



UNIVERZITET U KRAGUJEVCU  
FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA

Varun H. Sharma

# **RAZVOJ I KARAKTERIZACIJA POROZNIH STRUKTURA OD ALUMINIJUMA**

Doktorska disertacija

Kragujevac, 2022



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
FACULTY OF ENGINEERING

Varun H. Sharma

**DEVELOPMENT AND  
CHARACTERIZATION OF ALUMINUM  
POROUS STRUCTURES**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2022

<b>Autor</b>
Ime i prezime: Varun Sharma
Datum i mesto rođenja: 12.05.1989.
Sadašnje zaposlenje: Simulation Consultant at EDS Technologies
<b>Doktorska disertacija</b>
Naslov: Razvoj i karakterizacija poroznih struktura od aluminijuma
Broj stranica: 103
Broj slika: 26
Broj bibliografskih podataka: 217
Ustanova i mesto gde je rad izrađen: Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu
Naučna oblast (UDK): 621.7.002:004.9
Mentor: dr Fatima Živić, vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu
<b>Ocena i odbrana</b>
Datum prijave teme: 14.10.2020.
Broj odluke i datum prihvatanja teme doktorske/umetničke disertacije:
IV-04-716/7 од 14. 10. 2020.
Komisija za ocenu naučne zasnovanosti teme i ispunjenosti uslova kandidata:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dr Petar Todorović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu</li> <li>2. Dr Fatima Živić, docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu</li> <li>3. Dr Dragan Džunić, docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu</li> <li>4. Dr Vladimir Dunić, docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu</li> <li>5. Dr Dušan Petković, docent, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu</li> </ol>
Komisija za ocenu i odbranu doktorske/umetničke disertacije:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dr Petar Todorović, redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu</li> <li>2. Dr Vukašin Slavković, docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu</li> <li>3. Dr Dušan Petković, docent, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu</li> </ol>
Datum odbrane disertacije:

## ZAHVALNICA

Ova doktorska disertacija je rezultat visegodišnjeg rada i istraživanja na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, katedra za proizvodno mašinstvo. Ova doktorska disertacija predstavlja rezultat projekta Horizon 2020 SELECTA "*Pametne elektrodeponovane legure za ekološki održive primene: od naprednih zaštitnih prevlaka do mikro/nano-robotičkih platformi*" koji je finansiran od strane Evropske Unije.

Veliku zahvalnost dugujem Prof dr Nenadu Grujoviću, Prof dr Fatimi Živić, na prilici da radim na projektu Horizon 2020 SELECTA "*Pametne elektrodeponovane legure za ekološki održive primene: od naprednih zaštitnih prevlaka do mikro/nano-robotičkih platformi*".

Posebnu zahvalnost dugujem Prof Fatimi Živić na usmeravanju i stručnoj pomoći tokom izrade doktorske disertacije. Tokom trogodišnjeg boravka u Kragujevcu dobio sam svu vrstu pomoći i podrške oko školskih aktivnosti, istraživačkih konferencija, sastanaka sa EU i svega drugog što mi je bilