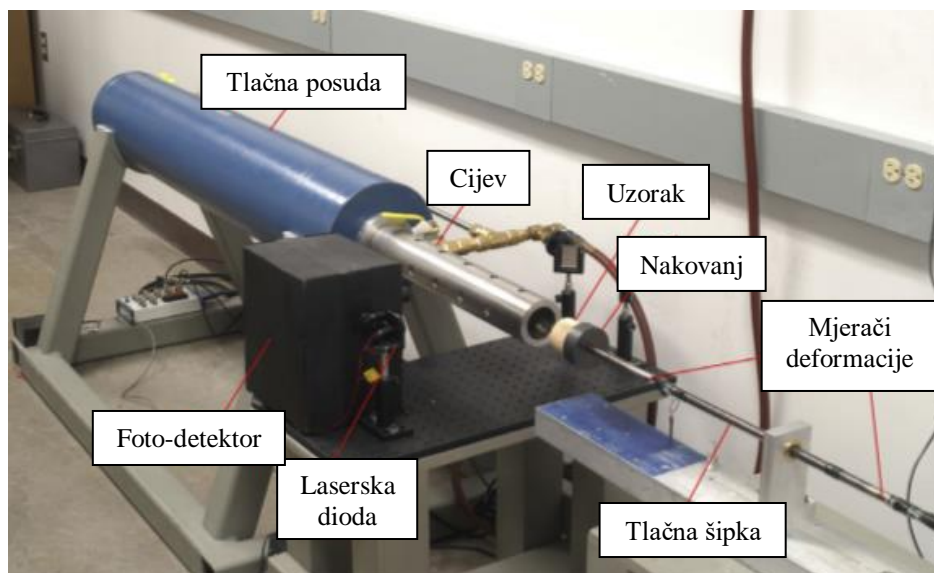
Slika 6. Odgovor na kvazi-statičko opterećenje Al pjene:
a) Krivulja apsorpcije energije b) 3D prikaz deformacije pjene [7]

3.3. Dinamičko drobljenje aluminijske pjene

Za ispitivanje apsorpcije energije udara aluminijske pjene često se koristi eksperimentalna postavka na slici 7. Radi se o tzv. plinskom pištolju koji ispaljuje masu prema stacionarnom uzorku pjene pričvršćenom na nakovnju tlačne šipke. Također, naprava funkcionira i na način da se potporna masa zajedno s uzorkom ubrzava i udara o tlačnu šipku, tj. o njezin nakovanj. Dakle, postoje dvije varijante kojima se ovim uređajem ispituje ponašanje aluminijske pjene pri udarnom opterećenju. [7]



a)



b)

Slika 7. Eksperimentalna postavka za ispitivanje udara prikazana:
a) shematski i b) fotografijom [7]

Uređaj radi na komprimirani zrak koji je pohranjen u tlačnoj posudi. Maksimalni radni tlak je 27,6 bara. Pri tom tlaku, masa od 250 g može biti ubrzana do 250 m/s. Plinski pištolj ima cijev od nehrđajućeg čelika dužine 1500 mm. Unutarnji promjer cijevi je 51,2 mm. Naprezanje u udarenom uzorku praćeno je koristeći tlačnu šipku promjera 12,9 mm i dužine 2440 mm, opremljenu s tri mjerne stanice za deformaciju. Nakovanj na lijevom kraju šipke dužine je 25,2 mm i promjera 63,2 mm. Nadalje, naprezanje u uzorku pjene računa se preko sljedećeg izraza:

$$\sigma = \left(\frac{A_{\text{šipka}}}{A_{\text{uzorak}}} \right) E_{\text{šipka}} \varepsilon_{\text{šipka}} \quad (5)$$

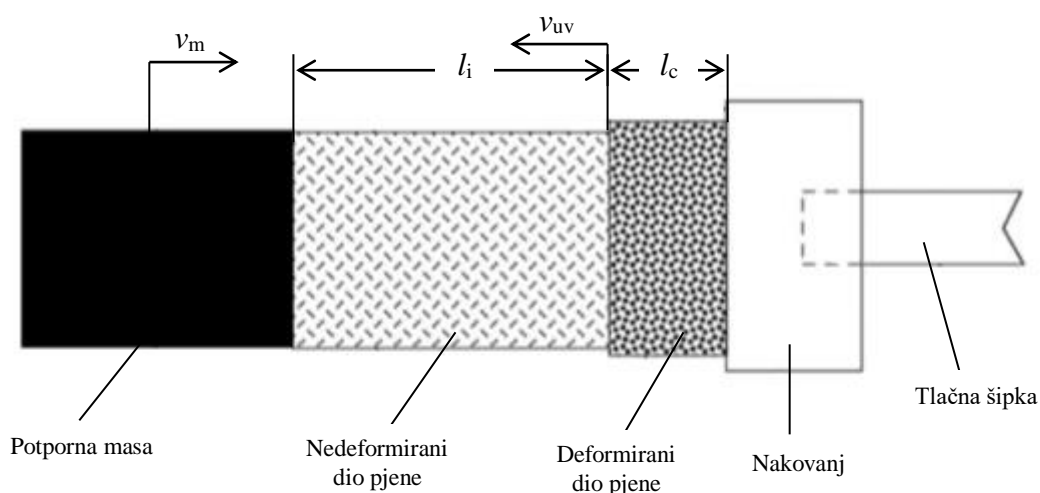
gdje su $A_{\text{šipka}}$ i A_{uzorak} površine poprečnog presjeka šipke i uzorka, $E_{\text{šipka}}$ modul elastičnosti tlačne šipke te $\varepsilon_{\text{šipka}}$ deformacija, odnosno pomak šipke. Uzorci pjene koji se koriste za ispitivanje u ovom uređaju, obično su relativno dugi. [7]

Rupe izbušene na izlazu iz cijevi pištolja koriste se za prolazak laserske zrake. Zraka se reflektira preko ogledala te se vraća kroz drugu postavku rupa do foto-detektora. Projektil prekida lasersku zraku na dva mjesta te se time omogućuje izračun njegove izlazne brzine. To je u biti stvarna brzina pri udaru izmjerena iz visokobrzinskih video zapisa. Projektil je u ovom slučaju ispaljena masa. [7]

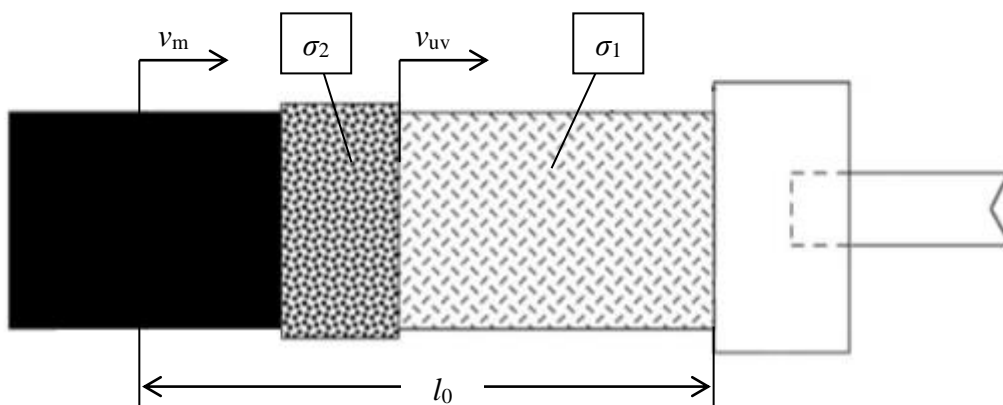
Deformacija uzorka prati se digitalnom kamerom koja je u stanju napraviti 40 000 sličica u sekundi, u rezoluciji 512x256 piksela. Ove postavke omogućuju snimanje fotografija u vremenskom periodu od 1,9 s, a one se pohranjuju u memoriju pomoću određenog softvera. Snimljene fotografije i signali mjernih stanica za deformaciju sinhronizirani su odabirom relevantnog događaja kao nultog vremena (npr. prvi kontakt uzorka pjene s nakovnjem). [7]

Uzorci pjene ispituju se pri brzinama udara u rasponu od 20 do 160 m/s. Cilindrični projektili imaju promjer koji odgovara unutarnjem promjeru cijevi, tj. 51 mm. Izrađeni su od polikarbonata za ispitivanje velikim brzinama ili od bakra za ispitivanje pri malim brzinama udara. [7]

Na slici 8. prikazane su dvije spomenute varijante ispitivanja udara koje se mogu izvesti na opisanoj napravi. Slika 8a. daje prikaz slučaja kada je uzorak pjene, zajedno s potpornom masom, ispaljen iz cijevi pištolja prema nakovnju tlačne šipke. To se može karakterizirati kao izravno ispitivanje udara. Slika 8b. označava situaciju kada je pjena, koja se nalazi na nakovnju, pogođena ispaljenom masom. Pošto u ovom slučaju uzorak miruje, to se može nazvati stacionarnim ispitivanjem udara. [7]



a)



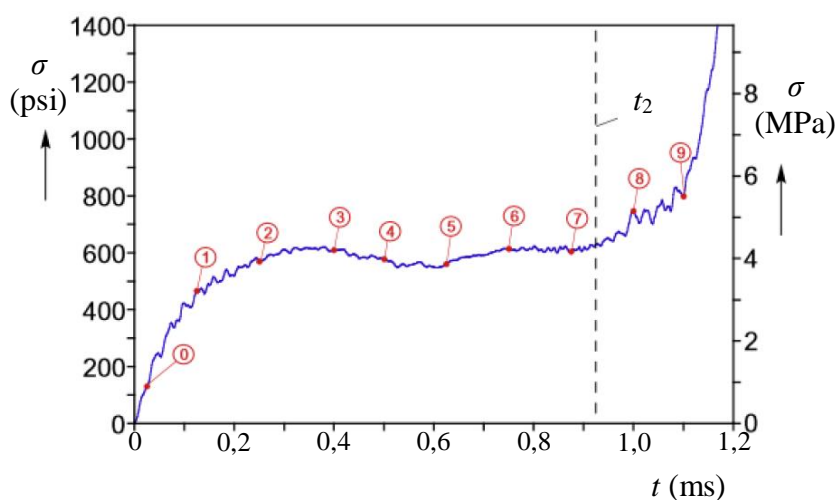
b)

Slika 8. Dva načina ispitivanja udara s obzirom na početni položaj uzorka pjene:
a) izravno b) stacionarno [7]

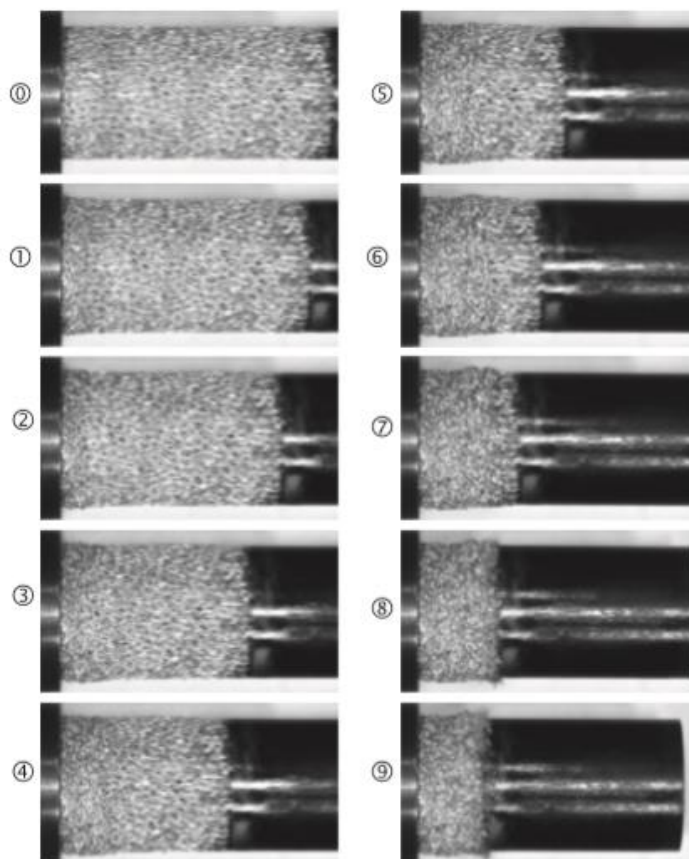
Oznake v_m i v_{uv} s gornje slike predstavljaju brzinu ispaljene mase i brzinu propagiranja udarnog vala. Simboli l_0 , l_c i l_i redom označavaju početnu duljinu uzorka pjene te duljine zdrobljenog i gotovo netaknutog dijela u djelomično zdrobljenoj konfiguraciji. σ_1 ukazuje na naprezanje prije udarnog vala u trenutno nedeformiranom dijelu pjene, a σ_2 na naprezanje prisutno u zbijenom dijelu, gdje udarni val trenutno propagira uništavajući stijenke ćelija. [7]

3.3.1. Ispitivanje pri većim brzinama udara

Za ova ispitivanja, veće brzine udara smatraju se one čiji je iznos veći od 60 m/s. U tom slučaju razvijaju se udarni valovi koji propagiraju kroz uzorak ispitivane aluminijske pjene. Ponašanje Al pjene koja je udarena brzinom od 90 m/s može se promatrati kroz dijagram napreznja u vremenu (slika 9.). Numerirani kružići na krivulji odgovaraju fotografskim zapisima visokobrzinske kamere prema kojima se prati tijek deformacije (slika 10.). [7]



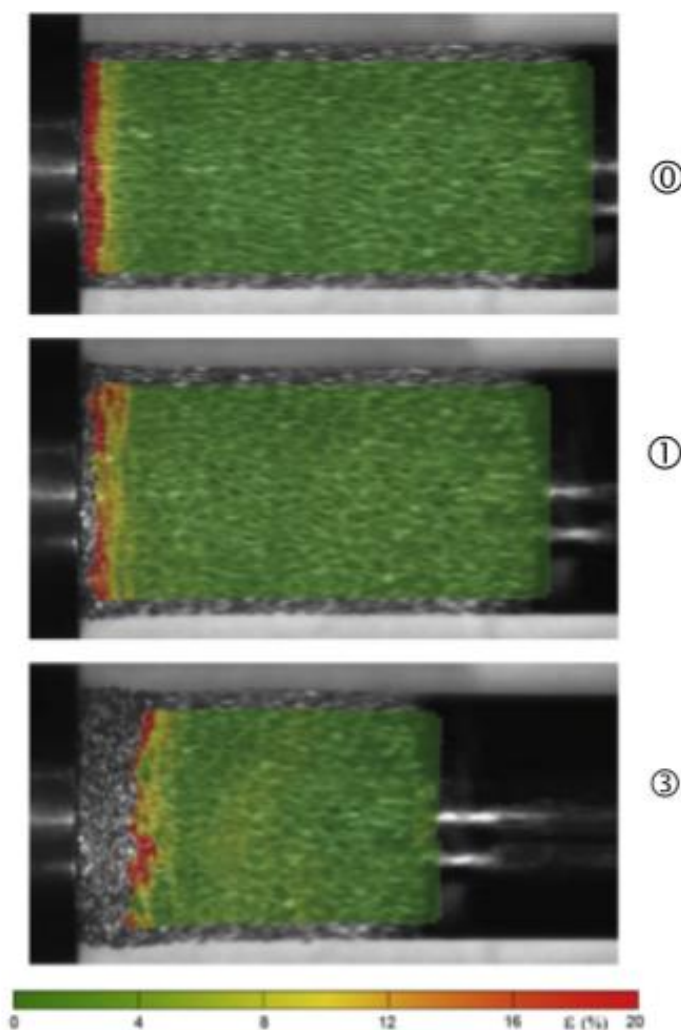
Slika 9. Snimljeni dijagram napreznja u vremenu za Al pjenu udarenu pri $v_i = 90$ m/s [7]



Slika 10. Fotografski zapisi visokobrzinske kamere pri $v_i = 90$ m/s [7]

Na dotičnim slikama riječ je o izravnom ispitivanju udara gdje je stacionarni nakovanj s lijeve, a putujuća potporna masa s desne strane. Pozicija 0 označava uspostavljanje kontakta između pjene i nakovnja. Na njihovom sučelju razvija se oštro definiran zbijen prednji dio koji, sudeći po narednim pozicijama, napreduje prema dolaznoj potpornoj masi. Pozicija 5 ukazuje na skromni gubitak aksijalne simetrije koji se odnosi na lijevu, zgusnutu stranu uzorka pjene. Asimetrija postaje izraženija na sljedećoj poziciji gdje se formira mali nagib. Razlog tomu mogu biti nesavršenosti u geometriji lokalnih ćelija, lokalna zona veće gustoće ili anizotropija. Unatoč tomu, između pozicije 2 i 7, zabilježeno naprezanje ostaje relativno nepromjenjeno što ukazuje na gotovo ustaljenu evoluciju opisanih događaja. Pri vremenu t_2 , prednji dio dostigao je potpornu masu, a zabilježeno naprezanje znatno raste. Nakon toga, već zdrobljena pjena podvrgava se daljnjem sabijanju što se može vidjeti na poziciji 8 i 9. [7]

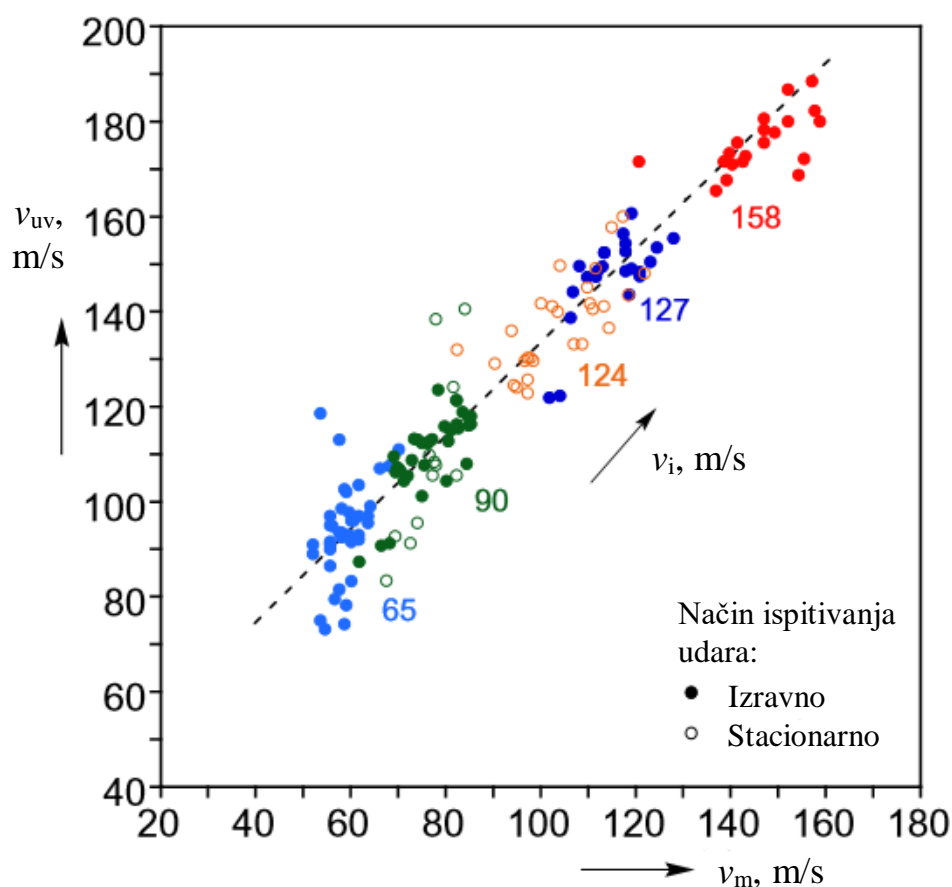
Formiranje i širenje udarnog vala, također je prikazano na slici 11. Tu se nalaze tri fotografska zapisa deformiranja pjene koji su naknadno obrađeni pomoću korelacije digitalne slike (*DIC – Digital image correlation*) u programu za određivanje površinskih deformacija – ARAMIS. Skala s bojama predstavlja razinu deformacije. Pri velikim deformacijskim skokovima, sustav gubi povezanost te su stoga prikazane samo manje razine deformacije. Numerirane pozicije, također odgovaraju onima na slici 9. [7]



Slika 11. Obradeni fotografski zapisi visokobrzinske kamere [7]

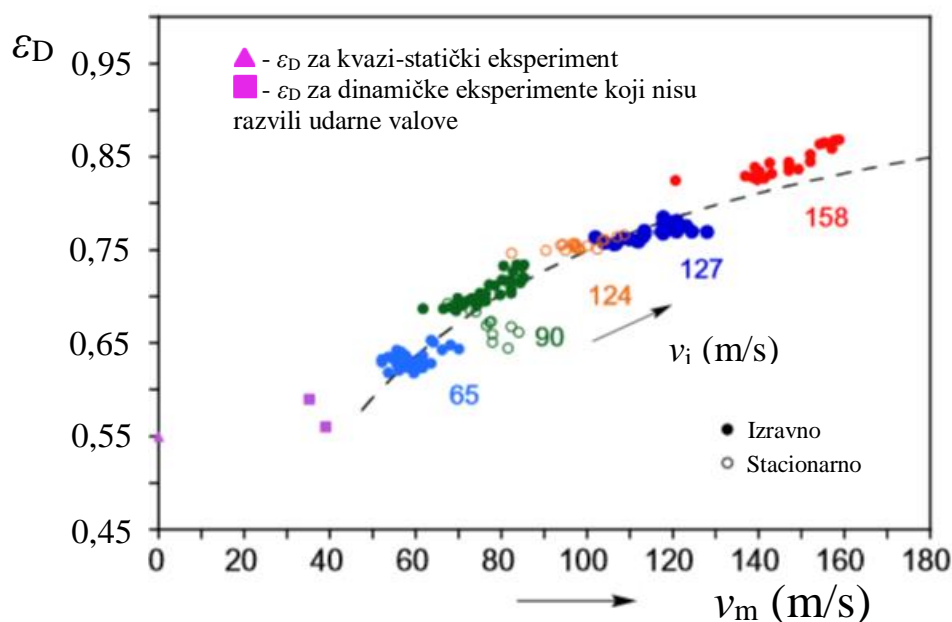
Pozicija 0 prikazuje formiranje prednjeg dijela lokaliziranih deformacija na sučelju nakovnja i pjene. Na idućem zapisu deformacija napreduje udesno prema potpornoj masi, a s lijeve strane materijal se drobi do dovoljno visoke deformacije da DIC izgubi povezanost. Pozicija 3 potvrđuje takav način propagiranja udarnog vala gdje je s lijeve strane zbijeni materijal, a desna strana uzorka pjene je skoro pa nedeformirana. [7]

Ispitivanja udara pri brzinama većim od $v_i = 60$ m/s uglavnom pokazuju linearan trend kad je u pitanju odnos između brzine ispaljene mase i brzine udarnog vala. Dijagram na slici 12., generiran iz četiri izravna i dva stacionarna ispitivanja udara, potvrđuje navedeno. [7]



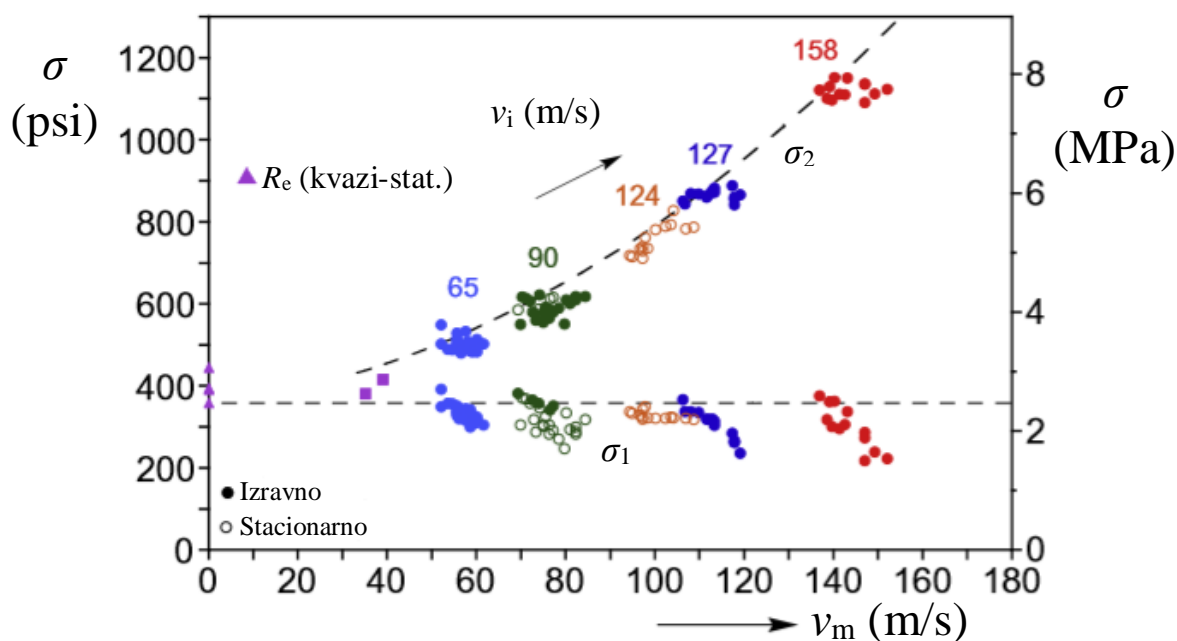
Slika 12. Odnos između brzine ispaljene mase i brzine udarnog vala [7]

Preko digitalnih zapisa visokobrzinske kamere, može se dobiti prikaz ovisnosti deformacije zgušnjavanja i brzine udara (slika 13.). Jasno je da se, povećanjem brzine udara, putanja u dijagramu asimptotski približava maksimalnoj vrijednosti zgušnjavanja za ispitivanu aluminijsku pjenu. Radi usporedbe, uključene su i deformacije pri završetku faze nehomogenog drobljenja u kvazi-statičkom eksperimentu i u dva dinamička eksperimenta koji nisu razvili udarne valove u pjenu. Očigledno je da se ε_D znatno povećava s brzinom udara. [7]



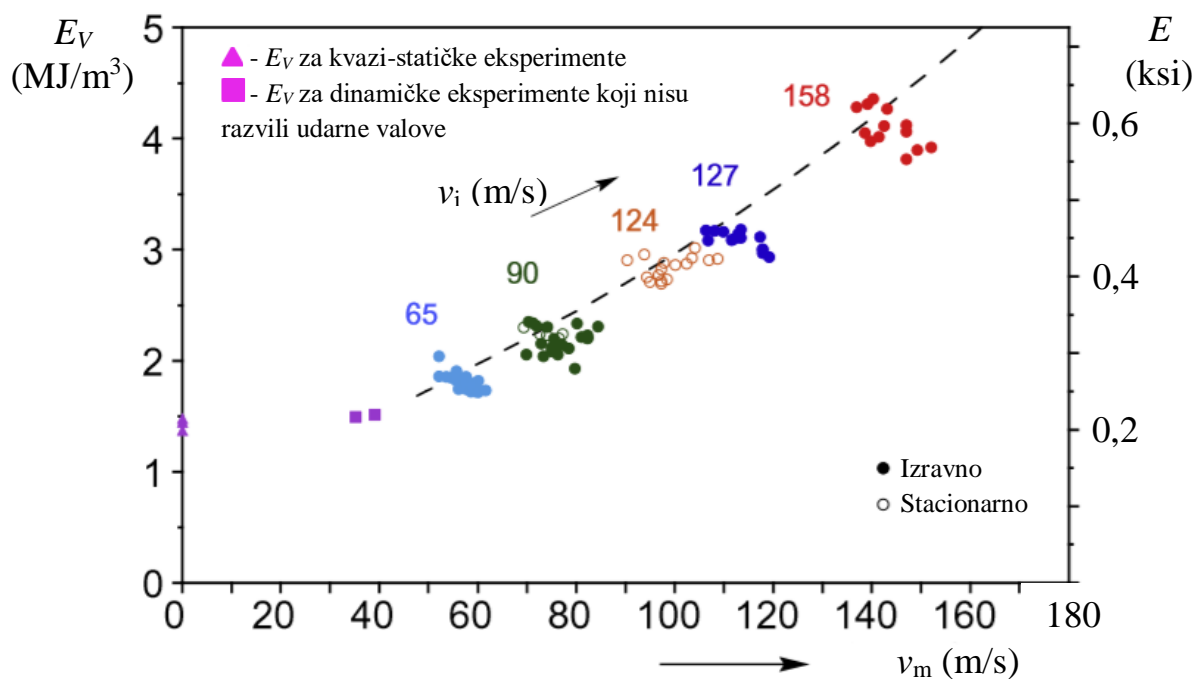
Slika 13. Ovisnost deformacije zgušnjavanja o brzini udara [7]

Iznosi naprezanja prije (σ_1) i poslije djelovanja udarnog vala (σ_2) razlikuju se tijekom udarnog opterećenja Al pjene, a njihovu ovisnost o brzini udara predočava dijagram na slici 14. σ_2 pokazuje kvadratno povećanje u odnosu na porast brzine, a σ_1 ostaje relativno nepromijenjeno. Zanimljivo je primijetiti da je vrijednost inicijalnog naprezanja (granice tečenja) prilikom kvazi-statičkih ispitivanja gotovo na istoj razini kao σ_1 . Iako su cilindrični uzorci pjene korišteni iz istog bloka, razlog blažih rasipanja u prikazanim rezultatima su varijacija u gustoći i anizotropija pjene. [7]



Slika 14. Ovisnost naprezanja o brzini tijekom udarnog opterećenja [7]

Prema slici 15., evidentno je da se apsorpcija energije po jedinici volumena povećava s brzinom udara. Za usporedbu, dijagram uključuje energije apsorbirane pri manjim brzinama udara koje nisu razvile udarne valove te energije apsorbirane tijekom kvazi-statičkih eksperimenata drobljenja Al pjene. Takvi slučajevi pokazuju manji iznos apsorbirane energije. [7]

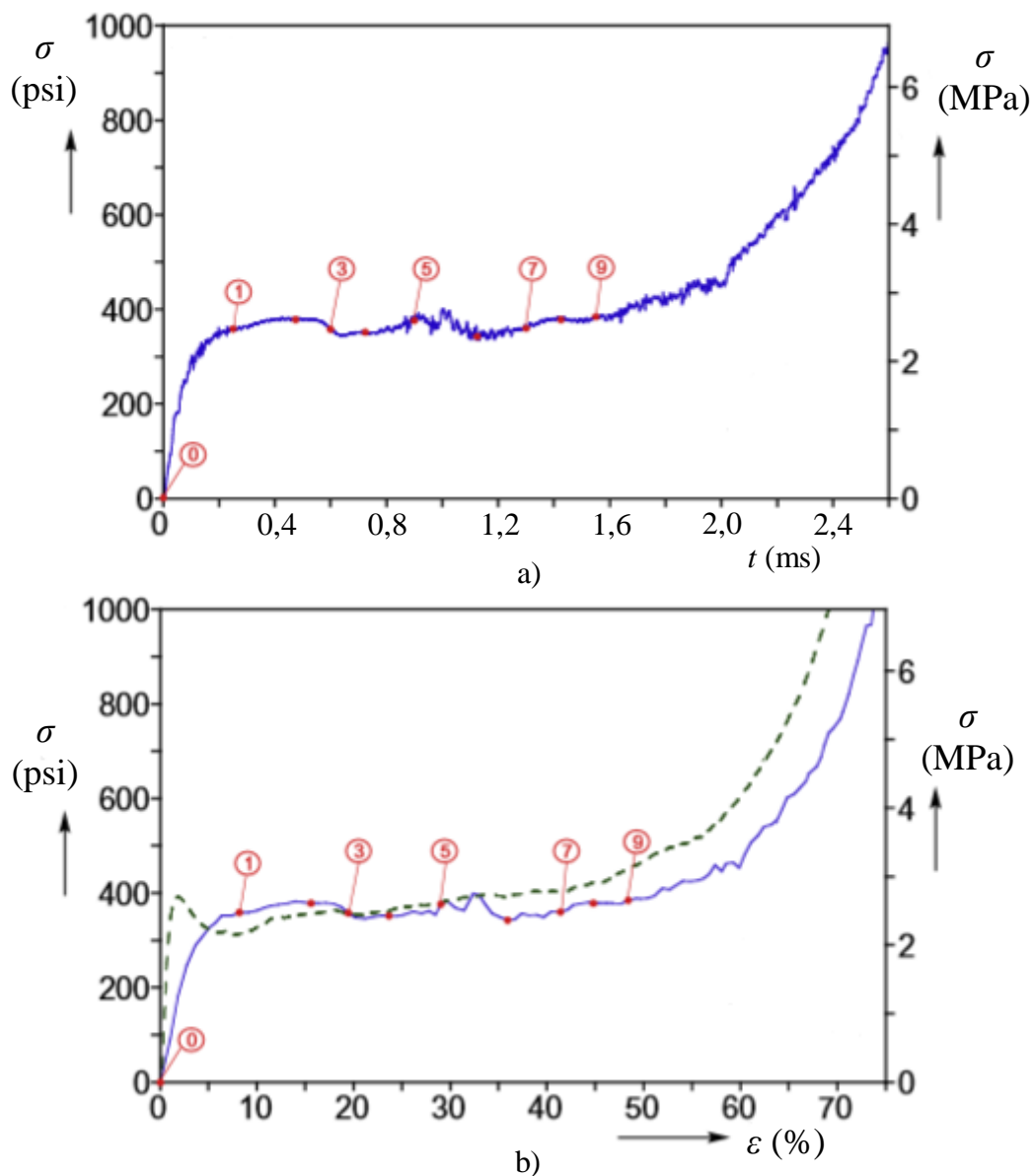


Slika 15. Odnos između apsorbirane energije po jedinici volumena i brzine udara [7]

3.3.2. Ispitivanje pri nižim brzinama udara

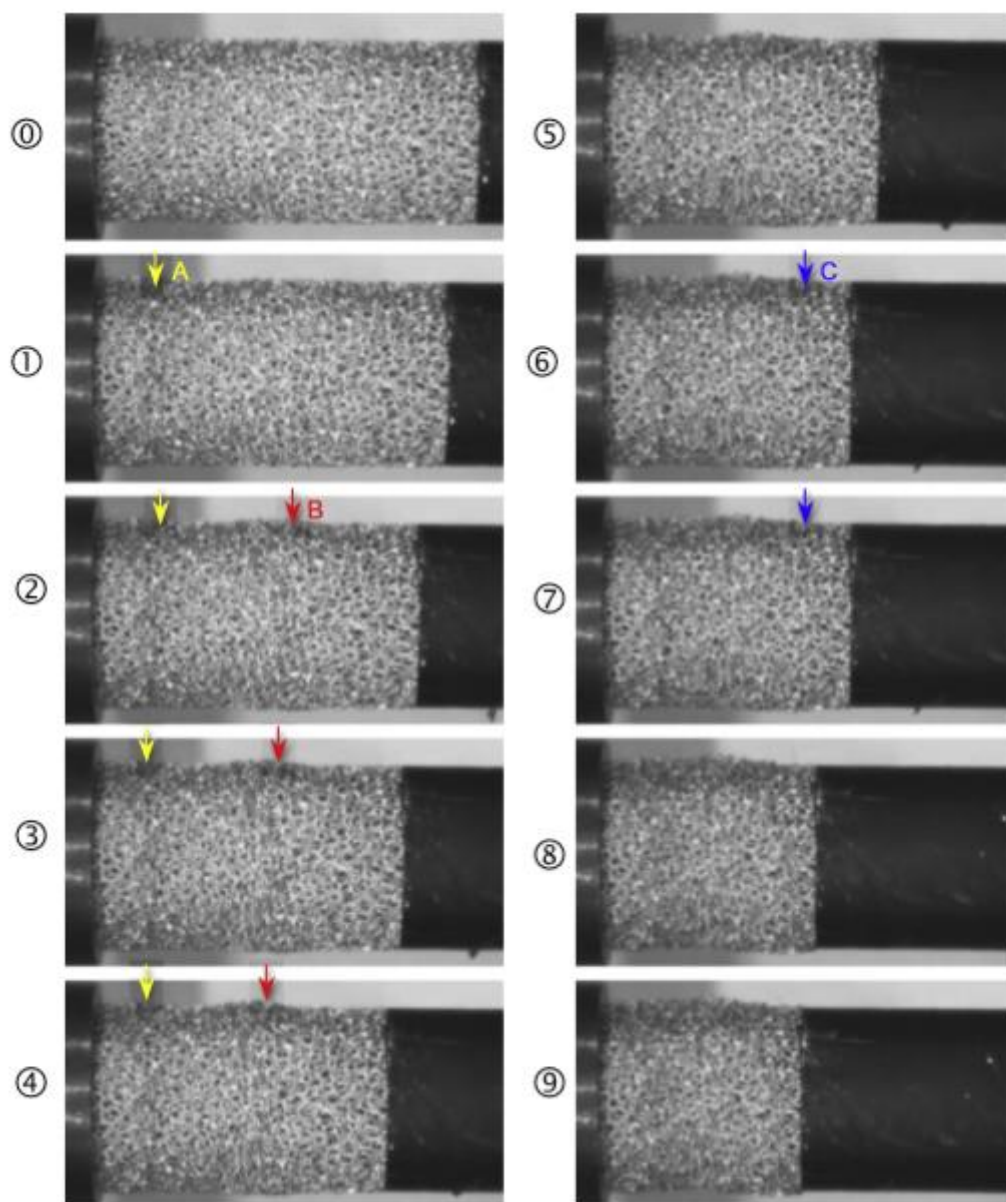
Budući da se u slučaju nižih brzina udara (< 60 m/s) ne generiraju udarni valovi u Al pjenu, proces drobljenja prilično je sličan onome koji se primjećuje u kvazi-statičkim opterećenjima. Lokalna deformacija započinje na najslabijem mjestu u pjenu te ima utjecaj na cijeli presjek. Širi se u bilo kojem smjeru, a njezino širenje zaustavlja se kada joj se suprotstave ćelije veće čvrstoće. Lokalizacija se tada seli na sljedeće najslabije mjesto. Ovakva nukleacija i širenje lokalnog drobljenja nastavlja se sve dok se cijeli uzorak ne zdrobi, a naprezanje u pjenu pri tome ostaje gotovo konstantno. S obzirom na dovoljno kinetičke energije, tijekom dinamičkog opterećenja, zdrobljena pjena nastavlja se jednolično deformirati uz povećanje naprežanja. [7]

Na slici 16. nalaze se dijagrami koji prikazuju relaciju naprežanja i vremena, odnosno naprežanja i deformacije tijekom izravnog udara Al pjenu pri brzini od 35 m/s. Nulta pozicija odgovara trenutku uspostave kontakta uzorka pjenu s nakovnjem. Radi komparacije, slika 16b. uključuje i krivulju apsorpcije energije usred kvazi-statičkog opterećenja iste pjenu (isprekidana krivulja). Granica stlačivanja obje krivulje približno je na istoj razini. [7]



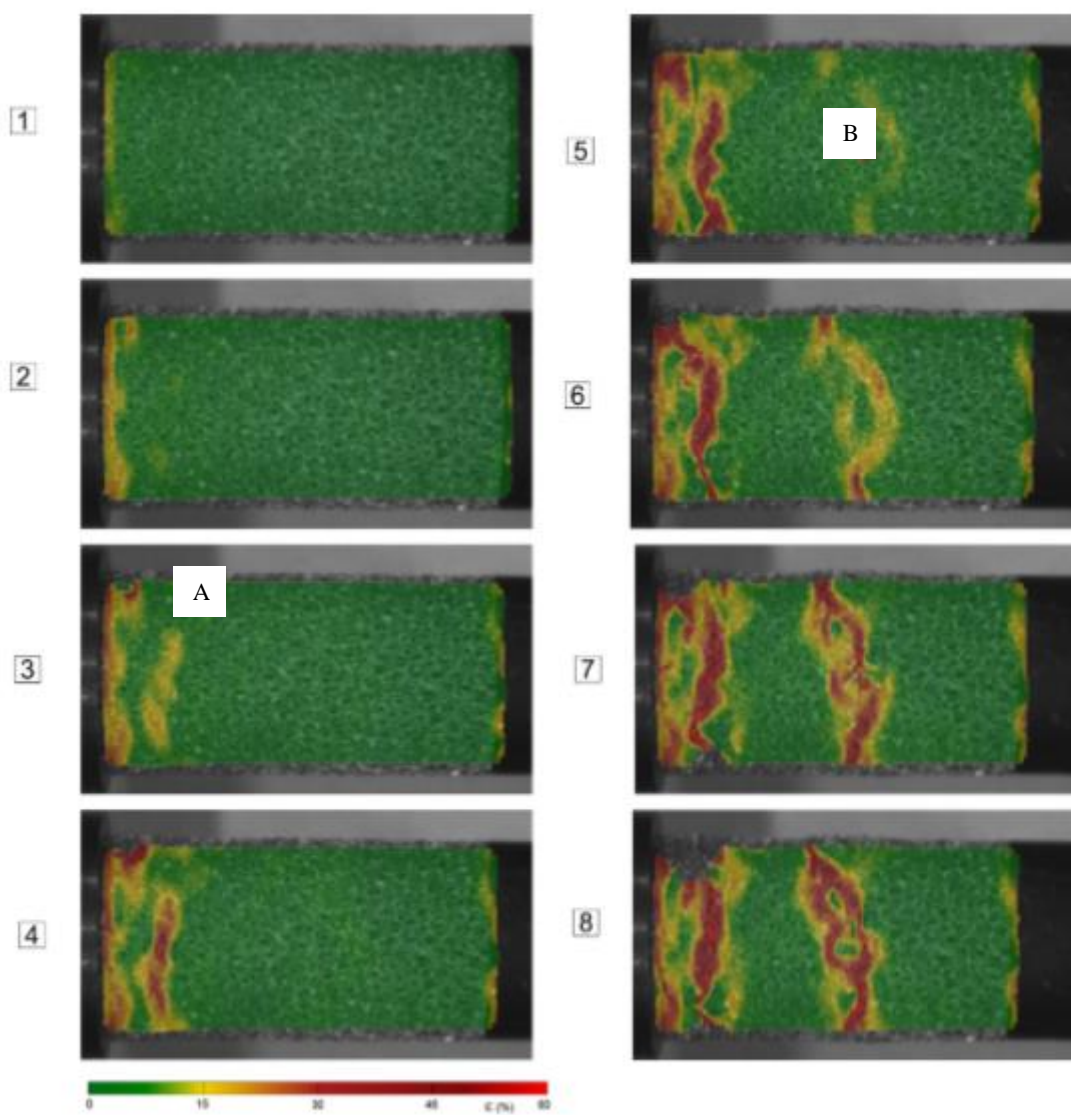
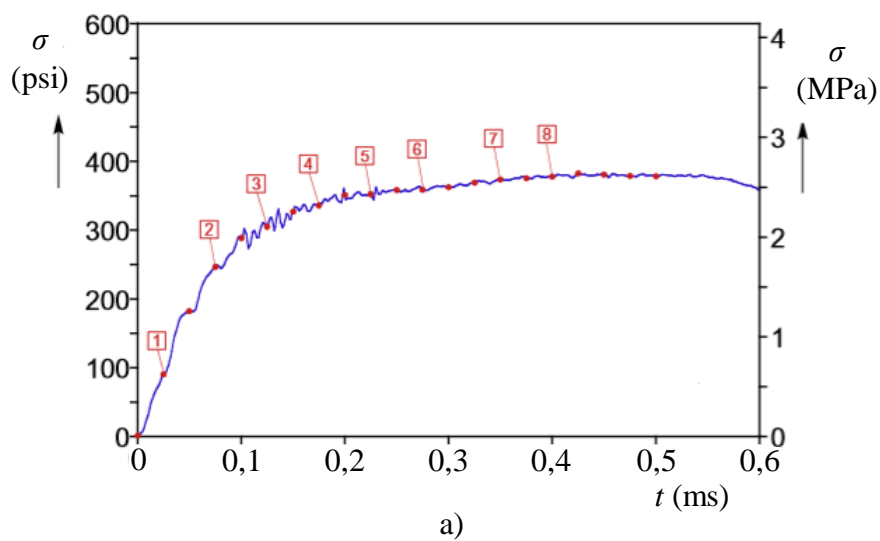
Slika 16. Krivulje apsorpcije energije tijekom ispitivanja izravnog udara pri $v_i = 35$ m/s:
 a) relacija naprežanja i vremena b) relacija naprežanja i deformacije [7]

Idući fotografski zapisi visokobrzinske kamere (slika 17.) odnose se na prethodne dijagrame. Slovne oznake A, B, i C predstavljaju zone gdje se generiraju lokalne deformacije. Prema poziciji 1 i 2, deformacija se prvo javlja u zoni A, a nakon toga i u zoni B koja s vremenom pokazuje tendenciju širenja prema lijevoj strani. Može se primijetiti da zone tijekom opterećenja nisu aktivne u istoj mjeri, tj. nemaju konstantan intenzitet napretka deformacije, već se s vremenom deaktiviraju, odnosno aktiviraju. Treća zona drobljenja, označena kao C, razvila se bliže potpornoj masi što se može vidjeti na poziciji 6. Nadalje, nastale zone deformacije u pjenu nastavljaju se kompaktirati i zbijati uz što veće naprežanje. [7]



Slika 17. Fotografski zapisi visokobrzinske kamere prilikom ispitivanja izravnog udara pri $v_i = 35$ m/s [7]

Fotografski zapisi, i u ovom slučaju, mogu se obrađivati značajkama DIC-a pomoću softvera ARAMIS. Budući da sustav gubi povezanost pri većim razinama deformacije, pozornost se koncentrira na slijed događaja koji se odvijaju do $t = 0,5$ ms. Pripadni dijagram naprezanja u vremenu te odgovarajući set slikovnih zapisa nalaze se na slici 18. Na zapise su nanesene konture čije boje označavaju iznose aksijalne deformacije. Prva lokalna deformacija javlja se na samom sučelju nakovnja i uzorka pjene. Ona s vremenom opterećenja postaje izraženija, a potom se lokalizacija drobljenja seli u zone A i B gdje su ćelije nešto slabije od ostalih. Pojasevi lokalnih deformacija nemaju preferirane smjerove, već vijugaju po uzorku pjene tražeći slabosti u materijalu. S vremenom, lokalni pojasevi šire se i umnožavaju, dok zabilježeno naprezanje ostaje gotovo konstantno. [7]



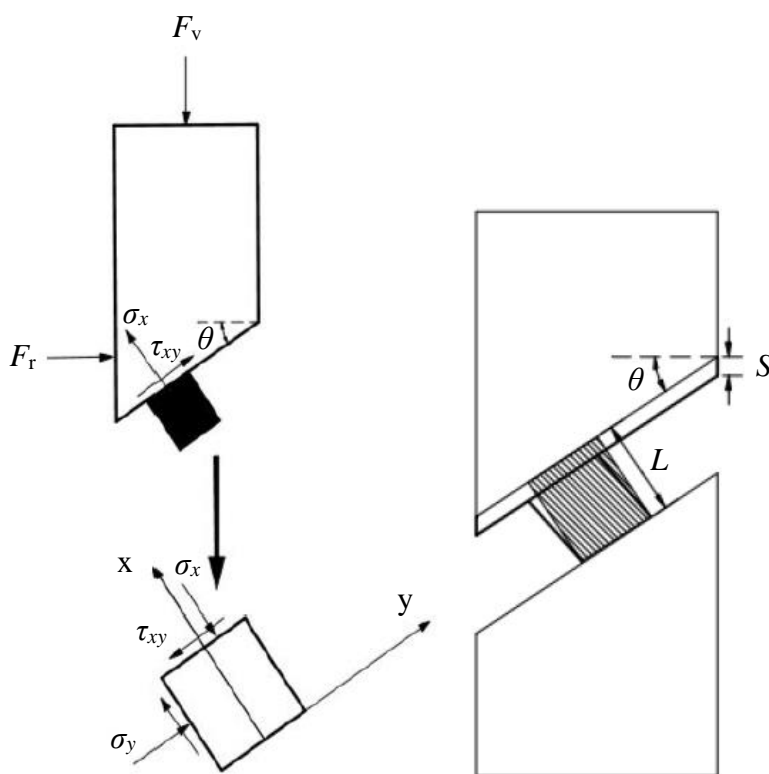
Slika 18. Zone lokalne deformacije koje se javljaju pri brzini udara $v_i = 35$ m/s (b) te za njih pripadajući dijagram naprezanja u vremenu (a) [7]

Normalno i posmično naprezanje definira se u lokalnom koordinatnom sustavu (slika 21.) gdje je x-os okomita, a y-os paralelna sa sučeljem (kontaktnom površinom) šipke i uzorka. Sila duž pozitivne osi naprave za ispitivanje definirana je kao vertikalna sila, F_v . Sila koja je okomita na vertikalnu silu, naziva se horizontalna sila, F_r . Ta sila ograničava cilindrične šipke da djeluju samo u vertikalnom smjeru. Kut kojeg zatvara smjer opterećenja (vertikalni smjer) i aksijalni smjer uzorka pjene, naziva se kutom opterećenja, θ . Jasno, što je kut opterećenja veći, to je dominantnija komponenta smicanja. Vertikalna sila opterećenja i sila ograničenja cilindričnih šipki mogu se dati sljedećim izrazima:

$$F_v = \tau_{xy}L^2 \sin \theta + \sigma_x L^2 \cos \theta \quad (6)$$

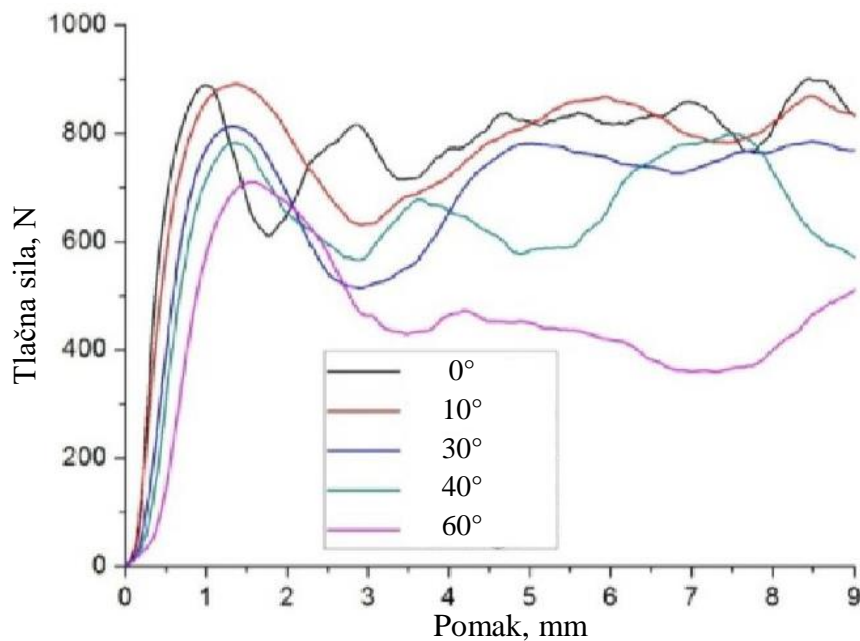
$$F_r = \tau_{xy}L^2 \cos \theta + \sigma_x L^2 \sin \theta \quad (7)$$

gdje je L duljina kubičnog uzorka. [6]



Slika 21. Shematski prikaz kvazi-statičkog višeosnog opterećenja [6]

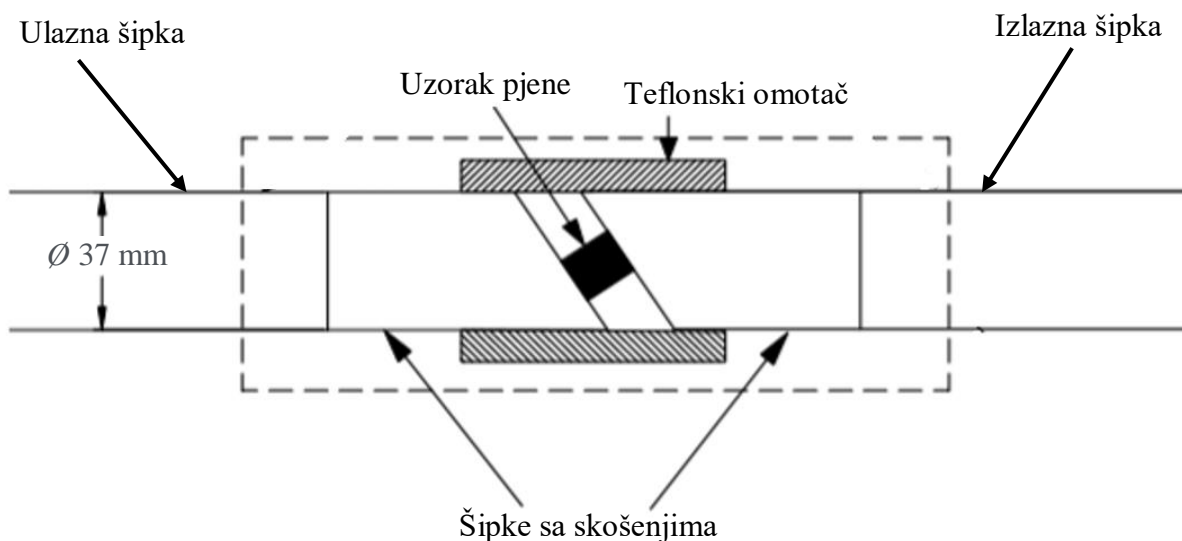
Krivulje tlačna sila – pomak aluminijske pjene, pod različitim kutovima kvazi-statičkog opterećenja, sažete su na slici 22. Za slučajeve malog kuta opterećenja (10°), cijeli proces urušavanja pjene sličan je rezultatima jednoosnog tlačnog ispitivanja zbog stanja naprezanja u kojem dominira tlačno naprezanje. Kada je kut opterećenja veći (60°), smično naprezanje uzrok je propadanja uzorka pjene. U elastičnom području, krivulje su u početku linearne, ali postaju nelinearne zbog gubitka krutosti uzrokovanog postupnim urušavanjem ćelija. Kada se postigne granica tečenja (R_e), opterećenje pada. Nagib krivulje, granica tečenja (R_e) te prosječna granica stlačivanja (R_{et}) opadaju s povećanjem kuta opterećenja. Granica tečenja predstavlja početno plastično izvijanje najslabijeg sloja pjene. Nakon toga, deformacija će biti lokalizirana unutar toga sloja sve dok se sve lokalne ćelije ne zbiju u potpunosti i dok se sljedeći niz ćelija ne počne urušavati. [6]



Slika 22. Krivulje tlačna sila – pomak za različite kutove kvazi-statičkog opterećenja [6]

3.5. Dinamičko višeosno opterećenje aluminijske pjene

Split – Hopkinson-ova tlačna šipka (*eng. Split-Hopkinson pressure bar - SHPB*) je u današnje vrijeme popularna naprava koja imitira udarno opterećenje. Namijenjena je za proučavanje ponašanja materijala uslijed dinamičkog tlačnog opterećenja. U početku, naprava je razvijena za ispitivanje metalnih materijala, a sada se koristi za različite materijale poput polimernih, geotehničkih i bioloških. Uobičajeni SHPB uređaj sastoji se od ulaznih i izlaznih šipki (slika 23.) između kojih je smješten ispitivani uzorak. [6]



Slika 23. Shema SHPB naprave [6]

Na slici 24. nalazi se fotografija cijele postavke SHPB uređaja kojim se ispituje ponašanje aluminijske pjene.



Slika 24. Prikaz cijelog SHPB sustava [8]

Projektil, ispaljen plinskim pištoljem, udara u slobodni kraj ulazne šipke i stvara tlačni longitudinalni val, $\varepsilon_i(t)$. Kada taj val stigne na sučelje uzorka i šipke, dio njega $\varepsilon_r(t)$ se odbija, a drugi dio prolazi kroz uzorak i pretvara se u odašiljani val, $\varepsilon_t(t)$ u izlaznoj šipci. Dva mjerna uređaja smještena su na sredinama ulazne i izlazne šipke, a služe za prikupljanje eksperimentalnih podataka koje je potrebno usvojiti kako bi se utvrdile sile i brzine koje djeluju na obje strane uzorka. [6]

Dvije kratke cilindrične šipke, koje imaju skošenje na unutarnjoj strani, smještene su između uzorka i ulazne, odnosno izlazne šipke. Obje vrste šipki izrađene su od čistog aluminija te imaju isti promjer od 37 mm. Uzorak metalne pjene stavlja se između dvije paralelne kosine unutarnjih šipki te se na taj način ostvaruje višeosno dinamičko opterećenje. [6]

Tijekom opterećenja, kvadratni teflonski omotač osigurava samo horizontalno gibanje unutarnjih šipki sa skošenjem. Koeficijent trenja između uzorka pjene i šipki trebao bi biti dovoljno velik da se spriječi proklizavanje tijekom procesa višeosnog opterećenja. Kada se uzorak pjene opterećuje na ovakav način, ostvaruju se stanje višeosnog naprezanja. [6]

Preko signala deformacija, koji se prikupljaju mjernim uređajima, mogu se izračunati iznosi sila i brzina na sučeljima šipki i uzorka kako slijedi:

$$F_{\text{ulaz}}(t) = S_b E [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \quad (8)$$

$$F_{\text{izlaz}}(t) = S_b E \varepsilon_t(t) \quad (9)$$

$$v_{\text{ulaz}}(t) = C_0 E [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)] \quad (10)$$

$$v_{\text{izlaz}}(t) = C_0 E \varepsilon_t(t). \quad (11)$$

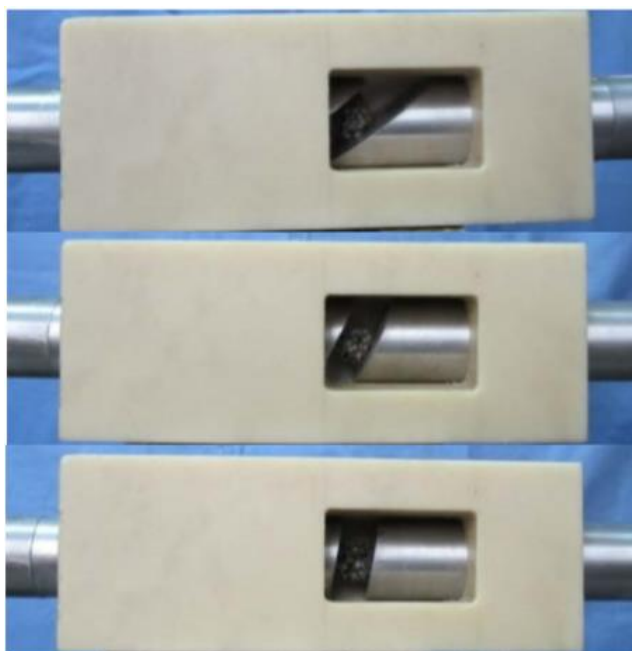
U prethodno navedenim izrazima, S_b , E i C_0 redom predstavljaju površinu poprečnog presjeka šipke, modul elastičnosti i brzinu longitudinalnog vala. $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$ i $\varepsilon_t(t)$ zabilježeni su signali deformacije prikupljeni u točkama mjerenja na ulaznim i izlaznim šipkama. [6]

Budući da pretpostavka homogenog polja naprezanja/deformacije nije primjenjiva u ovom slučaju višeosnog opterećenja uzorka pjene, uvodi se srednji tlak $P(t)$. Može se dobiti sljedećim izrazom:

$$P(t) = \frac{F_{\text{ulaz}}(t)}{S_s} \quad (12)$$

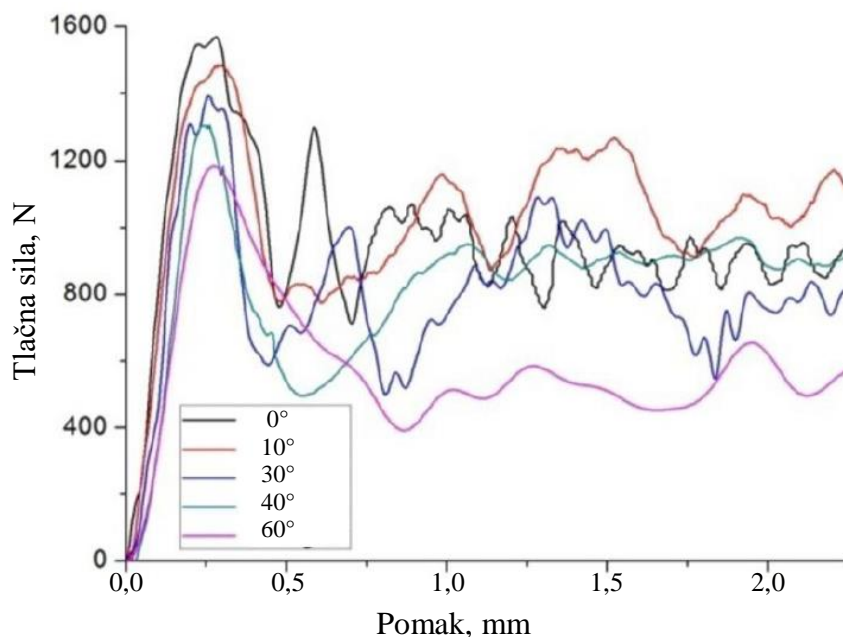
gdje je S_s površina uzorka koja je u kontaktu s unutarnjim šipkama. [6]

Na slici 25. prikazane su SHPB naprave gdje su uzorci smješteni između paralelnih kosina koje su nagnute pod različitim kutovima.



Slika 25. SHPB naprave različitog kuta opterećenja uzorka pjene [6]

Primjeri krivulja tlačna sila – pomak pjene, pod različitim kutovima dinamičkog opterećenja, prikazani su na slici 26. Može se utvrditi da razina krivulje snažno ovisi o kutu opterećenja, θ . Nagib krivulje i lokalni maksimum tlačne sile (granica tečenja pjene, R_e) smanjuju se s povećanjem kuta opterećenja. Također, niža je i prosječna razina granice stlačivanja, R_{et} . [6]



Slika 26. Krivulje tlačna sila – pomak pri različitim kutovima dinamičkog opterećenja [6]

3.6. Apsorpcija energije aluminijske pjene gradirane gustoće

3.6.1. Voronoi model

Ponašanje aluminijske pjene gradirane gustoće, pod tlačnim opterećenjem, može se promatrati koristeći numerički Voronoi model. Dvodimenzionalan Voronoi mozaik može se generirati u programu Matlab u kojem se formira nukleacija i rast ćelija. Točke nukleacije generiraju se u kvadratnom području A_0 veličine $L \cdot L$. Svaka sljedeća točka prihvaća se pod uvjetom da joj je udaljenost veća od minimalne dopuštene udaljenosti δ između bilo koje dvije nukleacijske točke. Točke se na ovaj način raspoređuju nasumično sve dok se određeni broj ne smjesti u kvadratno područje. [9]

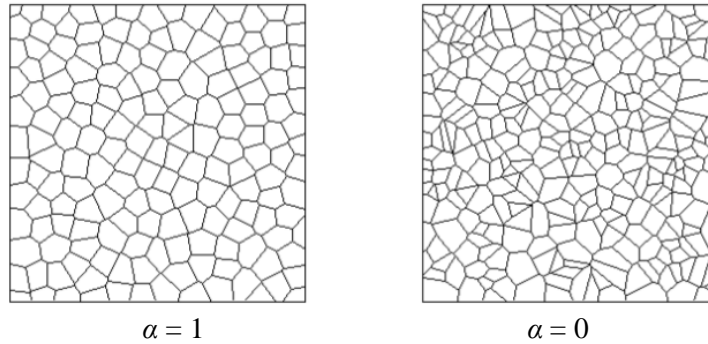
Za izgradnju pravilnog 2D Voronoi modela s n ćelija u području A_0 , udaljenost d_0 između bilo koje dvije susjedne točke nukleacije treba biti konstantna i dana je sljedećim izrazom.

$$d_0 = \sqrt{\frac{2A_0}{3^{1/2} n}} \quad (13)$$

Parametar α definiran je za mjerenje pravilnosti 2D Voronoi strukture.

$$\alpha = \frac{\delta}{d_0} \quad (14)$$

Nukleacijske točke raspodjelit će se nasumično u prostoru po principu Poissonove raspodjele pod uvjetom da je vrijednost α jednaka 0. Na slici 27. prikazan je Voronoi model u obliku „pravilnog saća“ s pravilnošću $\alpha = 1$ ($\delta = d_0$) i model sa slučajnim mozaikom s veličinom pravilnosti $\alpha = 0$. [9]



Slika 27. Voronoi modeli s različitim veličinom pravilnosti [9]

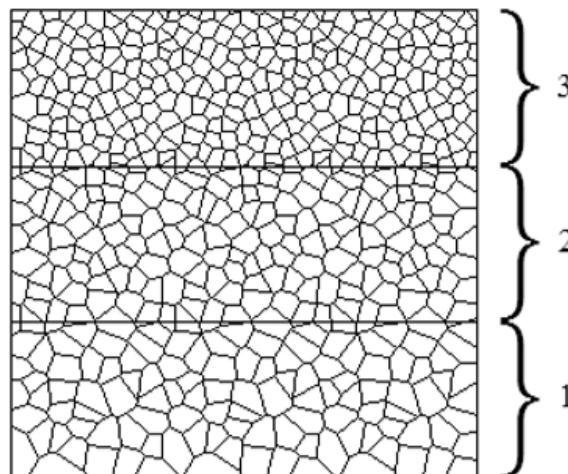
Relativna gustoća Voronoi pjene definirana je kao:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\sum l_i t_i}{L^2} \quad (15)$$

pri čemu se ρ^* i ρ_s odnose na gustoću ćelijastog i gustoću osnovnog materijala ćelija, a l_i i t_i su duljina i debljina stijenki ćelija. L predstavlja duljinu uzorka kvadratne površine A_0 . [9]

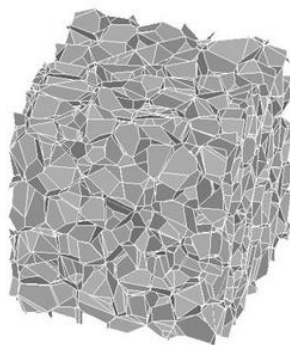
Slika 28. prikazuje Voronoi model pjene gradirane gustoće. Gradacija je vidljiva kroz odvojene dijelove 1, 2 i 3, a gradijent gustoće ∇_k za dijelove k i $k+1$ (za $k = 1, 2$) naveden je kao:

$$\nabla_k = \frac{\rho_{k+1}^* - \rho_k^*}{\rho_{k+1}^*} = \frac{(\sum l_i t_i)_{k+1} - (\sum l_i t_i)_k}{(\sum l_i t_i)_{k+1}} \quad (16)$$



Slika 28. Voronoi model pjene gradirane gustoće [9]

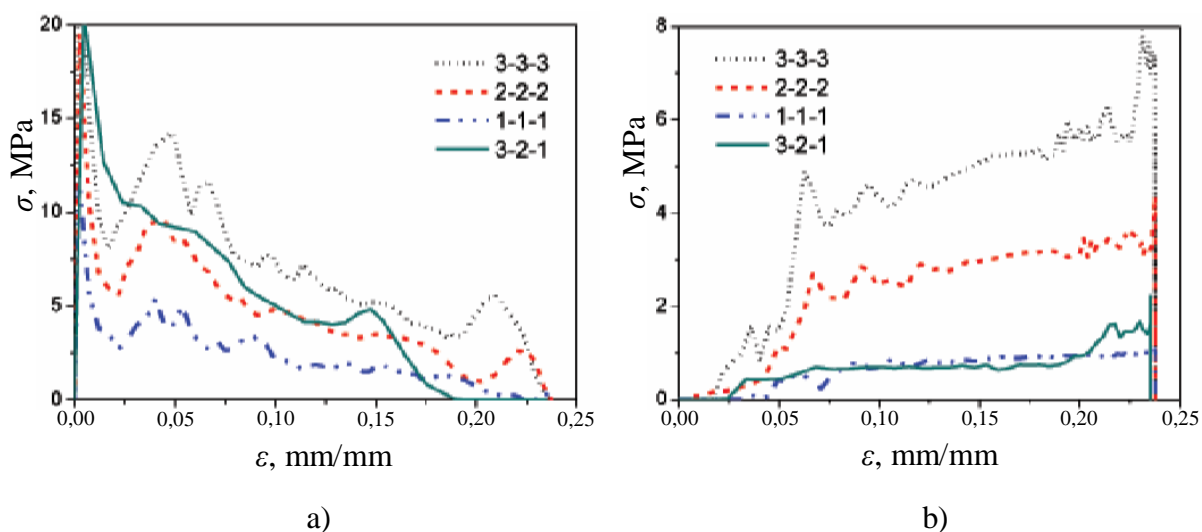
Da bi se razvila 3D ćelijasta konfiguracija (slika 29.) u numeričkoj simulaciji, Voronoi mozaik ekstrudira se duž osi z (os koja nije u ravnini). Ekstrudiranje te kontroliranje relativne gustoće promjenom broja stijenki ćelija, može se vršiti pomoću softvera konačnih elemenata ANSYS/LS-DYNA. Dakle, gustoća se mijenja s veličinom ćelija. Što su ćelije veće veličine, gustoća je manja i obratno. [9]



Slika 29. 3D Voronoi model pjene [10]

3.6.2. Utjecaj relativne gustoće na apsorpciju energije gradirane pjene

Aluminijske pjene u primjeni često imaju ulogu zaštite određene strukture od udarnog opterećenja te joj mogu poslužiti kao žrtvovana obloga. Obloga od pjene treba učinkovito apsorbirati visoku energiju i održati preneseno naprezanje dovoljno niskim da ne uzrokuje štetu na zaštićenoj konstrukciji. Slika 30. i tablica 1. daju usporedbu ponašanja homogenih pjena te pjene gradirane gustoće tijekom udarnog opterećenja. Usporedba se vrši na udarenoj i stacionarnoj strani pjene na temelju relativne gustoće. [9]



Slika 30. Ponašanje pjene na udarenoj (a) i stacionarnoj strani (b) ovisno o rel. gustoći [9]

Tablica 1. Utjecaj relativne gustoće pjene na apsorpciju energije [9]

Kombinacije relativne gustoće pjene	Gustoća pjene (kg/m ³)	W_{ulaz} (MJ/m ³)	W_{izlaz} (MJ/m ³)	Faktor iskoristivosti apsorpcije energije (%)
1-1-1	300	0,5524	0,1517	72,54
2-2-2	400	1,1233	0,5421	51,74
3-3-3	486	1,7287	0,9588	44,54
3-2-1	395,3	1,2782	0,1625	87,29

*1, 2, 3 označavaju relativnu gustoću od 11,1 %, 14,8 % i 18 %

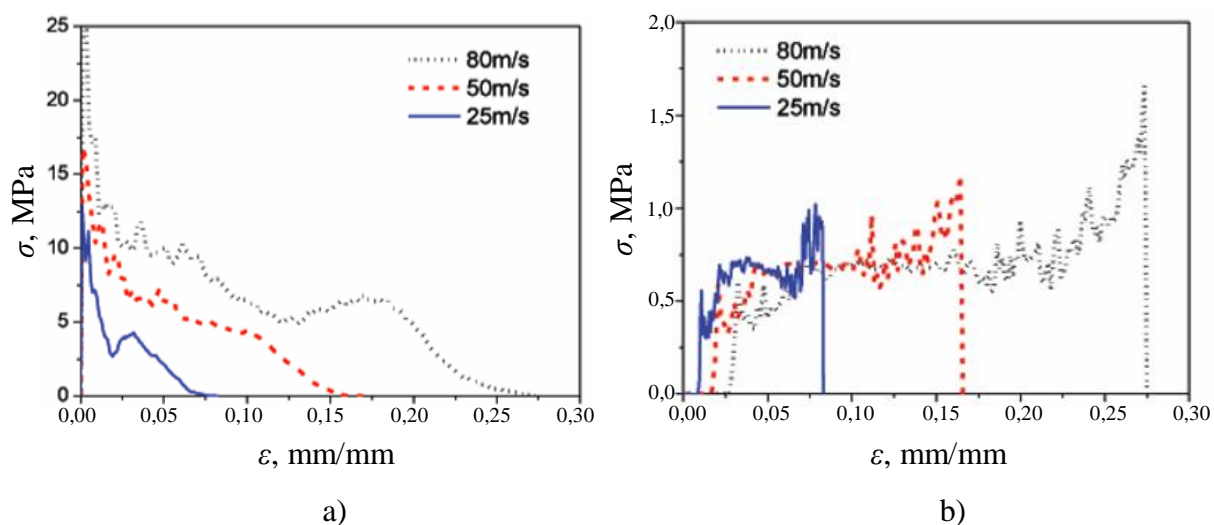
Prva tri reda tablice 1. odnose se na homogene pjene različite relativne gustoće, dok kombinacija 3-2-1 označava pjenu gradirane gustoće. W_{ulaz} predstavlja gustoću ulazne energije, odnosno apsorbiranu energiju po jedinici volumena, dok W_{izlaz} označava gustoću izlazne energije ili preostalu energiju po jedinici volumena. Faktor iskoristivosti apsorpcije energije može se izračunati preko sljedeće jednadžbe:

$$e = \frac{W_{ulaz} - W_{izlaz}}{W_{ulaz}} \times 100 \% \quad (17)$$

te je očito da se razlikuje ovisno o relativnoj gustoći. Vidljivo je da gradirana aluminijska pjena, sastavljena od 3 sloja relativne gustoće 11,1 %, 14,8 % i 18 %, apsorbira veću energiju od homogene pjene 1-1-1 s 11,1 % relativne gustoće. Međutim, obje pjene imaju približno istu granicu stlačivanja na stacionarnoj strani. Preneseno naprezanje pjene gradirane gustoće, na potencijalno zaštićenu konstrukciju, značajno je manje od onog jednolikih pjena s 14,8 % i 18 % relativne gustoće. Gradirana pjena ima dobar kapacitet apsorpcije energije te najveći faktor iskoristivosti apsorpcije energije, konkretno 87,29 % što se može iščitati iz tablice 1. Kad su homogene pjene u pitanju, ovaj faktor se smanjuje povećanjem relativne gustoće. Stoga, pjena s gradiranom gustoćom može učinkovito apsorbirati energiju udarnog opterećenja i prenijeti naprezanje poželjno niske vrijednosti na potencijalno zaštićenu konstrukciju. [9]

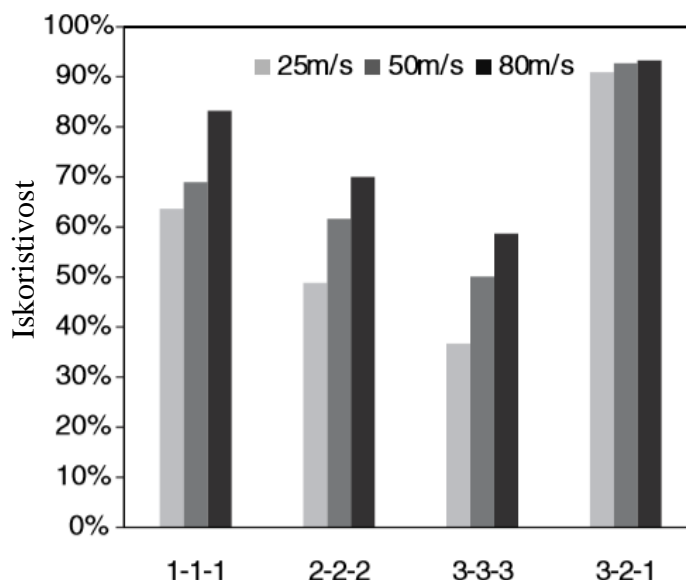
3.6.3. Utjecaj brzine udara na apsorpciju energije gradirane pjene

Iz dijagrama na slici 31. može se vidjeti da apsorpcija energije pjene gradirane gustoće raste povećanjem brzine udara. Na stacionarnoj strani vidljivo je da je razina naprezanja znatno manja nego ona na udarenoj strani. Iako i na ovoj strani gustoća energije raste s povećanjem brzine udara, granica stlačivanja približno je ista u određenom rasponu deformacije, što znači da preneseno naprezanje, na potencijalno zaštićenu konstrukciju, može biti konstantno pri poželjno niskoj vrijednosti. [9]



Slika 31. Ponašanje gradirane pjene na udarenoj (a) i stacionarnoj strani (b) ovisno o brzini udara [9]

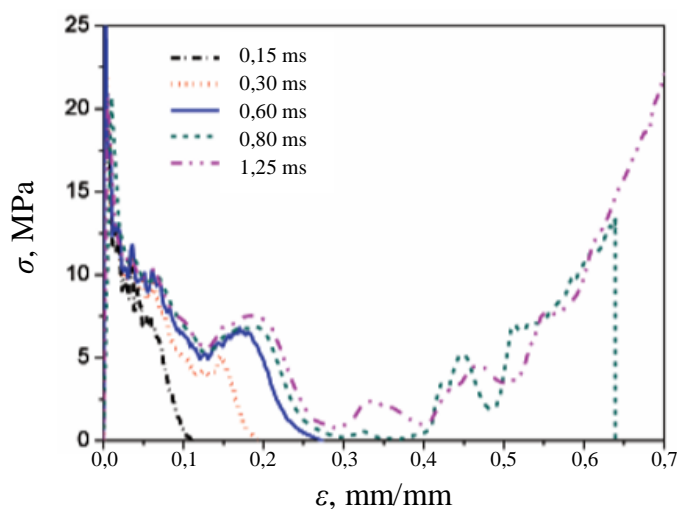
Kao što se može vidjeti na slici 32., aluminijska pjena gradirane gustoće posjeduje očitu prednost u tome što njezin faktor iskoristivosti apsorpcije energije nadmašuje faktore pjena jednolike gustoće, bez obzira na brzinu udara. Iskoristivost apsorpcije energije raste povećanjem brzine udara, ali tendencija porasta je očiglednija za pjene ujednačene gustoće. Za pjene gradirane gustoće, uočeno je samo neznatno povećanje. [9]



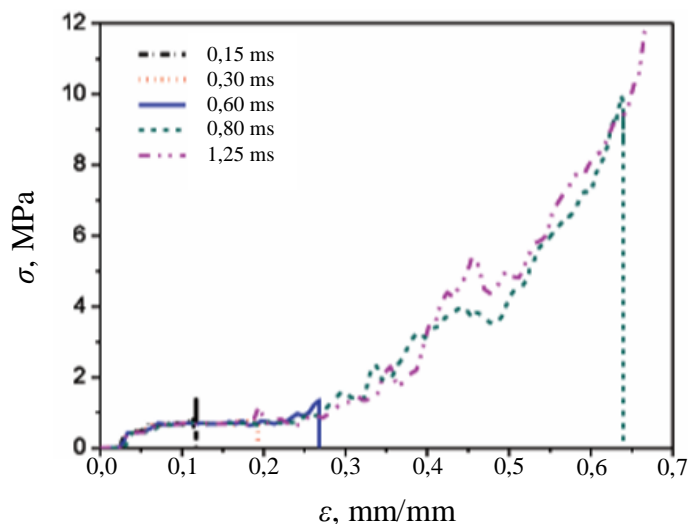
Slika 32. Utjecaj brzine udara na iskoristivost apsorpcije energije [9]

3.6.4. Utjecaj trajanja opterećenja na apsorpciju energije gradirane pjene

Povećanjem trajanja opterećenja raste ukupna deformacija pjene, a time i apsorbirana energija udara (slika 33.). Također, porast je vidljiv i na stacionarnoj strani pjene (slika 34.). Osobito nakon kritičnog trajanja od 0,6 ms, kapacitet apsorpcije energije po volumenu neizmjenno se povećava, ali i više preostale energije moguće je istovremeno prenijeti na konstrukciju koja se potencijalno štiti u ovom slučaju. [9]

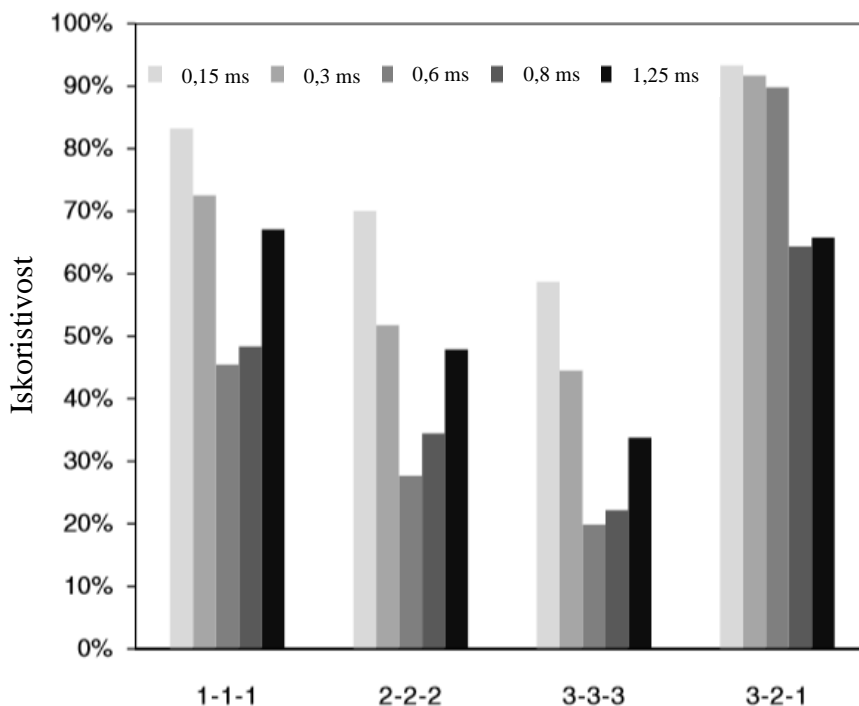


Slika 33. Utjecaj trajanja opterećenja na gustoću energije na udarenoj strani gradirane pjene [9]



Slika 34. Utjecaj trajanja opterećenja na gustoću energije na stacionarnoj strani gradirane pjene [9]

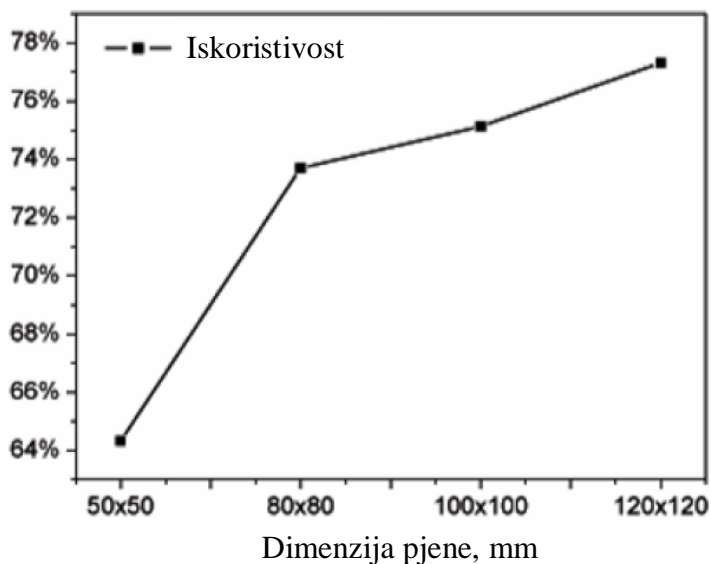
Pjene gradirane gustoće pokazuju superiornost nad pjenama jednolike gustoće pri ublažavanju udarnog opterećenja, bez obzira na njegovo vrijeme trajanja. Iskoristivost apsorpcije energije homogene pjene dramatično opada s povećanjem vremena trajanja, a nakon određenog vremena počinje rasti. Isto se događa i u slučaju gradirane pjene, ali ovdje opadanje iskoristivosti nije tako intenzivno što se može vidjeti na slici 35. [9]



Slika 35. Utjecaj trajanja opterećenja na iskoristivost apsorpcije energije [9]

3.6.5. Utjecaj debljine gradirane pjene na apsorpciju energije

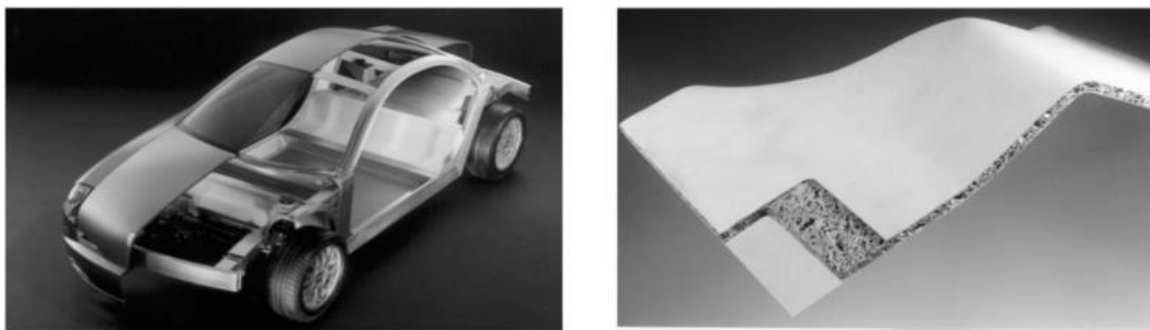
Povećanjem debljine gradirane pjene, povećava se iskoristivost apsorpcije energije udara. Drugim riječima, smanjit će se zaostala energija ako je sloj pjene dovoljno debeo. Slika 36. opravdava navedeno, a utjecaj debljine pjene promatra se kroz kubične uzorke. [9]



Slika 36. Utjecaj debljine gradirane pjene na iskoristivost apsorpcije energije [9]

3.7. Apsorpcija energije udara sendvič struktura s jezgrom od aluminijske pjene

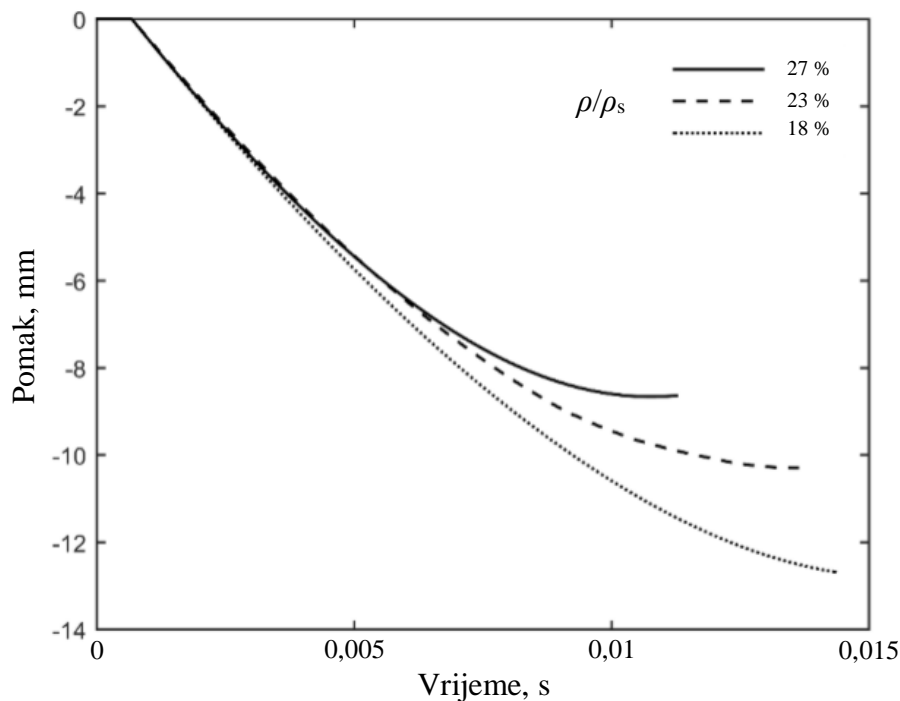
Sendvič strukture s jezgrom od aluminijske pjene (*eng. aluminium foam sandwich, AFS*) imaju široku primjenu u uvjetima gdje se traži svojstvo apsorpcije energije udara. Takve sendvič strukture najčešće čine dvije pokrovne aluminijske ploče relativno male debljine, a između njih se nalazi aluminijska pjena. Zastupljene su u industriji transportnih sredstava poput automobila (slika 37.) i vlakova (slika 38.). Deformacija AFS panela tijekom udarnog opterećenja ovisi o relativnoj gustoći jezgre. Povećanjem relativne gustoće Al pjene, smanjuje se pomak AFS-a i trajanje tlačnog opterećenja što se može vidjeti na slici 39. [11]



Slika 37. Primjena AFS-a u automobilskoj industriji [12]



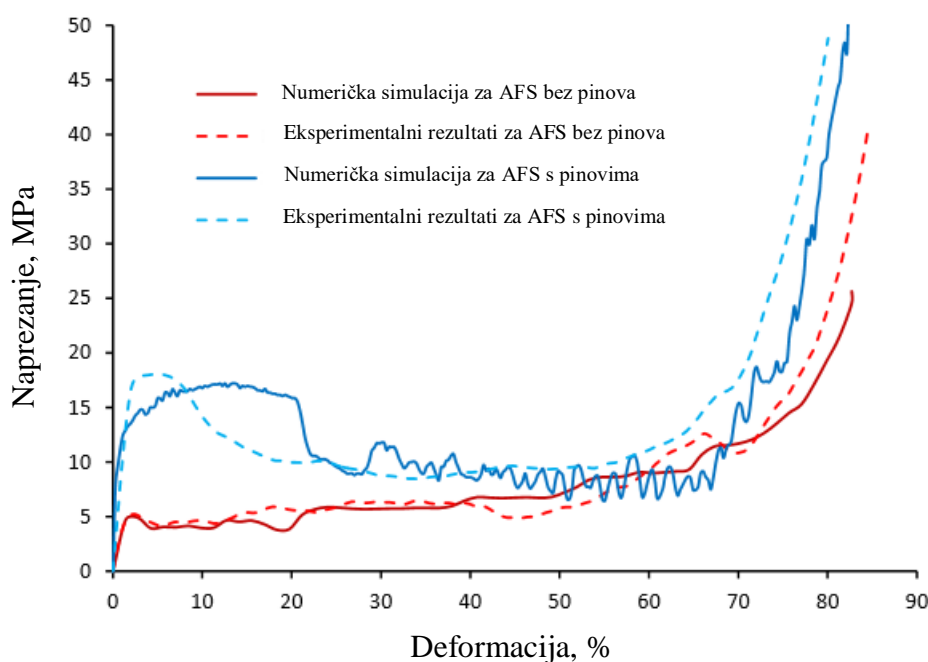
Slika 38. Primjena AFS-a u industriji vlakova [13]



Slika 39. Pomak AFS-a uslijed udarnog opterećenja ovisno o rel. gustoći jezgre [11]

Kada se AFS struktura komprimira, jezgra od aluminijske pjene progresivno se urušava i podliježe velikim plastičnim deformacijama, održavajući konstantno tlačno naprezanje prije početka zgušnjavanja. To omogućava AFS strukturama apsorbiranje velike količine kinetičke energije udara i čini ih pogodnima i za ublažavanje eksplozije. Aluminijske pokrovne ploče povećavaju ukupnu krutost ove sendvič strukture. Jedna od tehnika prilagodbe mehaničkih svojstava je perforiranje AFS-a te ugrađivanje pinova (šipki) okomito na pokrovne ploče. Odgovarajuće poboljšanje modula elastičnosti i čvrstoće dobiva se optimiziranjem veličine i rasporeda pinova te izborom aluminijske pjene povoljne relativne gustoće. Materijal pinova koji se ugrađuju je aluminijska legura. [14]

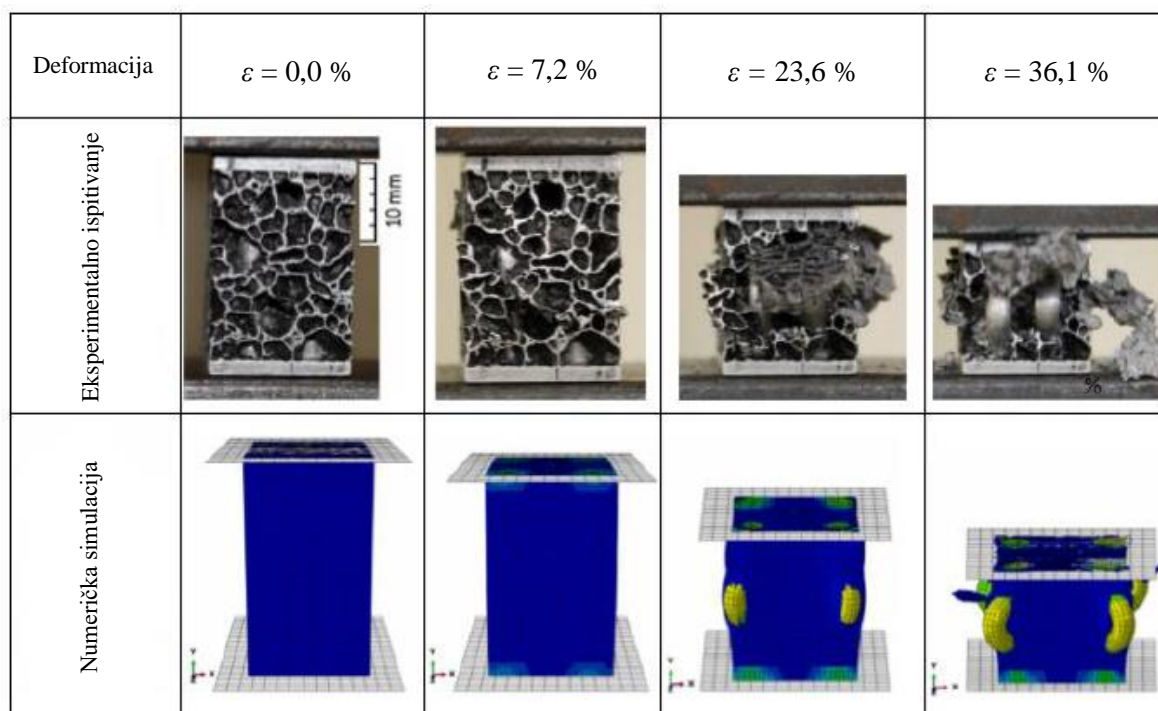
Urušavanje ćelija pjene događa se na stijenkama ćelija koje su paralelne sa smjerom opterećenja. Stijenke ćelija koje su okomite na smjer opterećenja ne podliježu značajnijoj deformaciji, a samim time ne doprinose ni apsorpciji energije udara u velikoj mjeri. Dodavanjem pinova koji prate smjer opterećenja u AFS strukturi, izaziva se novi oblik deformacije i povećava se sposobnost apsorpiranja energije. Na slici 40. prikazan je dijagram naprezanja – deformacije u kojem se uspoređuju krivulje apsorpcije energije referentnih AFS struktura bez pinova i onih s ugrađenim pinovima. U ovom slučaju ugrađena su 4 pina. Također, mogu se vidjeti određena manja odstupanja između numeričkih i eksperimentalnih rezultata kvazi-statičkih ispitivanja. [14]



Slika 40. Krivulje apsorpcije energije AFS struktura s i bez pinova [14]

U usporedbi s referentnim AFS uzorcima, vidljiv je porast granice tečenja i modula elastičnosti kod AFS-a s pinovima. Nakon granice tečenja slijedi kratka faza konstantnog naprezanja tijekom koje dolazi do izvijanja pinova. Stabilnost pinova povećana je zbog okolne pjene. Kad su pinovi izvijeni, naprezanje pada. Tijekom druge, duže faze konstantnog naprezanja (granice stlačivanja) dolazi do deformacije i urušavanja neoštećenih ćelija pjene u sredini AFS-a koje podnose opterećenje nakon zakazivanja pinova. U toj se fazi može primjetiti manja razlika razine naprezanja između referentnih AFS i onih s pinovima. Kad deformacija AFS-a pređe 70 %, počinje režim zgušnjavanja. Važno je, da se ugrađivanjem pinova u AFS strukturu, povećava ukupni kapacitet apsorpcije energije. Veća količina apsorpirane energije može se prepoznati na samom početku, pri malim vrijednostima deformacije. [14]

AFS s ugrađenim pinovima i odgovarajući numerički model, pod tlačnim opterećenjem, prikazani su na slici 41.



Slika 41. Izvijanje pinova i cijepanje pjene AFS strukture [14]

3.7.1. Iskoristivost apsorpcije energije AFS-a

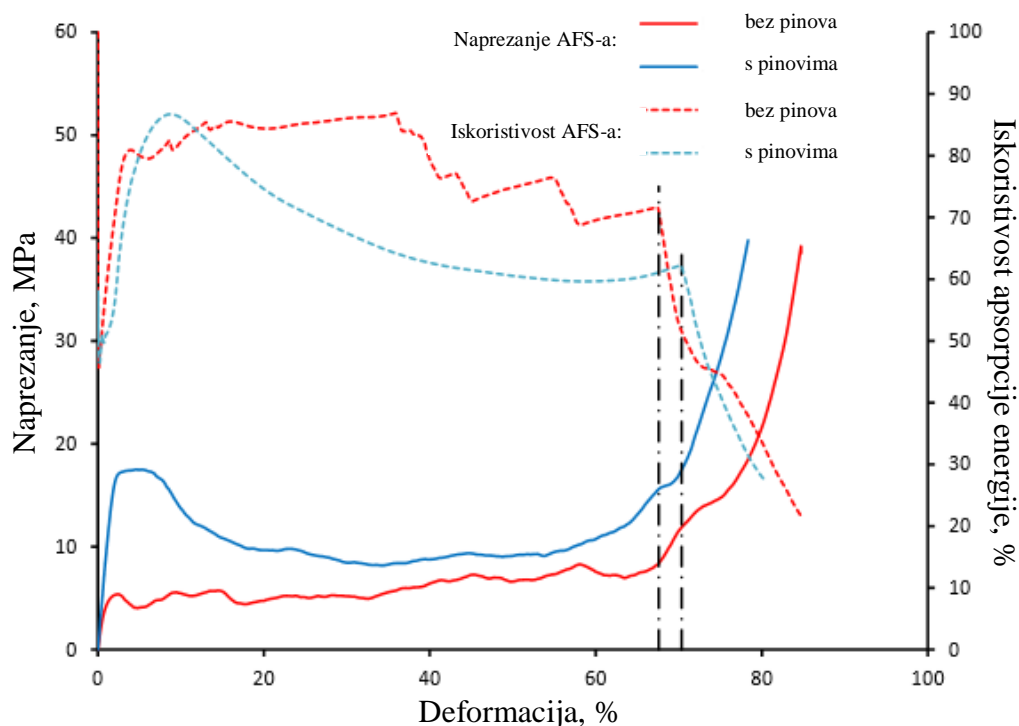
Iskoristivost apsorpcije energije (η) je od velike važnosti za karakterizaciju AFS strukture. Kao i u slučaju same aluminijske pjene, iskoristivost se definira kao omjer energije koju deformiranjem apsorbira AFS struktura i energije koju apsorbira idealni apsorber energije. To se može izraziti sljedećom jednadžbom:

$$\eta = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_{\max}(\varepsilon)} \quad (18)$$

gdje je σ nominalno naprezanje, ε nominalna deformacija, a σ_{\max} maksimalno nominalno naprezanje do deformacije zgušnjavanja (ε_D). [14]

Krivulje iskoristivosti AFS-a prikazane su na slici 42. Njihov prvi lokalni maksimum odgovara deformaciji kod granice tečenja, a posljednji lokalni maksimum deformaciji zgušnjavanja. Može se uočiti da je glađa plava krivulja iskoristivosti zbog kontinuiranog izvijanja pinova uslijed tlačnog opterećenja. Isprekidane crne linije na slici prikazuju vrijednosti deformacijskog zgušnjavanja. Tu se vidi blago povećanje u korist AFS-a s pinovima. Evidentno je da se, ugrađivanjem pinova, povećava iskoristivost apsorpcije energije u ovom slučaju. Mjera za poboljšanje apsorpcije energije (EAI, *eng. energy absorption improvement*) može se definirati donjim izrazom gdje (p) u indeksu predstavlja ugrađene pinove u AFS strukturu. [14]

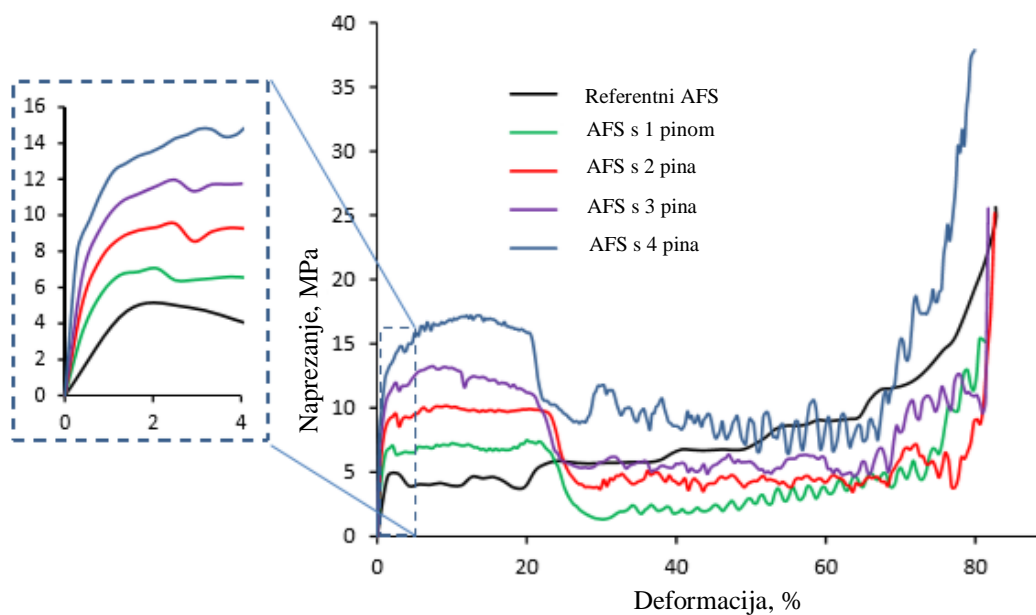
$$EAI = \frac{E_{AFS(p)} - E_{AFS}}{E_{AFS}} = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma_{AFS(p)} d\varepsilon - \int_0^{\varepsilon} \sigma_{AFS} d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon} \sigma_{AFS} d\varepsilon} \quad (19)$$



Slika 42. Krivulje iskoristivosti apsorpcije energije AFS strukture [14]

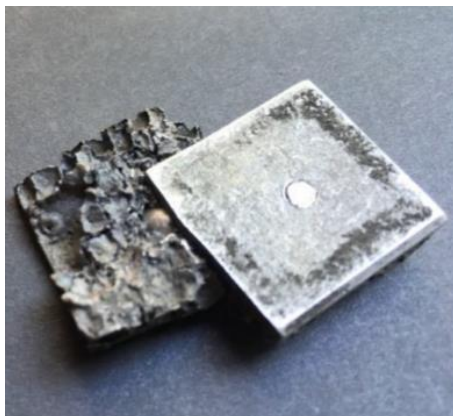
3.7.2. Utjecaj broja i rasporeda pinova u AFS strukturi

Stabilnost AFS strukture generalno se povećava s povećanjem broja pinova i njihovim pravilnim rasporedom. Dijagram na slici 43. pokazuje kako vrijednost naprezanja značajno opada za sve navedene kombinacije. To se događa nakon granice tečenja, odnosno nakon izvijanja pinova. Naime, taj se pad ipak smanjuje s povećanjem broja pinova, a time je i granica stlačivanja na većoj razini. [14]



Slika 43. Utjecaj rasporeda pinova na apsorpciju energije AFS-a [14]

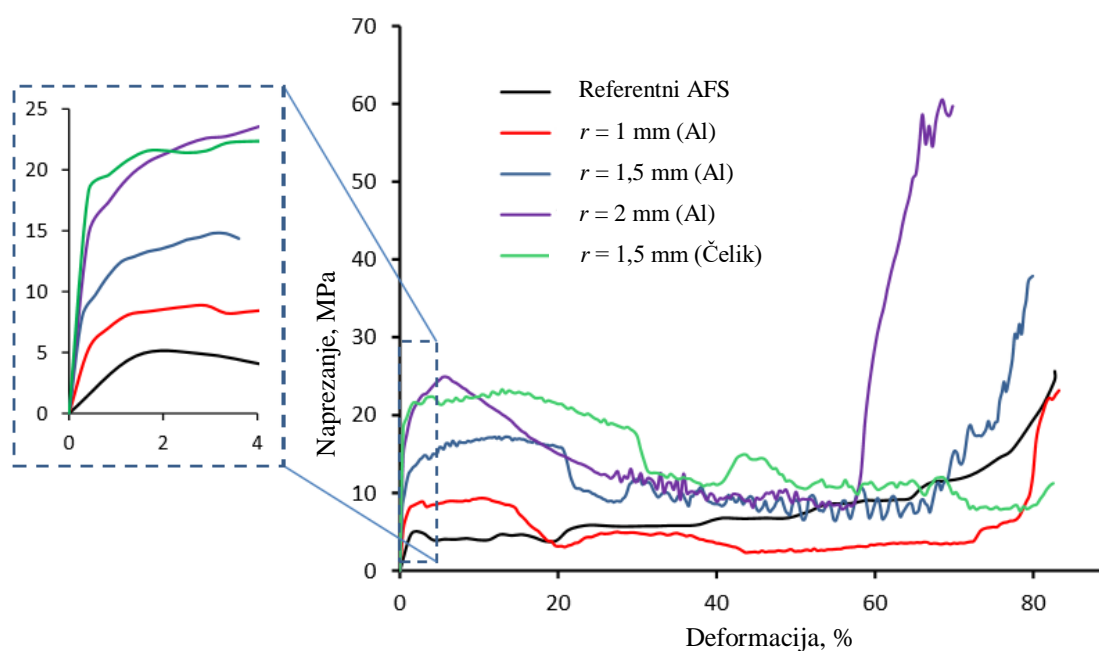
Ako se radi o simetričnom presjeku AFS-a, raspored od 4 pina u strukturi daje najbolje rezultate u eksploataciji. Dijagram također pokazuje kako su modeli s 1 pinom notorno nestabilni pri tlačnom opterećenju. Gornja i donja pokrovna ploča kliznu jedna na drugu u smjeru izvijanja pina, tj. izvan glavne osi opterećenja (slika 44.). [14]



Slika 44. AFS s 1 pinom nakon djelovanja tlačnog opterećenja [14]

3.7.3. Utjecaj veličine pina

Variranjem veličine, a isto tako i materijala ugrađenih pinova, utječe se na ponašanje AFS strukture uslijed udarnog, odnosno tlačnog opterećenja. S povećanjem veličine pina, raste modul elastičnosti i granica tečenja sendviča. Između ostaloga, u dijagramu na slici 45. uspoređuje se utjecaj aluminijskih i čeličnih pinova. U promatranim sendvičima, s 4 ugrađena pina, znatno krući čelični pinovi više utječu na povećanje krutosti cjelokupne strukture u odnosu na aluminijske jednakog radijusa. Deformacija zgušnjavanja obrnuto je proporcionalna polumjeru pina. [14]



Slika 45. Utjecaj veličine i materijala pinova na apsorpciju energije AFS-a [14]

4. UTJECAJ TOPLINSKE OBRADJE PREKURSORA

Od svih postupaka za proizvodnju aluminijskih pjena, najviše se primjenjuje metoda proizvodnje putem metalurgije praha, odnosno tehnologija plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi. Taj proces proizvodnje prethodno je opisan u poglavlju 2.1. ovoga rada. Poznato je da ova metoda predstavlja inicijalnu, anizotropnu ekspanziju u krutom i polukrutom stanju što ima negativan utjecaj na upjenjavanje, a time i na kvalitetu konačne ćelijaste strukture. Ova rana ekspanzija uglavnom je uzrokovana neusklađenošću temperature razgradnje agensa TiH_2 i tališta aluminijske legure (ili bilo koje njegove legure). Posljedice toga su stvaranje izduženih pukotina u krutom materijalu prekursora, anizotropija pora promjenjivih veličina i defekti u konačnoj pjenu. Spomenute pukotine i njihova evolucija u direktnoj su korelaciji s anizotropijom u mikrostrukturi materijala prekursora, induciranoj tijekom koraka zbijanja praha u procesu proizvodnje. Toplinska obrada jedna je od strategija kojom se suzbija ili smanjuje veličina inicijalne ekspanzije i/ili njezino anizotropno ponašanje. Znanstvenik Jaime Lazáro i njegovi suradnici, u svojim istraživanjima, proučavali su utjecaje ove tehnike naknadne obrade na mikrostrukturu prekursora, pjenavost prekursora i na samu kvalitetu ćelijaste strukture proizvedene pjene. U narednim poglavljima (4.1. i 4.2.) prikazat će se rezultati tih istraživanja, a u eksperimentalnom dijelu ovoga rada, istražiti će se utjecaj toplinske obrade na svojstvo apsorpcije energije aluminijske pjene.

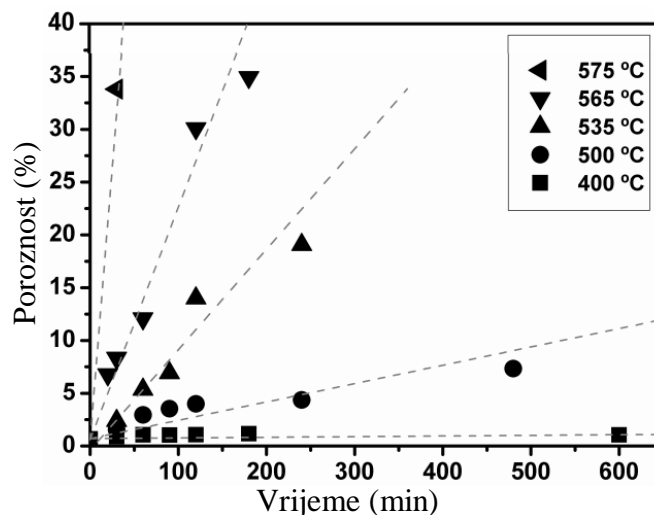
4.1. Utjecaj TO prekursora na ekspanziju i konačnu ćelijastu strukturu Al pjene

Istraživanje je provedeno na prekursorima u obliku ekstrudiranih traka, poprečnog presjeka $20 \times 5 \text{ mm}^2$. Prekursori su izrađeni od $AlSi10$ legure, kao elementarnog praha, u kombinaciji s 0,8 % masenog udjela praha TiH_2 . Trake prekursora duljine 15 cm uvedene su u prethodno zagrijanu peć na odabranoj temperaturi i držane u njoj određeno vrijeme. Potom je slijedilo vađenje iz peći i hlađenje do sobne temperature. Temperature toplinske obrade kretale su se od 400°C do 575°C , a vremena zadržavanja bila su između 0,25 h i 10 h. Solidus temperatura legure (577°C) nikada nije postignuta, čime se prekursor zadržava u krutom stanju. Međutim, kako se temperatura obrade povećavala, vrijeme zadržavanja se smanjivalo. Time se pokušalo izbjeći stvaranje previše plina i/ili mogućih gubitaka te prerane ekspanzije uslijed pretjeranog omekšavanja materijala. Nakon provedenih toplinskih obrada, prekursori su analizirani kako bi se procjenile promjene inducirane u makrostrukturi (poroznost), mezostrukturi (stvaranje pukotina) i mikrostrukturi (promjene u kristalografskoj teksturi). Njihovo upjenjavanje proučavano je pomoću rendgenske radioskopije. Na kraju je analizirana i kvaliteta krute ćelijaste strukture. [15]

4.1.1. Utjecaj na mikrostrukturu prekursora

4.1.1.1. Inicijalna poroznost

Prva uočljiva posljedica toplinske obrade je promjena gustoće prekursora. Slika 46. prikazuje izmjerene vrijednosti poroznosti ($1 - \rho/\rho_s$) nakon svake toplinske obrade.

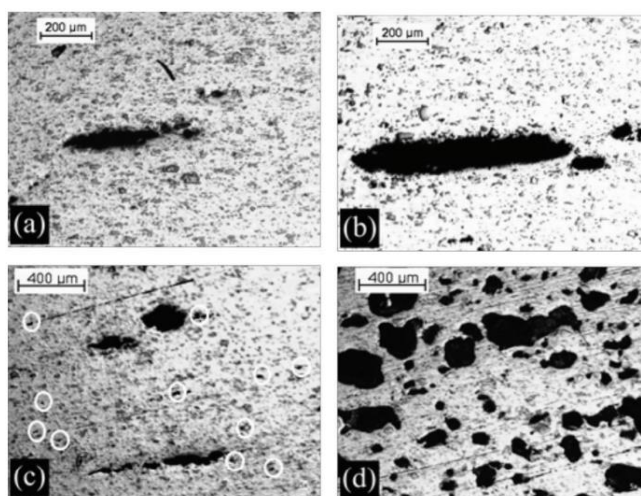


Slika 46. Poroznost inducirana u materijalu prekursora nakon TO [15]

Može se primijetiti da je do temperature od 500°C poroznost prekursora vrlo niska i usporediva s neobrađenim prekursorima. Međutim, kako se temperatura obrade povećava, također se povećava i poroznost. Za temperature (565°C i 575°C) koje su blizu solidus temperature, stvaranje poroznosti je tako brzo da se, zapravo, već može dobiti pjenasti materijal ($P > 30\%$). [15]

4.1.1.2. Stvaranje pukotina

Spomenuta promjena gustoće potječe od pukotina nastalih ranim raspadanjem TiH_2 dok je materijal još u krutom stanju. Izgled pukotina nakon različitih obrada prikazan je na slici 47.



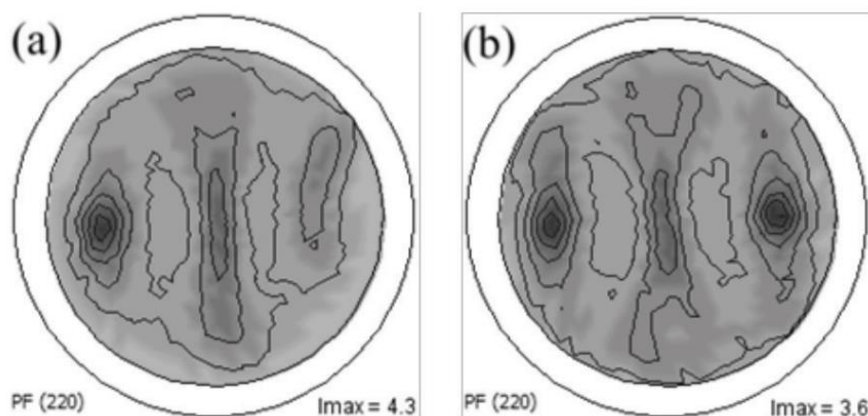
Slika 47. Pukotine nakon TO: a) 535°C, 2 h; b) 535°C, 4 h; c) 565°C, 1 h; d) 565°C, 2 h [15]

Za niske temperature obrade (535°C), pukotine imaju izduženi oblik u smjeru ekstrudiranja prekursora (slika 47a.). Pukotine se povećavaju s vremenom držanja u peći, ali zadržavaju izduženi oblik (slika 47b.). Morfologija pukotina se potpuno mijenja kada se temperatura obrade podešava bliže solidus temperaturi legure. Iako se pri 565°C mogu naći i neke izdužene pukotine, tendencija je dobivanja manjih i kružnijih pukotina (neke od njih označene su kružićima na slici 47c.). Takva tendencija može se bolje primijetiti kada se vrijeme držanja poveća na istoj temperaturi (slika 47d.). [15]

Navedene razlike u pukotinama mogu se objasniti uzimajući u obzir smanjenje mehaničkih svojstava materijala prekursora kada temperatura obrade dosegne vrijednosti bliže solidus temperaturi. To omogućava da se mikrostruktura metala bolje prilagodi generiranom unutarnjem tlaku plina i da se raspodijeli u više inicijalnih kružnih pukotina, nego kod obrade na nižim temperaturama gdje je čvrstoća matrice još uvijek velika. [15]

4.1.1.3. Promjena teksture

Budući da su unutarnja kristalografska anizotropija prekursora i njihovo ponašanje tijekom polukrute ekspanzije povezani s međučestičnom čvrstoćom i njenom raspodjelom, za prepostaviti je da će se tekstura materijala mijenjati tijekom procesa obrade. Kako bi se procijenila ova hipoteza, provedena je analiza teksture materijala prekursora pomoću Bruker-ovog difraktometra. Rezultate analize prikazuje slika 48. [15]

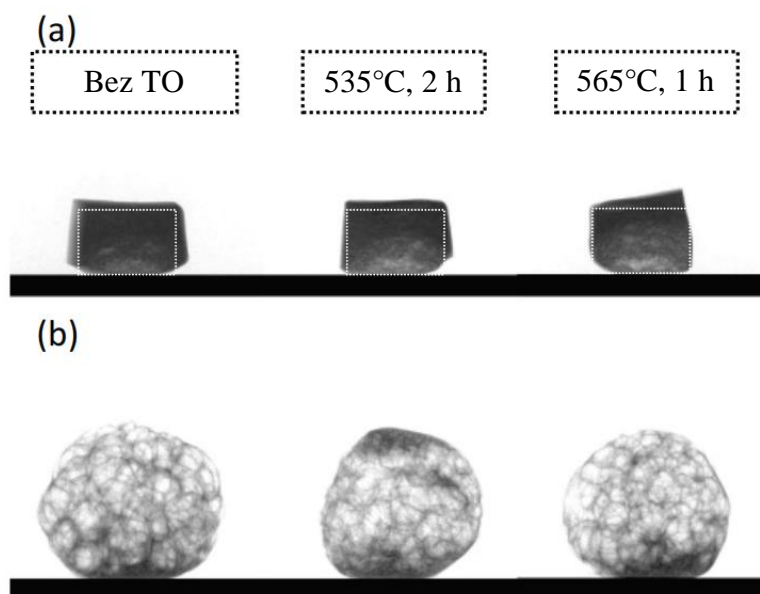


Slika 48. Rezultati analize Bruker-ovim difraktometrom:
a) neobrađeni uzorak b) uzorak toplinski obrađen pri 565°C , 1 h [15]

Može se zaključiti da toplinska obrada ne mijenja tip teksture materijala u ovom slučaju, ali ipak postoje neke male razlike. Intenzitet cijelog uzorka, posebno u vršnim zonama, smanjuje se nakon toplinske obrade što sugerira smanjenje teksture. S druge strane, primjećuje se porast volumnog udjela prekursora bez teksture. Simetrija na slici 48b. jasan je pokazatelj veće homogenosti. Dakle, povezivanje između čestica postalo je homogenije (izotropnije) unutar prekursora nakon toplinske obrade. [15]

4.1.2. Utjecaj na pjenavost

Slika 49. prikazuje rezultate ispitivanja pjenjenja radioskopijom. Ekspanzija prekursora (pogled na presjek) u polukrutom stanju može se promatrati na slici 49a. gdje je označen njegov početni oblik. Neobrađeni prekursor pokazuje veću ekspanziju u smjeru visine i bočno. Već je poznato da ekspanzija ne djeluje u smjeru ekstrudiranja traka prekursora. Kako se temperatura obrade povećava, inicijalna ekspanzija u polukrutoj fazi se smanjuje, težeći ka više izotropnom ponašanju, barem bočno. U slučaju prekursora toplinski obrađenog pri 565°C tijekom 1 h, rana ekspanzija odvija se samo u smjeru visine. [15]



Slika 49. Radioskopske slike (pogled na presjek) za dvije faze postupka pjenjenja:
a) ekspanzija u polukrutom stanju b) ekspanzija u tekućem stanju [15]

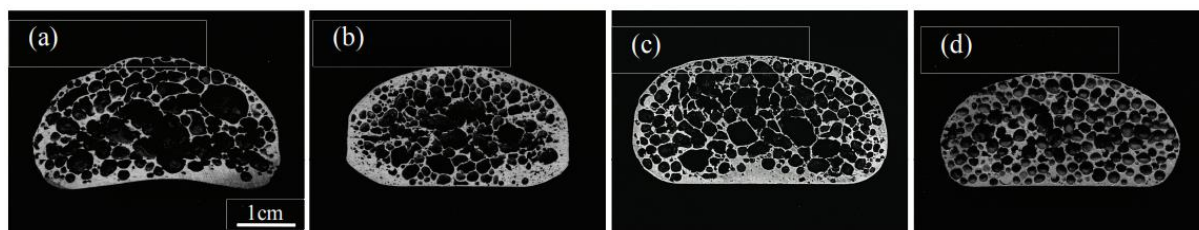
Ova promjena u inicijalnoj ekspanziji povezana je s gubitcima plina tijekom toplinske obrade kojima su uzrok pukotine u blizini površine. S druge strane, promjene inducirane u mikrostrukturi uzrokovale bi da plin, koji se oslobađa unutar obrađenih uzoraka tijekom zagrijavanja u procesu pjenjenja, ide u već nastale pukotine. Dakle, smanjuje se tendencija stvaranja novih pukotina, a time i negativnih posljedica koje se javljaju u neobrađenom uzorku. [15]

Što se tiče kasnije ekspanzije u tekućem stanju (slika 49b.), može se primijetiti da neobrađeni prekursor ima veće pore. Kod prekursora obrađenog pri 535°C tijekom 2 h, ekspanzija pjene prisutnija je u donjem dijelu uzorka. Također, ovaj uzorak prikazuje neupjenjene dijelove na vrhu i na dnu. To je posljedica spomenutih mogućih gubitaka plina kroz međusobno povezane pukotine u blizini površine tijekom toplinske obrade. U slučaju prekursora obrađenog pri 565°C tijekom 1 h, ekspanzija pjene slična je veličini ekspanzije neobrađenog prekursora, ali sferičnijeg je izgleda. Uz to, unutarnja struktura posjeduje sve više manjih pora koje u principu imaju kružniji oblik. [15]

4.1.3. Utjecaj na ćelijastu strukturu

Da bi se procjenila konačna ćelijasta struktura, jedan komad svake vrste obrađenog prekursora (duljine 4 cm) upjenjen je pod istim uvjetima. Uveden je u prethodno zagrijanu peć na 710°C i držan je tamo 9 minuta. Potom je izvađen i ohlađen uporabom komprimiranog zraka od 5 bara do potpunog skrućivanja. [15]

Slika 50. prikazuje presjeke pjena proizvedenih nakon različitih toplinskih obrada prekursora koji su upjenjeni pod istim, gore navedenim uvjetima.

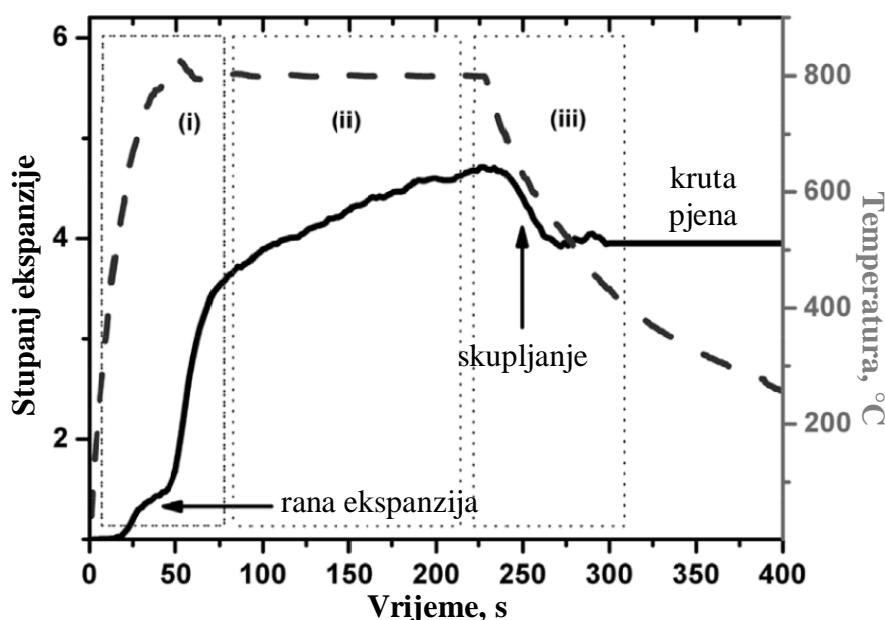


Slika 50. Presjeci pjena proizvedenih nakon različitih TO prekursora:
a) neobrađeni prekursor b) 500°C, 8 h c) 535°C, 2 h d) 565°C, 1 h [15]

Karakterizacija ćelijaste strukture izvršena je softverom za analizu slike nakon rezanja uzoraka na pola. Pjene proizvedene od neobrađenog prekursora (slika 50a.) pokazuju tipične defekte za ovu vrstu materijala, kao što su velike i/ili izdužene pore, nedostatak stijenki ćelija, itd. Upotrebom prekursora obrađenog pri 500°C tijekom 8 h, postignuta je pjena s manjim porama, iako sa sličnim nepravilnim oblikom, ali i nedostatcima (slika 50b.). Također, može se primijetiti prisutnost neupjenjene zone u blizini površine zbog spomenutih gubitaka plina. Ekspanzijom prekursora obrađenog pri 535°C tijekom 2 h, dobiva se struktura pjene s manjom neupjenjenom zonom i manjim nedostatkom stijenki ćelija (slika 50c.). Međutim, i dalje je prisutna anizotropija pora nepravilnih oblika. Konačno, upjenjavanjem prekursora obrađenog pri 565°C tijekom 1 h, nastala pjena (slika 50d.) ima ćelijastu strukturu bolje kvalitete. U ovom slučaju nema neupjenjenih zona što je posljedica bolje nukleacije pukotina u fazi obrade prekursora. Radi se o malim pukotinama kružnog oblika koje nisu međusobno povezane i stoga ne promoviraju gubitak plina prema van. U usporedbi s ostalim pjenama na slici 50., ova pjena posjeduje pore manje veličine i znatno kružnijeg oblika. [15]

4.2. Optimizacija ćelijaste strukture toplinskom obradom prekursora i promjenom uvjeta hlađenja na kraju procesa pjenjenja

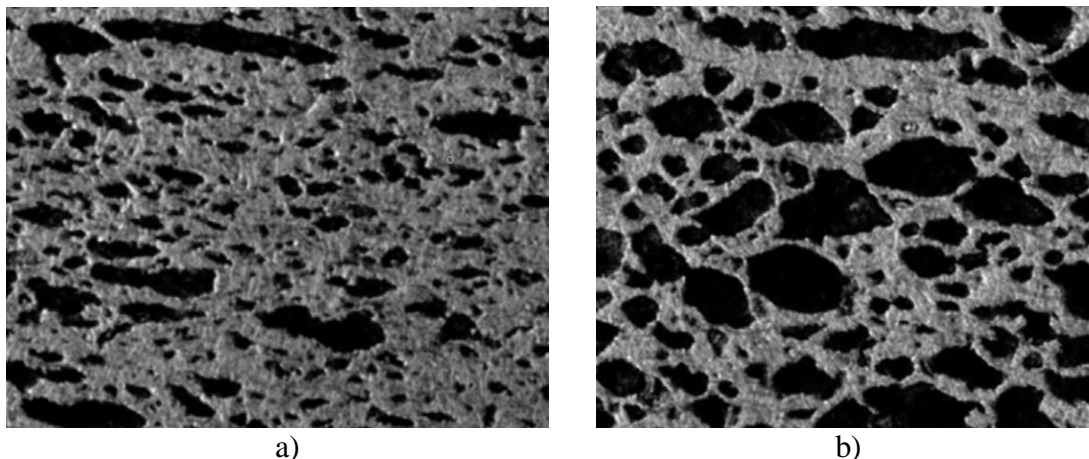
U dotičnom istraživanju, Lazáro i njegovi suradnici imaju za cilj pronalaženje parametara koji utječu na stvaranje defekata u ćelijastoj strukturi aluminijske pjene. Budući da strukturni defekti (nepravilnosti u morfologiji pora, neupjenjene zone, nedostatak stijenki ćelija ili pukotine između pora) nastaju kao posljedica neoptimalne kontrole proizvodnog procesa, potrebno je proučiti različite faze tijekom izrade Al pjene. Te faze prikazuje slika 51. na kojoj se nalazi tipična krivulja ekspanzije volumena toplinski neobrađenog prekursora. Prekursor, na bazi AlSi10 legure s 0,8 % TiH₂, zagrijava se do 800°C brzinom od 16 K/s, drži na toj temperaturi 3 minute te se hladi na zraku (-7 K/s) do skrućivanja. Ovo istraživanje usredotočeno je na prvu i zadnju fazu procesa pjenjenja s ciljem prepoznavanja glavnih uzroka defekata u svakom pojedinom slučaju. [16] Dakle, autori, ovaj puta kombinacijom proučavanja inicijalne ekspanzije i faze skrućivanja, proširuju spoznaje iz prethodnog istraživanja.



Slika 51. Različite faze tijekom izrade Al pjene:

(i) zagrijavanje i inicijalna ekspanzija, (ii) ekspanzija u tekućem stanju, (iii) skrućivanje [16]

U prethodnom istraživanju, utvrđeno je da rana ekspanzija pokazuje anizotropno ponašanje. Uz to, ustanovljeno je da postoji izravna korelacija između veličine anizotropije rane ekspanzije (EA) i veličine konačne anizotropije ćelija (CA). Vjeruje se da je prisutnost izduženih pukotina u određenom smjeru u inicijalnom prekursoru (slika 52.), ključ za objašnjenje spomenute korelacije. Prema tome, prvi dio istraživanja posvećen je analizi materijala prekursora, njegovoj anizotropiji koja potencijalno utječe na EA i CA te mogućnostima njihovog reduciranja. [16]



Slika 52. Prekursor nakon ekspanzije u polukrutoj fazi (a) i anizotropija ćelija pjene (b) [16]

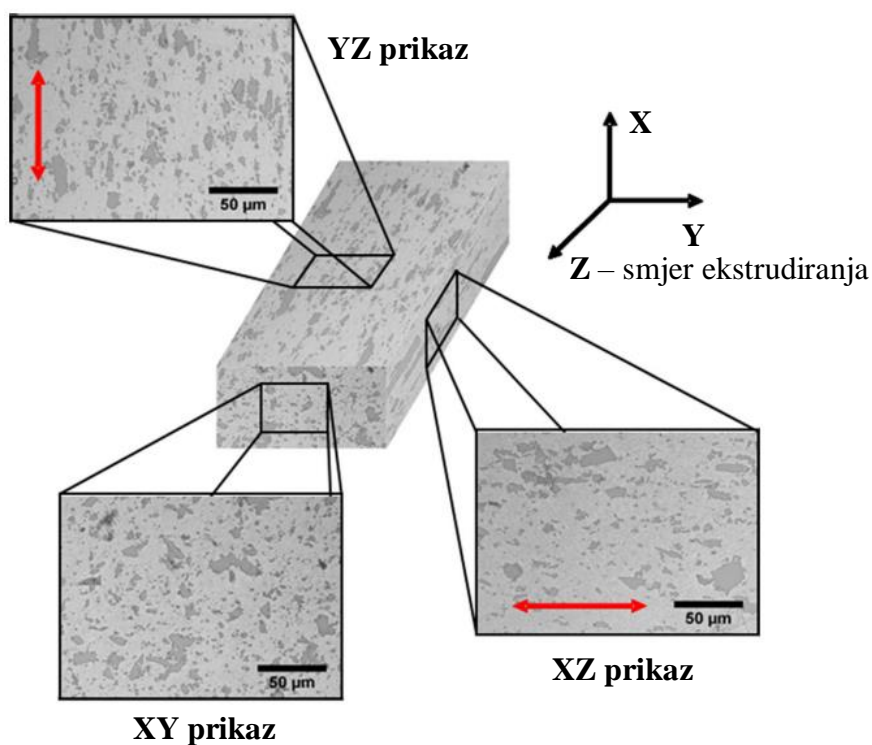
Što se tiče posljednje faze procesa pjenjenja (slika 51.(iii)), jedna od glavnih karakteristika je da materijal pokazuje skupljanje uslijed smanjenja temperature i promjene volumena tijekom faznog prijelaza. Ova pojava uzrokuje stanjivanje stijenki ćelija i potiče pucanje postojećih mjehurića. Ako dođe do puknuća dok je materijal još u tekućem stanju, velika fluidnost materijala pomaže brzom preslagivanju mjehurića i ne dolazi do oštećenja u strukturi. Međutim, ako se puknuće dogodi kada je materijal u polukrutom stanju, preslagivanje se usporava zbog manje fluidnosti materijala i slomljene stijenke ćelija ostaju u konačnoj krutoj strukturi pjene. Nastale pukotine u stijenkama ćelija djeluju kao slabe točke tijekom mehaničkog ispitivanja naprezanja i stoga, smanjuju čvrstoću i žilavost pjene. Upravo zbog toga, drugi dio ovog istraživanja usmjeren je na povećanje znanja o glavnim parametrima proizvodnje koji utječu na nastanak slomljenih stijenki ćelija u konačnoj ćelijastoj strukturi. Cilj je bio pronaći način na koji se može upravljati tim parametrima kako bi se poboljšala kvaliteta strukture pjene. [16]

U ovom istraživanju, analizirane su pjene proizvedene od prekursora istog oblika i sastava kao u prethodnom istraživanju. Mikrostruktura materijala prekursora utvrđena je optičkim mikroskopom, a ponašanje ekspanzije tijekom procesa pjenjenja promatrano je rendgenskom radioskopijom. Karakterizacija strukture pjene izvedena je pomoću nerazorne tehnike, rendgenske računalne mikrotomografije (μ CT). Nakon 3D rekonstrukcije i analize, dobiveni su podaci o ćelijastoj strukturi i njezinim oštećenjima. Komplementarno mikrotomografiji, proučavanje međusobno povezanih pora izvršeno je i pomoću plinske piknometrije. Ova tehnika određuje volumni udio uzorka koji je međusobno povezan, odnosno omogućuje izračunavanje povezanosti pora. [16]

4.2.1. Evaluacija stvaranja defekata u ranoj fazi pjenjenja

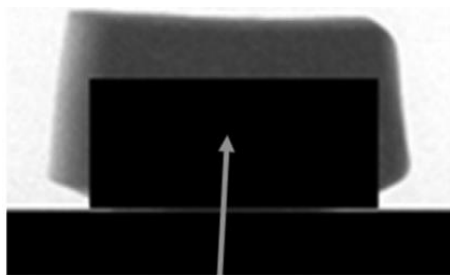
4.2.1.1. Unutarnja anizotropija mikrostrukture prekursora

Da bi se razumio proces pjenjenja u ranim fazama, potrebna je inicijalna karakterizacija materijala prekursora. Slika 53. prikazuje shemu prekursora u obliku trake ekstrudirane u smjeru osi Z.



Slika 53. Orijentacija čestica silicija u mikrostrukтури prekursora na bazi AlSi10 [16]

Može se primijetiti kako su čestice Si homogeno raspoređene unutar Al matrice, ali su visoko orijentirane u smjeru ekstrudiranja. Njihova orijentacija označena je crvenim strelicama na prikazima XZ i YZ. Uspoređujući sliku 53. i narednu sliku 54., može se uočiti da je rana ekspanzija veća u smjeru X koji je pretrpio najveću tlačnu deformaciju tijekom postupka zbijanja praha. Rana ekspanzija je manja u smjeru Y koji je također podnio tlačnu deformaciju. Smjer ekstrudiranja, Z ne pokazuje prisutnost rane ekspanzije. Stoga, čini se da bi mogla postojati izravna korelacija između anizotropije mikrostrukture prekursora i anizotropije rane ekspanzije. [16]



Slika 54. Rana ekspanzija prekursora (XY prikaz, strelica označava inicijalni prekursor) [16]

4.2.1.2. Utjecaj toplinske obrade prekursora na ekspanziju i ćelijastu strukturu

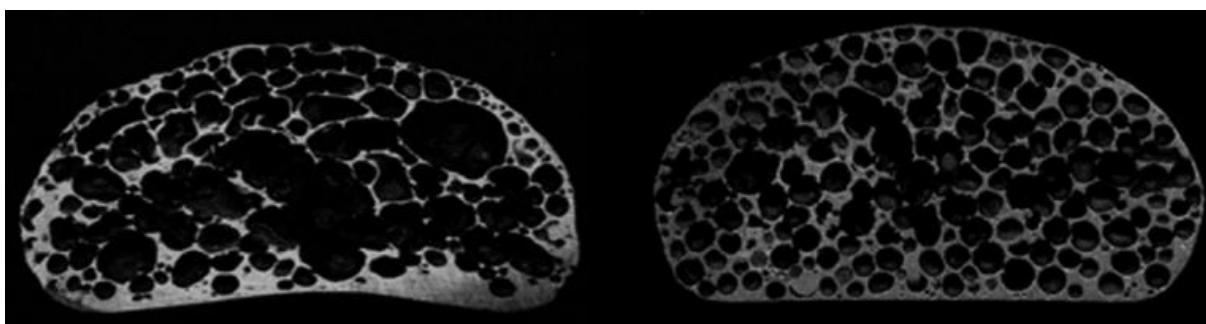
Kako bi se modificirala anizotropija mikrostrukture prekursora i provjerio utjecaj na konačnu pjenu, prekursor je bio 1 h izložen toplinskoj obradi na temperaturi blizu svoje solidus temperature. Obrada inducira malu ekspanziju materijala (10 % poroznosti), ali njegova mikrostruktura zadržava anizotropni aspekt što je utvrđeno optičkim mikroskopom. Kada usporedimo rezultate radioskopske analize (slika 55.) s dobivenima za neobrađeni prekursor (slika 54.), može se uvidjeti da toplinska obrada značajno smanjuje ranu ekspanziju. [16]



Slika 55. Rana ekspanzija prekursora nakon TO (XY prikaz, strelica označava inicijalni prekursor) [16]

Ovaj rezultat sugerira da je toplinska obrada poboljšala međusobno vezivanje čestica. Budući da obrađeni prekursor ne pokazuje bočnu ekspanziju, toplinska obrada mora utjecati i na usmjerenost međusobnog vezivanja čestica, čime se homogenizira mikrostruktura. [16]

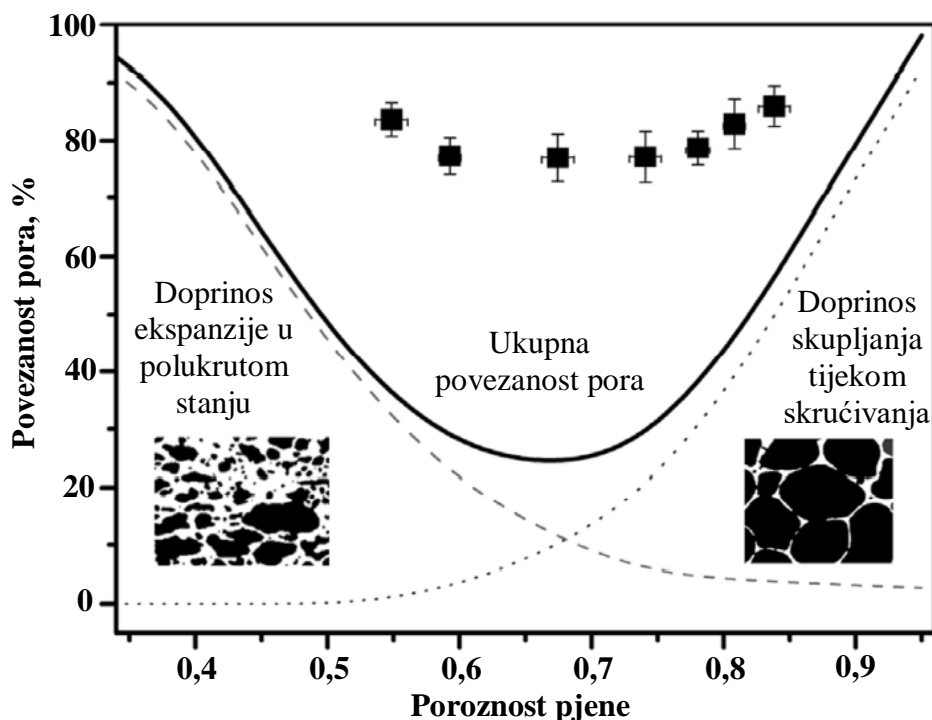
Na slici 56. može se vidjeti razlika u ćelijastim strukturama kada se toplinski neobrađeni i obrađeni prekursor upjene pod istim uvjetima (9 minuta pri 710°C + hlađenje komprimiranim zrakom od 5 bara). Neobrađeni prekursor stvara pjenu s tipičnim defektima, dok obrađeni prekursor generira pjenu bolje kvalitete, bez neupjenjenih zona te s kružnijim porama manje veličine. Što se tiče nedostatka stijenki ćelija, može se vidjeti neko poboljšanje, ali ne puno. Ova vrsta defekta analizirala se u sljedećem dijelu ovog istraživanja. [16]



Slika 56. Ćelijaste strukture pjene generirane od toplinski neobrađenog (lijevo) i obrađenog prekursora (desno) [16]

4.2.2. Evaluacija stvaranja defekata tijekom faze skrućivanja

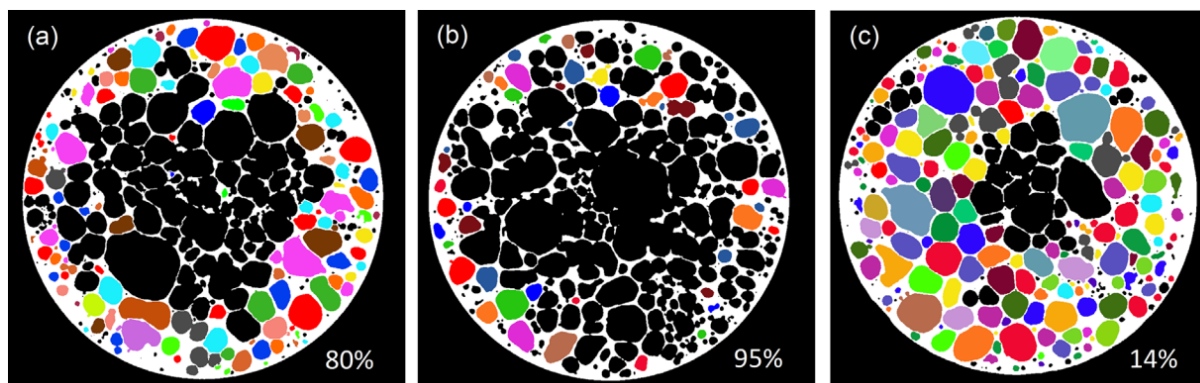
Slika 57. prikazuje rezultate mjerenja stupnja povezanosti pora pomoću plinske piknometrije nad skupinom pjena različitih poroznosti, ali proizvedenih pod istim uvjetima. Pjene su proizvedene unutar cilindričnog čeličnog kalupa pri temperaturi od 710°C, a hlađenje komprimiranim zrakom od 6 bara prouzročilo je brzinu skrućivanja od -1,7 K/s u središtu pjene. [16]



Slika 57. Ovisnost povezanosti pora s poroznošću pjene [16]

Svi uzorci pokazuju visoku povezanost pora i može se vidjeti paraboličan trend prema njihovoj poroznosti. Takav trend može se objasniti doprinosom dva mehanizma. Pri niskim poroznostima, odnosno pri ranoj ekspanziji u krutom ili polukrutom stanju, ekspanzirani prekursor pokazuje značajnu količinu izduženih pukotina/pora koje su uglavnom međusobno povezane. Kako materijal više ekspanzira u tekućem stanju, te pore poprimaju kružni oblik, a međusobne veze postupno nestaju. Time se objašnjava smanjenje povezanosti pora s poroznošću. S druge strane, kako materijal ekspanzira, debljina filmova stijenki ćelija koji odvajaju susjedne mjehuriće se smanjuje. Vrlo vjerojatno je da će stijenke pretrpjeti puknuće tijekom faze skrućivanja. [16]

Na slici 58. nalazi se unutarnja ćelijasta struktura pjena jednake relativne gustoće ($\rho/\rho_s = 0,24$) koje su skrućivane različitim brzinama mijenjanjem vanjskog rashladnog medija. To su zapravo mikrotomografski presjeci na sredini visine cilindričnih uzoraka.



Slika 58. Unutarnja ćelijasta struktura pjena skrućivanih različitim brzinama:
a) -1,7 K/s, povezanost pora 80 %; b) -0,7 K/s, povezanost pora 95 %;
c) -15 K/s, povezanost pora 14 % [16]

3D analiza, korištenjem određenog softvera, omogućila je identificiranje izoliranih pora i njihovo odvajanje od područja međusobno povezanih pora. To je realizirano pridruživanjem svakoj pori različitu boju ako je izolirana i ostavljajući je crnom ako je pora povezana sa susjednom porom ili vanjskim područjem. Može se vidjeti da se većina međusobnih veza uglavnom nalazi u unutarnjem dijelu uzorka, što odgovara zonama s manjom gustoćom kojima je trebalo više vremena da se skrutnu. To sugerira mogući utjecaj brzine hlađenja na stvaranje povezanosti pora. Prva pjena na slici 58., hlađena je komprimiranim zrakom od 6 bara, a druga komprimiranim zrakom od 1 bar. Treća pjena gašena je vodom čime je ostvarena najveća brzina skrućivanja. Povećanjem brzine skrućivanja, ćelijasta struktura, u smislu veličine i oblika pora, znatno se ne mijenja. Međutim, evidentno je da je područje međusobno povezanih pora sve manje, što se vidi i po izračunatom stupnju povezanosti pora. [16]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom dijelu rada, cilj je bio ispitati utjecaj toplinske obrade prekursora na apsorpcijska svojstva aluminijskih pjena proizvedenih tehnologijom plinom oslobođenih čestica otopljenih u čvrstoj fazi.

5.1. Toplinska obrada prekursora

Prekursori su dobiveni ekstrudiranjem mješavine $AlMgSi_{0,6}$ legure, kao elementarnog praha u kombinaciji s 0,4 % masenog udjela praha TiH_2 . Nakon toga, dio prekursora izložen je toplinskoj obradi pri dvije različite temperature tijekom dva različita vremena držanja. Konkretnije, toplinske obrade bile su provedene pri $535^{\circ}C$ (2 h) i $565^{\circ}C$ (1 h) u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na slici 59. nalaze se prekursori pripremljeni za toplinsku obradu, a slika 60. prikazuje ih u korištenoj peći. Dimenzije prekursora u obliku pločica bile su $75 \times 20 \times 5$ mm.

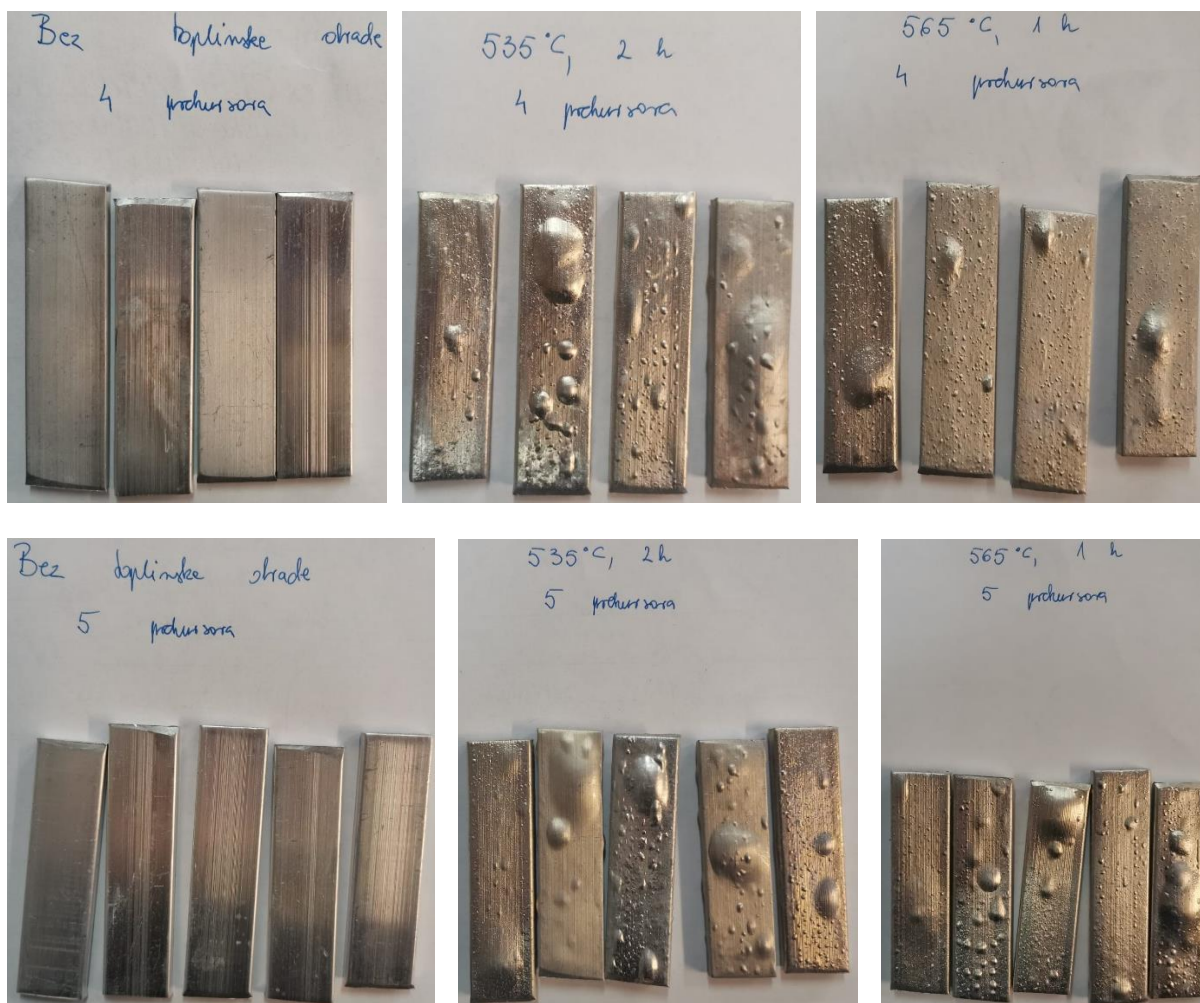


Slika 59. Prekursori



Slika 60. Prekursori u peći za toplinsku obradu

Na slici 61. nalaze se toplinski obrađeni i neobrađeni prekursori koji su namijenjeni za proces upjenjavanja. Može se primijetiti da je toplinska obrada inducirala malu ekspanziju materijala koja je uzrokovala pojavu poroznosti u obrađenim prekursorima.



Slika 61. Prikaz toplinski obrađenih i neobrađenih prekursora

5.2. Izrada uzoraka aluminijske pjene

Gore prikazani prekursori upjenjeni su u Laboratoriju za polimere i kompozite. Proizvodnja uzoraka aluminijske pjene temeljila se na upjenjavanju 4, odnosno 5 prekursora u cilindričnom čeličnom kalupu pri temperaturi od 725°C . Vrijeme upjenjavanja bilo je oko 10 minuta, ali treba napomenuti da se ono postupno smanjivalo s ponavljanjem procesa za svake iduće prekursora, tako da je vrijeme upjenjavanja pri trećem ponavljanju procesa bilo 9 minuta. Prvi razlog skraćivanja vremena može biti utjecaj temperature kalupa jer je isti korišten za izradu svih uzoraka pa se nije stigao ohladiti na sobnu temperaturu prije svakog idućeg upjenjavanja. Time se novi prekursori već počinju zagrijavati u kalupu prije nego je on ubačen u peć. Budući da su prvo upjenjeni toplinski neobrađeni prekursori, drugi razlog kraćeg vremena procesa može biti redosljed upjenjavanja prekursora. Prema tome, postoji mogućnost da toplinska obrada prekursora utječe na njihovo vrijeme upjenjavanja, odnosno ubrzava proces.

Slika 62. prikazuje cilindrični čelični kalup u kojem se nalaze toplinski neobrađeni prekursori.



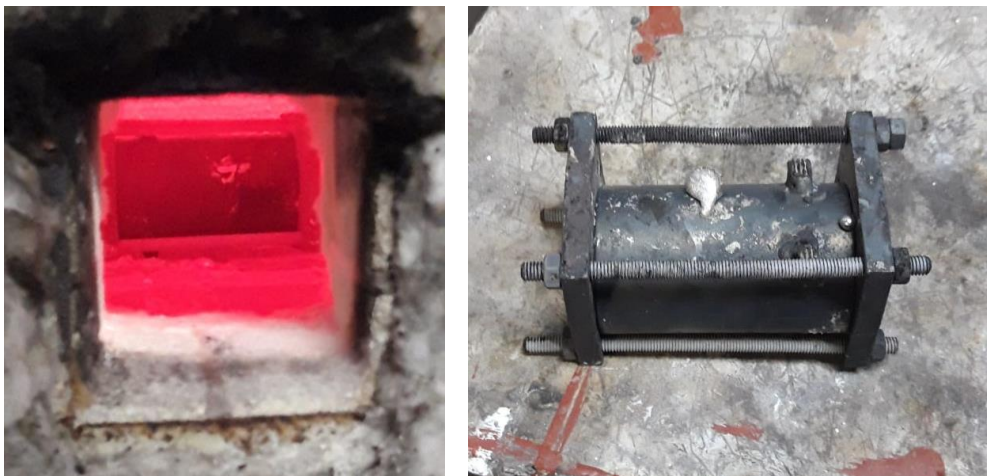
Slika 62. Toplinski neobrađeni prekursori u kalupu

Na slici 63. može se vidjeti peć u kojoj se provodilo upjenjavanje prekursora u gore prikazanom kalupu.



Slika 63. Kalup u peći

Nakon što je kalup s prekursorima smješten u peć, potrebno je pažljivo promatrati odvijanje procesa kroz otvor na prednjoj strani. Kalup s vremenom poprima crvenu boju, a znak za početak ekspanzije prekursora je pojava tamnih fleka na užarenom kalupu. Potpuno zatamnjeni kalup je indikator da ga je pjena ispunila, a signal za vađenje je višak koji izađe kroz mali provrt na gornjem dijelu ovako postavljenog kalupa (slika 64.).



Slika 64. Užareni kalup u peći (lijevo) i višak pjene na izvađenom kalupu (desno)

Izvađeni kalup hlađen je komprimiranim zrakom kako bi se provela faza skrućivanja pjene. Nakon hlađenja, uzorak pjene vađen je iz kalupa gumenim čekićem i ostavljen da se hladi na sobnoj temperaturi. Jedan od izrađenih uzoraka aluminijske pjene prikazan je na slici 65.



Slika 65. Izrađeni uzorak aluminijske pjene

Izrađeni uzorci označeni su brojevima od 1 do 6, a njihovu masu izmjerenu preciznom vagom te izračunate vrijednosti volumena, gustoće i relativne gustoće prikazuje tablica 2. na idućoj stranici. Formule korištene za računanje spomenutih vrijednosti navedene su i objašnjene prije prikaza same tablice.

Uzorci su cilindričnog oblika sljedećih dimenzija:

- visina (duljina), $l = 79$ mm
- promjer, $d = 41$ mm.

Volumen uzoraka računa se preko sljedeće relacije:

$$V = \frac{d^2 \pi}{4} \times l \quad (20)$$

gdje d i l redom označavaju promjer i visinu uzorka.

Gustoća uzoraka dobija se preko sljedeće formule:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (21)$$

gdje m označava masu, a V volumen uzorka.

Relativna gustoća uzorka pjene je omjer gustoće dobivene pjene i gustoće osnovnog materijala stijenki ćelija, odnosno gustoće aluminija ($\rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3$):

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{Al}} \quad (22)$$

Tablica 2. Ispitni uzorci

		Uzorak	Broj prekursora	Masa uzorka, g	Volumen uzoraka, m ³	Gustoća, kg/m ³	Relativna gustoća	Brzina tlačenja, mm/min
Bez toplinske obrade		1	4	78,81	0,0001043	755,6088	0,279855	60
		2	5	100,19		960,5944	0,355776	
Toplinska obrada	535 °C, 2h	3	4	80,46		771,4286	0,285714	
		4	5	100,39		962,5120	0,356486	
	565 °C, 1h	5	4	80,52		772,0038	0,285927	
		6	5	98,24		941,8984	0,348851	

5.3. Statičko tlačno ispitivanje

Statičko jednoosno tlačno ispitivanje uzoraka aluminijskih pjena provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Ispitivanje je realizirano na univerzalnoj kidalici koja se može vidjeti na slici 66. Najveća tlačna sila koja se može postići ovom kidalicom je 400 kN, a za ispitivanje uzoraka navedenih u tablici 2., sila je varirala od 30 – 60 kN, ovisno o uzorku. Brzina tlačenja bila je 60 mm/min.



Slika 66. Univerzalna kidalica WPM EU 40 mod.

Brzina tlačenja podešava se u programu TIRatest System (slika 67.) koji je povezan s prikazanom univerzalnom kidalicom. Kao rezultat, dobiva se krivulja ovisnosti sile o skraćenju, odnosno krivulja apsorpcije energije za stlačeni uzorak aluminijske pjene.



Slika 67. Program TIRatest System povezan s kidalicom

Izgled svih uzoraka prije tlačenja prikazuje slika 68.



Slika 68. Uzorci prije tlačenja

Slika 69. pokazuje tlačenje uzorka 1.



Slika 69. Tlačenje uzorka 1

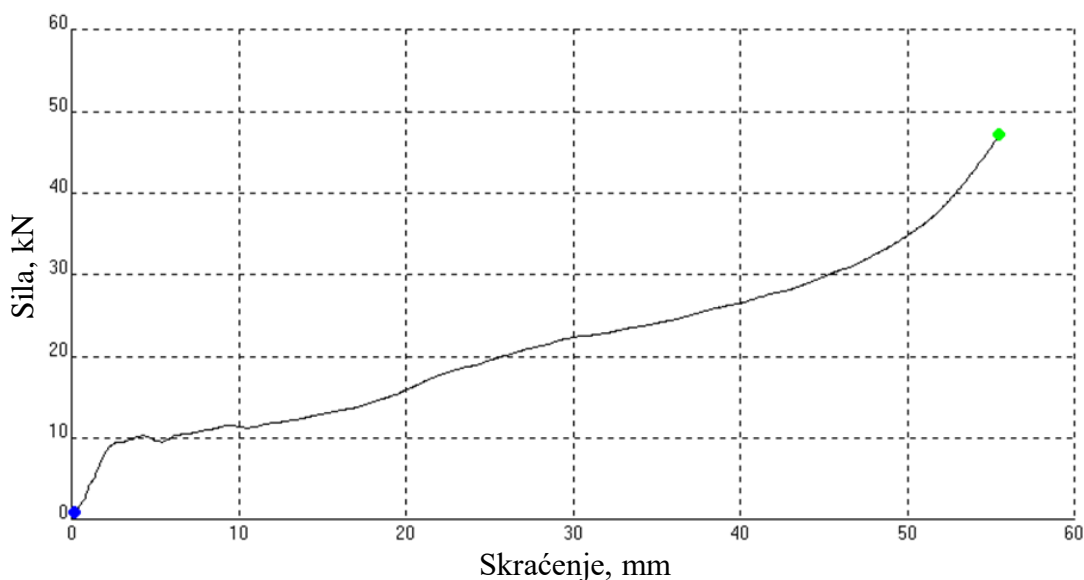
Izgled svih uzoraka nakon tlačnog ispitivanja prikazan je na slici 70.



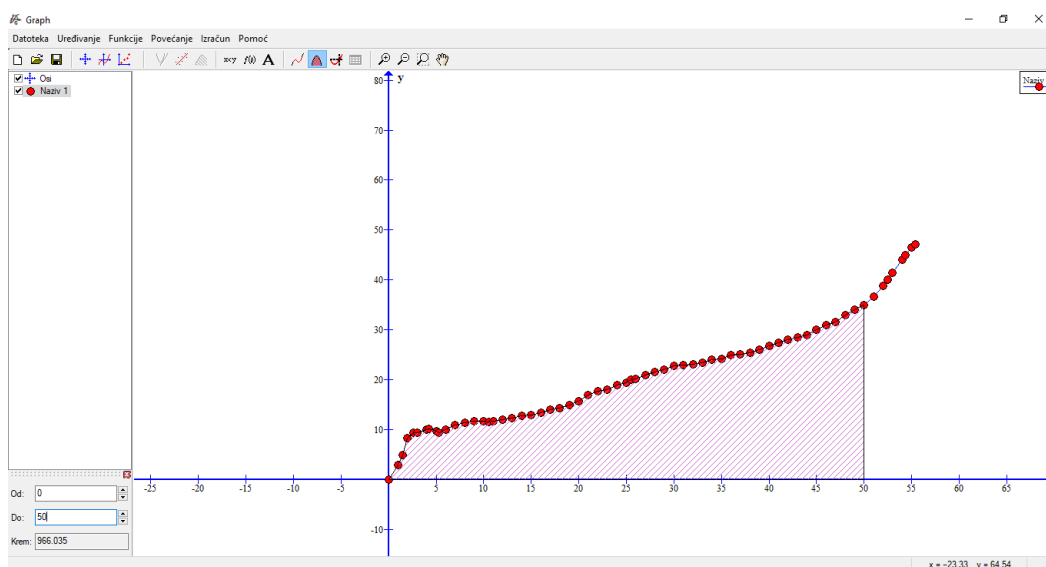
Slika 70. Uzorci nakon tlačenja

5.4. Analiza dobijenih krivulja apsorpcije energije

Kao rezultat tlačnih ispitivanja uzoraka, dobijeno je 6 dijagrama ovisnosti sile o skraćenju u kojima se nalaze karakteristične krivulje apsorpcije energije. Koordinate točaka krivulja ručno su iščitane i unesene u program Graph. Navedeni program omogućuje računanje površine ispod krivulje na određenom, zadanom intervalu. Tako izračunata površina predstavlja iznos apsorbirane energije pojedinog uzorka aluminijske pjene ako se na pravilan način odredi vrijednost deformacije zgušnjavanja. Pri toj kritičnoj vrijednosti deformacije, dolazi do potpunog uništenja materijala koji prestaje apsorbirati energiju. Formula na kojoj se bazira računanje spomenute površine u programu Graph, prikazana je relacijom (1) na početku teorijskog dijela ovoga rada. Slika 71. prikazuje izgled krivulje apsorpcije u programu TIRAtest System koji je povezan s kidalicom, a slika 72. daje prikaz iste krivulje u programu Graph, gdje je već izračunata površina na zadanom intervalu, odnosno iznos apsorbirane energije.

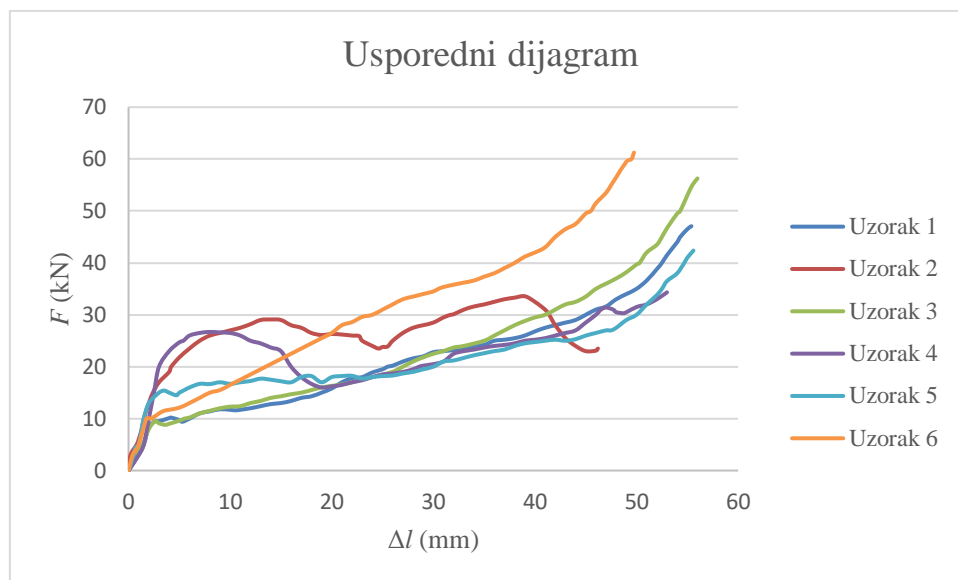


Slika 71. Prikaz krivulje apsorpcije energije u programu TIRAtest System



Slika 72. Prikaz krivulje apsorpcije energije u programu Graph

Koordinate točaka svih krivulja apsorpcije energije kopirane su iz programa Graph u Excel kako bi se, korištenjem određenih opcija, ponašanje pojedinih uzoraka moglo pratiti u istom dijagramu (slika 73.).



Slika 73. Usporedni dijagram za sve krivulje apsorpcije energije

Promatrajući dijagram, može se primijetiti da je krivulja uzorka 5 najbliža izgledu tipične krivulje apsorpcije energije pri tlačnom opterećenju Al pjene. Također, moglo bi se reći da je uzorak 6 apsorbirao najveću količinu energije, ali to će se detaljnije utvrditi u narednoj evaluaciji rezultata.

5.4.1. Evaluacija rezultata

Kako bi se što bolje komparirala apsorpcijska svojstva ispitivanih Al pjena, realizirane su po dvije tablice za svaki uzorak s obzirom na fiksne vrijednosti skraćenja i sile koje su djeljive brojem 5. Ostali podaci u tablicama bazirani su upravo na tim vrijednostima. Iznosi apsorbirane energije na pojedinim intervalima skraćenja dobijeni su korištenjem programa Graph. Deformacija i tlačno naprezanje izračunati su preko relacija (23) i (24):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (23)$$

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (24)$$

gdje Δl , l , F i S_0 redom označavaju skraćenje, početnu visinu, tlačnu silu i početnu površinu poprečnog presjeka uzorka. Iskoristivost apsorpcije energije računa se na principu relacije (3), odnosno preko omjera apsorbirane energije pjene i apsorbirane energije idealnog apsorbira. Njegovu apsorbiranu energiju predstavlja površina ispod pravca (slika 4.), odnosno u ovom slučaju, umnožak sile i skraćenja.

Uzorak 1:

Tablica 3. Uzorak 1 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje)

Skraćenje, Δl [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
5	9,7	35,76	0,063	7,347	0,74
10	11,7	90,46	0,127	8,862	0,77
15	13,0	151,66	0,190	9,847	0,78
20	15,8	222,76	0,253	11,967	0,70
25	19,5	312,11	0,316	14,770	0,64
30	22,8	418,14	0,380	17,269	0,61
35	24,2	535,34	0,443	18,330	0,63
40	26,8	662,54	0,506	20,299	0,62
45	30,0	803,94	0,570	22,723	0,60
50	35,0	966,04	0,633	26,510	0,55
55	46,5	1167,74	0,696	35,220	0,46

Tablica 4. Uzorak 1 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)

Skraćenje, Δl [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
1,5	5	3,50	0,019	3,787	0,47
6,0	10	45,41	0,076	7,574	0,76
19,0	15	207,36	0,241	11,361	0,73
25,5	20	321,99	0,323	15,149	0,63
36,0	25	559,94	0,456	18,936	0,62
45,0	30	803,94	0,570	22,723	0,60
50,0	35	966,04	0,633	26,510	0,55
52,5	40	1059,24	0,665	30,297	0,50
54,3	45	1135,71	0,687	34,084	0,46

Uzorak 2:

Tablica 5. Uzorak 2 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje)

Skraćenje, Δl [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
5	21,8	67,27	0,063	16,512	0,62
10	27,0	192,67	0,127	20,451	0,71
15	29,0	334,47	0,190	21,965	0,77
20	26,3	470,22	0,253	19,920	0,81
25	23,8	596,58	0,316	18,027	0,82
30	28,5	729,48	0,380	21,587	0,84
35	32,0	881,97	0,443	24,238	0,79
40	32,5	1046,60	0,506	24,616	0,81
45	23,0	1182,95	0,570	17,421	0,90

Tablica 6. Uzorak 2 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)

Skraćenje, Δl [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
0,8	5	2,70	0,010	3,787	0,68
1,5	10	7,70	0,019	7,574	0,51
2,4	15	19,05	0,030	11,361	0,53
4,2	20	50,55	0,053	15,149	0,60
26,0	25	620,73	0,329	18,936	0,82
41,4	30	1090,55	0,524	22,723	0,88

Uzorak 3:

Tablica 7. Uzorak 3 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje)

Skraćenje, Δ [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
5	9,6	34,90	0,063	7,271	0,73
10	12,3	90,60	0,127	9,316	0,74
15	14,3	156,70	0,190	10,831	0,73
20	16,3	233,20	0,253	12,346	0,72
25	18,5	319,70	0,316	14,012	0,69
30	22,5	422,00	0,380	17,042	0,63
35	25,0	540,95	0,443	18,936	0,62
40	29,5	678,00	0,506	22,344	0,57
45	33,5	835,00	0,570	25,374	0,55
50	39,7	1017,80	0,633	30,070	0,51
55	53,0	1245,33	0,696	40,144	0,43

Tablica 8. Uzorak 3 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)

Skraćenje, Δ [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
1,4	5	3,80	0,018	3,787	0,54
5,5	10	39,80	0,070	7,574	0,72
17,0	15	186,05	0,215	11,361	0,73
27,0	20	357,95	0,342	15,149	0,66
35,0	25	540,95	0,443	18,936	0,62
41,0	30	707,75	0,519	22,723	0,58
46,0	35	869,25	0,582	26,510	0,54
50,3	40	1029,76	0,637	30,297	0,51
52,5	45	1123,33	0,665	34,084	0,48
54,3	50	1209,28	0,687	37,871	0,45
55,5	55	1272,33	0,703	41,659	0,42

Uzorak 4:

Tablica 9. Uzorak 4 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje)

Skraćenje, Δ [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
5	24,7	67,60	0,063	18,709	0,55
10	26,5	198,89	0,127	20,072	0,74
15	23,0	322,84	0,190	17,421	0,81
20	16,2	413,14	0,253	12,270	0,77
25	18,5	499,39	0,316	14,012	0,75
30	20,5	596,33	0,380	15,527	0,74
35	23,7	708,23	0,443	17,951	0,76
40	25,2	830,38	0,506	19,087	0,78
45	28,5	962,23	0,570	21,587	0,75
50	31,5	1114,80	0,633	23,859	0,71

Tablica 10. Uzorak 4 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)

Skraćenje, Δ [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
1,5	5	3,50	0,019	3,787	0,47
2,0	10	7,25	0,025	7,574	0,36
2,5	15	13,50	0,032	11,361	0,36
28,6	20	567,94	0,362	15,149	0,74
39,0	25	805,28	0,494	18,936	0,77
46,0	30	991,48	0,582	22,723	0,72

Uzorak 5:

Tablica 11. Uzorak 5 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje)

Skraćenje, Δ [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
5	15,0	56,40	0,063	11,361	0,75
10	16,7	138,60	0,127	12,649	0,83
15	17,2	225,00	0,190	13,028	0,87
20	18,0	312,80	0,253	13,634	0,87
25	18,2	403,05	0,316	13,785	0,89
30	20,0	497,65	0,380	15,149	0,83
35	22,6	605,05	0,443	17,118	0,76
40	24,8	723,53	0,506	18,746	0,73
45	26,0	849,40	0,570	19,693	0,73
50	30,0	987,28	0,633	22,723	0,66
55	41,0	1162,95	0,696	31,055	0,52

Tablica 12. Uzorak 5 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)

Skraćenje, Δ [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
1,0	5	2,95	0,013	3,787	0,59
1,5	10	6,70	0,019	7,574	0,45
5,0	15	56,40	0,063	11,361	0,75
30,0	20	497,66	0,380	15,149	0,83
43,0	25	798,60	0,544	18,936	0,74
50,0	30	987,28	0,633	22,723	0,66
52,5	35	1068,38	0,665	26,510	0,58
54,7	40	1150,80	0,692	30,297	0,53

Uzorak 6:

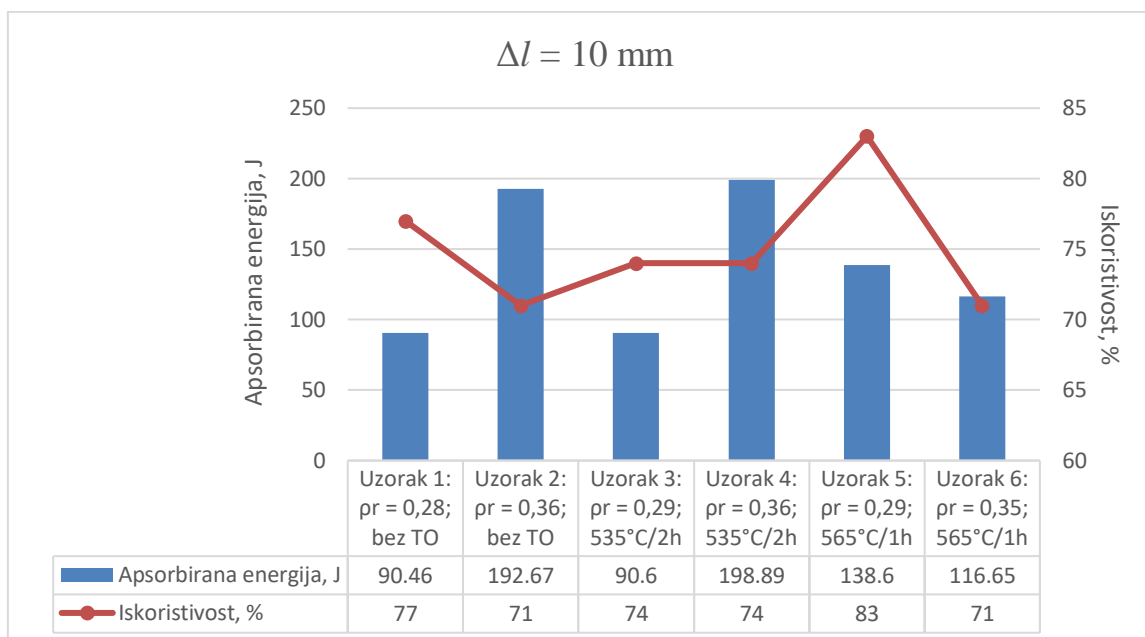
Tablica 13. Uzorak 6 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno skraćenje)

Skraćenje, Δl [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
5	12,1	44,85	0,063	9,165	0,74
10	16,5	116,65	0,127	12,498	0,71
15	21,5	211,65	0,190	16,285	0,66
20	26,5	331,65	0,253	20,072	0,63
25	31,0	476,60	0,316	23,480	0,61
30	34,5	641,85	0,380	26,131	0,62
35	37,4	821,77	0,443	28,290	0,63
40	42,0	1019,64	0,506	31,812	0,61
45	49,5	1247,39	0,570	37,493	0,56

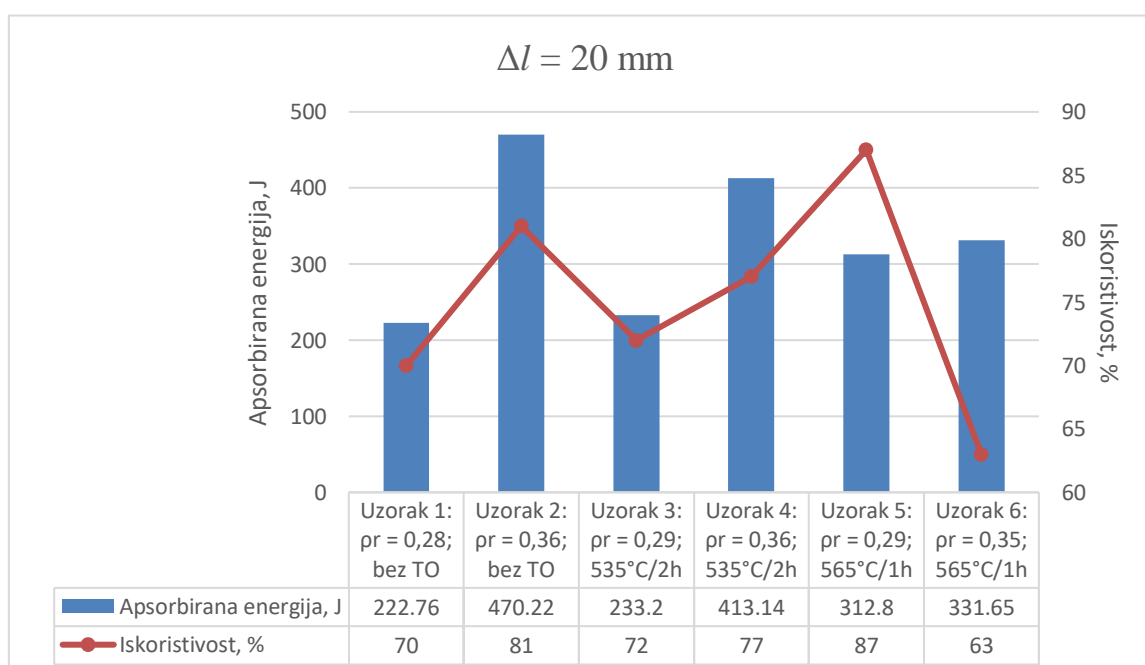
Tablica 14. Uzorak 6 (vrijednosti izračunate s obzirom na fiksno opterećenje)

Skraćenje, Δl [mm]	Sila, F [kN]	Apsorbirana energija, E [J]	Deformacija, ε	Tlačno naprezanje, σ [N/mm ²]	Iskoristivost, η
0	0	0	0	0	0
1,0	5	3,00	0,013	3,787	0,60
1,8	10	8,63	0,022	7,574	0,49
8,0	15	85,40	0,101	11,361	0,71
13,5	20	180,53	0,171	15,149	0,67
18,5	25	293,03	0,234	18,936	0,63
24,0	30	446,10	0,304	22,723	0,62
30,5	35	659,23	0,386	26,510	0,62
38,0	40	937,44	0,481	30,297	0,62
42,0	45	1106,14	0,532	34,084	0,59
45,5	50	1272,27	0,576	37,871	0,56
47,5	55	1377,27	0,601	41,659	0,53
49,5	60	1493,02	0,627	45,446	0,50

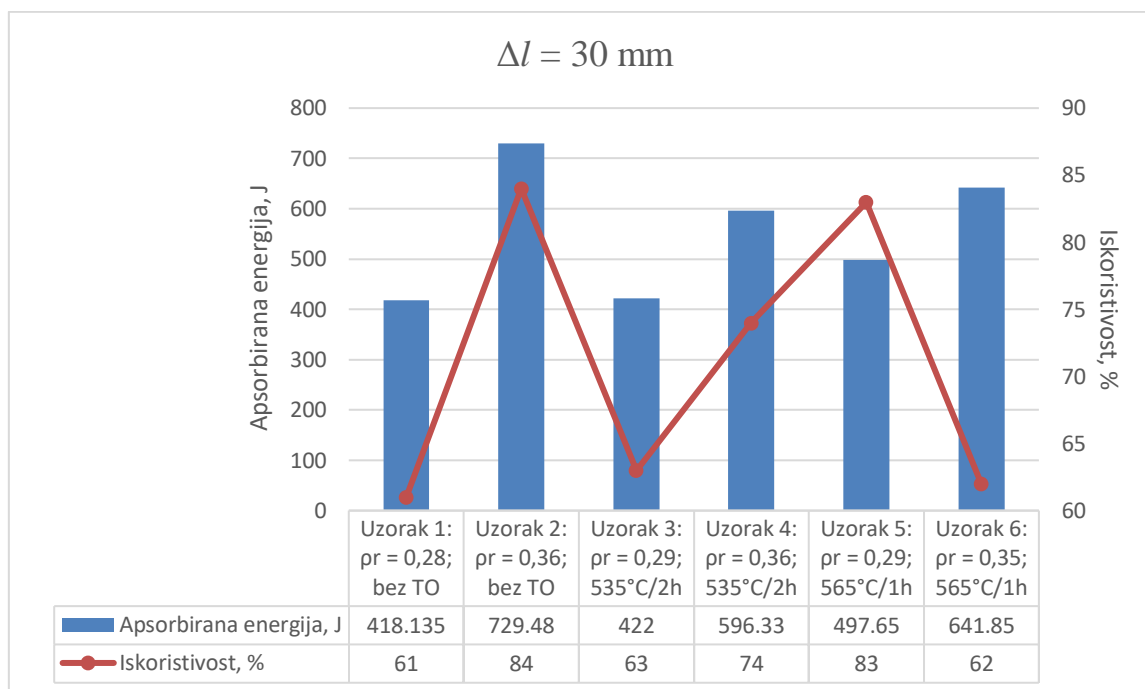
U cilju boljeg pregleda rezultata, napravljeni su kombinirani dijagrami apsorbirane energije i iskoristivosti za svaki uzorak s obzirom na zajedničke postignute vrijednosti skraćjenja i sila koje su višekratnici broja 10. Dijagrami koji su rađeni u programu Excel, prikazani su na slikama u nastavku.

Slika 74. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 10 \text{ mm}$)

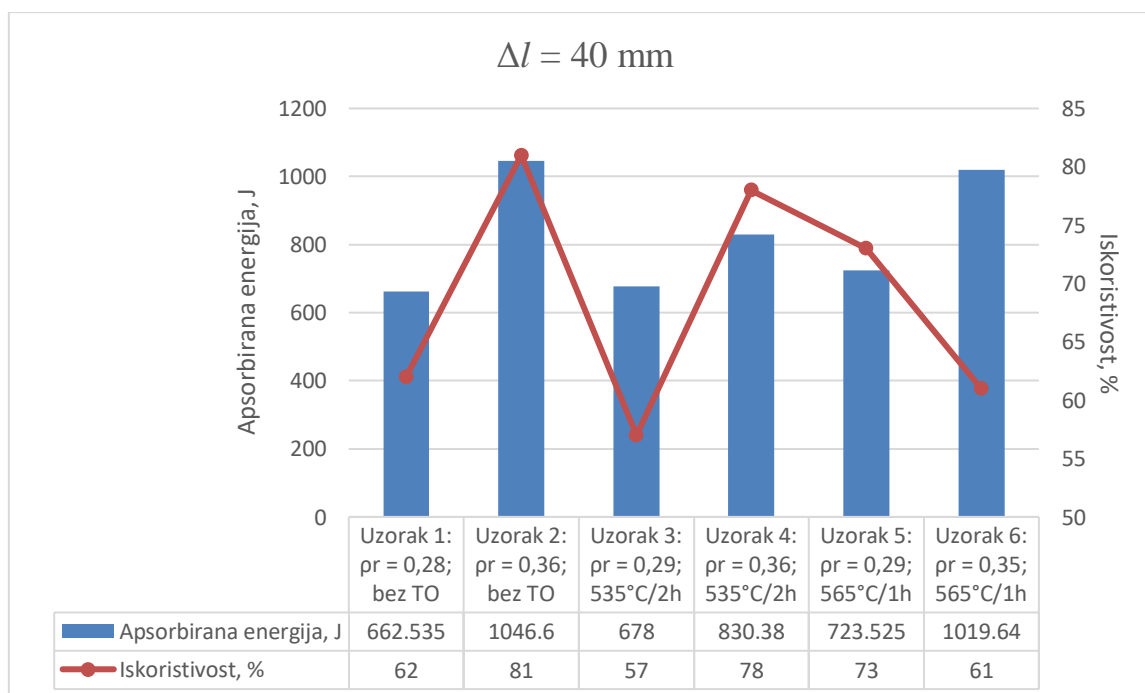
Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 10 mm, imaju uzorci 2 i 4 kod kojih je ta vrijednost približno jednaka. Uzorci su izrađeni od jednakog broja prekursora (5) te imaju jednake relativne gustoće ($\rho_r = 0,36$). Međutim, uzorak 4 toplinski je obrađen za razliku od uzorka 2. U ovom slučaju, toplinski obrađen uzorak 5 ima najveću iskoristivost apsorpcije energije.

Slika 75. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 20 \text{ mm}$)

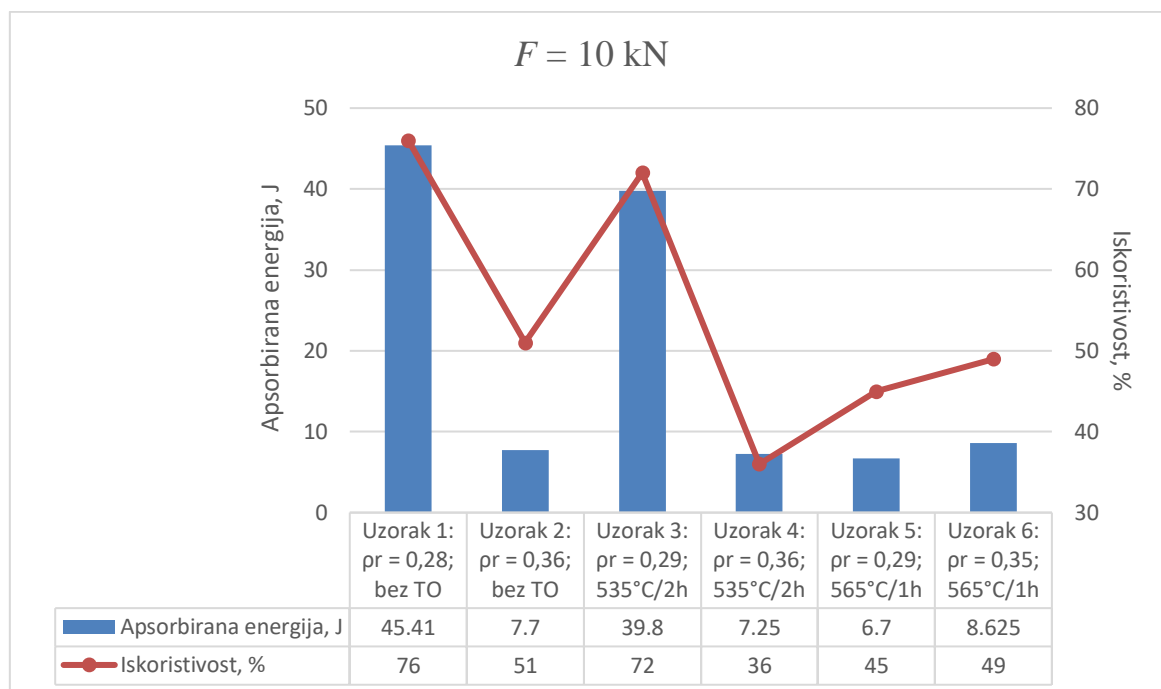
Najveću apsorbiranu energiju pri skraćanju od 20 mm, ima uzorak 2, a najveća iskoristivost vidljiva je za uzorak 5. Najmanja vrijednost iskoristivosti može se primijetiti za uzorak 6.

Slika 76. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 30 \text{ mm}$)

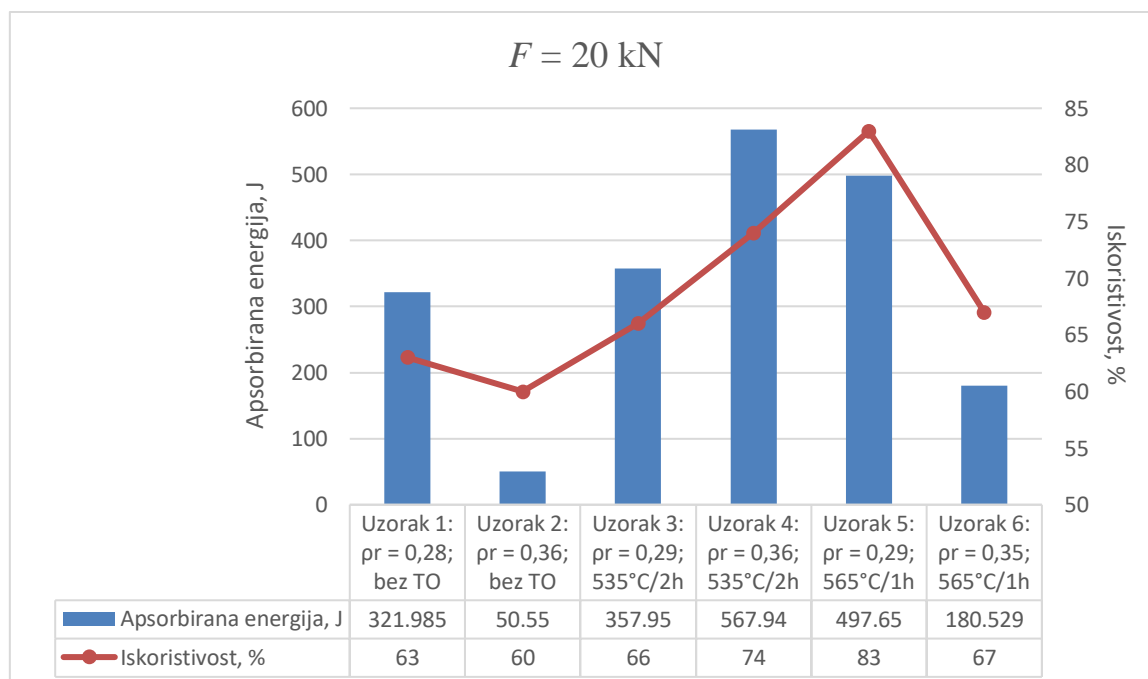
Najveći iznos apsorbirane energije pri skraćanju od 30 mm, ima uzorak 2. Također, isti uzorak ima i najveću iskoristivost apsorpcije koja je gotovo jednaka onoj uzorka 5.

Slika 77. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($\Delta l = 40 \text{ mm}$)

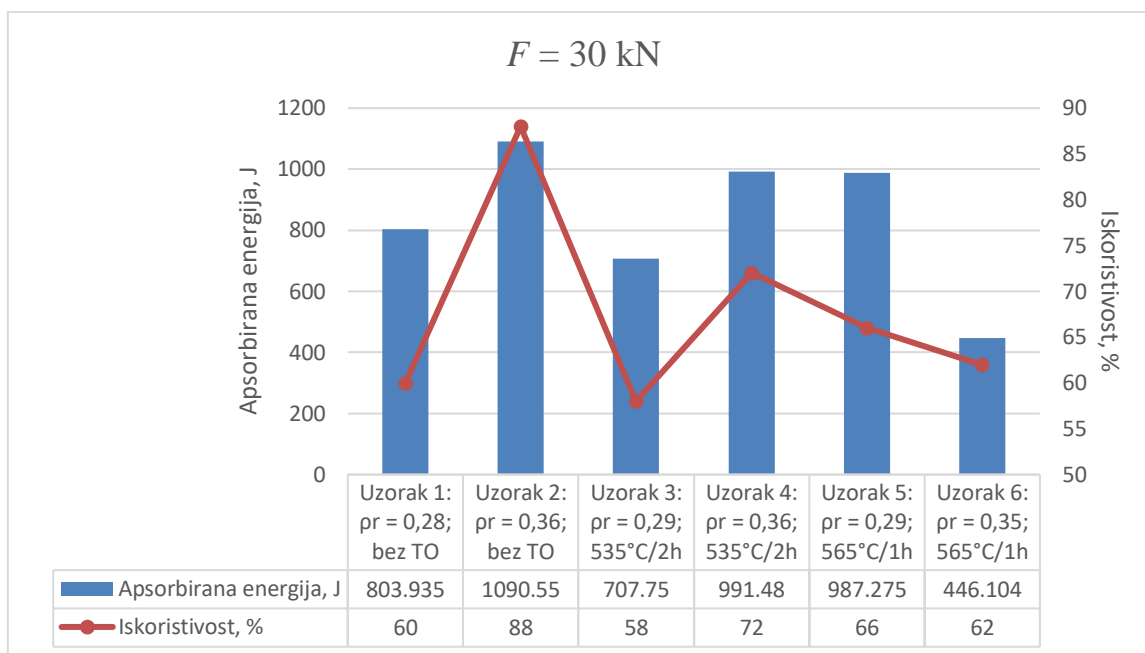
Najveću apsorbiranu energiju pri skraćanju od 40 mm, imaju toplinski neobrađen uzorak 2 i toplinski obrađen uzorak 6. Najveću iskoristivost ima uzorak 2, a najmanju uzorak 3.

Slika 78. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($F = 10 \text{ kN}$)

Uzorak 1 ima najveći iznos apsorbirane energije pri sili od 10 kN. Nakon njega slijedi uzorak 3. Ostali uzorci imaju približno jednak iznos apsorpcije energije pri tom opterećenju. Što se tiče iskoristivosti apsorpcije energije, uzorak 1 ima najveću vrijednost, a uzorak 4 najmanju.

Slika 79. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($F = 20 \text{ kN}$)

Najveću apsorpciju energije pri sili od 20 kN ima uzorak 4, a najmanju uzorak 2. Najveća vrijednost iskoristivosti može se uočiti kod uzorka 5.

Slika 80. Dijagram apsorbirane energije i iskoristivosti ($F = 30 \text{ kN}$)

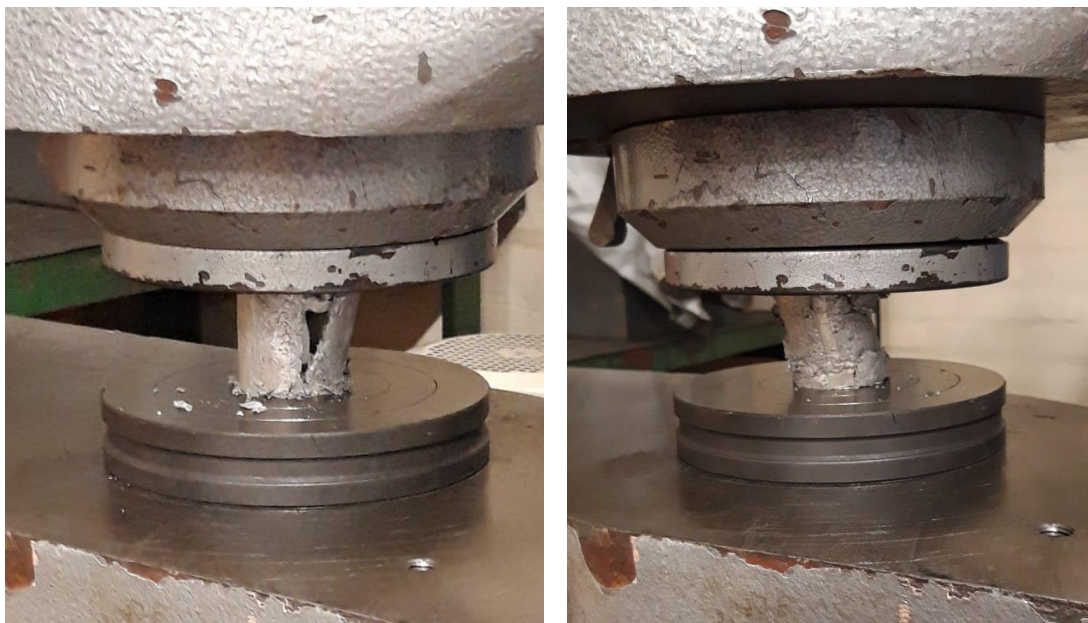
Pri sili od 30 kN, uzorak 2 pokazuje najveću apsorbiranu energiju. Slijede ga uzorci 4 i 5, čija je apsorbirana energija vrlo blizu njegove vrijednosti. Uzorak 2 ima i najveći iznos iskoristivosti pri ovom opterećenju.

U završnom dijelu ove analize, obratit će se pažnja na izgled svakog pojedinog uzorka nakon tlačenja te će se na osnovu toga povući još jedna komparacija. Slijedi slika 81.



Slika 81. Pojedinačni izgled uzoraka nakon tlačenja

Ako se obrati pažnja na toplinski neobrađen uzorak 2, može se uočiti da je statičko tlačno ispitivanje detektiralo neaktivirane, odnosno nerastaljene prekursore zarobljene unutar pjene. Uzorak 4 stlačen je izvan osi opterećenja, a uzrok tomu je što mu gornja i donja površina nisu planparalelne i to je došlo do izražaja u ovom slučaju. Tlačenje spomenutih uzoraka prikazano je na slici 82.



Slika 82. Tlačenje uzorka 2 (lijevo) i uzorka 4 (desno)

Uvidom u usporedni dijagram (slika 73.), može se primijetiti da njihove krivulje apsorpcije energije odstupaju od ustaljenog trenda ostalih krivulja. Naime, u oba slučaja zabilježena je faza pada vrijednosti opterećenja na određenim intervalima skraćivanja, nakon koje slijedi ponovno faza rasta.

S obzirom na navedene konstatacije, da je ispitivanje provedeno na više uzoraka, uzorci 2 i 4 bili bi škart, odnosno ne bi se uspoređivali s ostalima jer su loše proizvedeni. Kada bi ih izopćili iz kombiniranih dijagrama apsorbirane energije i iskoristivosti, toplinski obrađen uzorak 5 pokazivao bi najbolje karakteristike za promatrana svojstva. To dokazuje i njegova krivulja apsorpcije koja je najbliža izgledu tipične krivulje apsorpcije energije za aluminijske pjene. Prema slici 81., uzorak 5 ostao je kompaktan nakon tlačnog ispitivanja, odnosno nije došlo do rasipanja materijala kao kod ostalih uzoraka. Stoga, postoje indicije da toplinska obrada pozitivno utječe na apsorpcijska svojstva aluminijskih pjena, ali potrebna su naknadna detaljnija istraživanja da bi se to dokazalo.

6. ZAKLJUČAK

Aluminijske pjene relativno su novi oblik materijala na kojemu se aktivno provode ekspertize kako bi se implementirao u mnoga područja primjene. Da bi se postigla tražena svojstva u eksploataciji i iskoristio puni potencijal aluminijskih pjena, potrebno je standardizirati njihove načine proizvodnje i metode ispitivanja. Najčešći način proizvodnje je metodom plinom oslobođenih čestica rastvorenih u polučvrstoj fazi koja rezultira defektima u ćelijastoj strukturi. Prema provedenim istraživanjima, toplinska obrada prekursora inducira bolju strukturu pjene u pogledu morfologije pora i količine defekata kao posljedicu homogenijeg pjenjenja. Jedna od strategija za kontrolu i značajno smanjenje stupnja povezanosti pora je povećanje brzine skrućivanja mijenjanjem rashladnog medija.

Pretpostavka da toplinska obrada prekursora utječe na bolja mikrostrukturna svojstva aluminijske pjene, bila je inspiracija za ispitivanje istoga utjecaja na svojstvo apsorpcije energije. Eksperimentalni dio ovoga rada pokazao je da postoji indicija da toplinska obrada pozitivno utječe na apsorpcijska svojstva aluminijskih pjena. Da bi se ta indicija dokazala, potrebno je provesti detaljnije istraživanje na više uzoraka čije je prekursore poželjno toplinski obraditi na više različitih temperatura i vremena držanja. Rezultate takvog istraživanja trebalo bi statistički obraditi. Većim brojem uzoraka, statistički bi se povećao ulaz podataka i mogla bi se postići normalna razdioba te realizirati faktorska analiza varijance. Utjecajni faktori bili bi temperatura toplinske obrade prekursora i vrijeme držanja, a mogli bi se ispitivati na dvije ili više razina istovremeno. Razine utjecajnih faktora te za njih utvrđene vrijednosti apsorbirane energije kao izlazne varijable, moguće je unijeti u statistički softverski paket Design – Expert. U tom programu primjenjuje se metoda analize varijance prema kojoj se istražuju utjecaji i značajnosti faktora i pripadajućih interakcija. Iz ANOVA tablice cilj je izvući regresijske koeficijente potrebne za sastavljanje regresijske funkcije. Time se generira matematički model koji će opisivati traženi proces.

LITERATURA

- [1] T. Filetin, I. Kramer, G. Marić: Metalne pjene, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [2] <https://www.scribd.com/document/410174217/Metalne-Pjene-Nano-Pametni-Materijali> Pristupljeno: 31.1.2020.
- [3] B. Bauer, S. Kralj, M. Bušić: Production and application of metal foams in casting technology, Technical Gazette 20, 6 (2013.), 1095-1102
- [4] H. P. Degischer, B. Kriszt: Handbook of cellular metals, Wiley-Vch Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2002.
- [5] 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.
- [6] Z. Zhou, B. Su, Z. Wang, X. Shu, L. Zhao: Impact response of aluminium alloy foams under complex stress states, Latin american journal of solids and structures 13 (2016.), 665-689
- [7] A. T. Barnes, K. Ravi – Chandar, S. Kyriakes, S. Gaitanaros: Dynamic crushing of aluminium foams: Part I – Experiments, Internal journal of solids and structures 51 (2014.), 1631-1645
- [8] <https://www.relinc.com/split-hopkinson-bar-kolsky-bars/split-hopkinson-bar/> Pristupljeno: 5.3.2020.
- [9] Jingde Li, Guowei Ma, Hongyuan Zhou, Xiuli Du: Energy absorption analysis of density graded aluminium foam, International journal of protective structures 3 (2011.), 333-348
- [10] Geng Luo, Pu Xue: Investigations on the mechanism and behavior of dynamic energy absorption of metal foam, Latin american journal of solids and structures 15 (2018.), str. 4
- [11] M. Damghani, M. Gonabadi: Investigation of energy absorption in aluminum foam sandwich panels by drop hammer test: Experimental results; Mechanics, materials science and engineering journal 7 (2017.), Magnolithe
- [12] https://www.researchgate.net/figure/The-use-of-aluminum-foam-in-a-car-body-structure-1_fig4_329185404 Pristupljeno: 12.3.2020.
- [13] J. Banhart, F. García – Moreno, K. Heim, H. – W. Seeliger: Light – weighting in transportation and defence using aluminium foam sandwich structures; International symposium on light weighting for defence, aerospace and transportation; Indian institute of metals, Goa (2017.)
- [14] S. Raeisi, J. Kadkhodapour, A. Tovar: Mechanical properties and energy absorbing capabilities of Z – pinned aluminum foam sandwich; Composite structures 214 (2018.), 34-46

[15] J. Lázaro, E. Solórzano, M. A. Rodríguez – Pérez, O. Rämer, F. García – Moreno, J. Banhart: Heat treatment of aluminium foam precursors: effects on foam expansion and final cellular structure; *Procedia materials science* 4 (2014.), 287 – 292

[16] J. Lázaro, E. Solórzano, M. A. Rodríguez – Pérez: Clues for cellular structure optimization in aluminum foams; *Advanced engineering materials*, 2016.

PRILOZI

I. CD-R disk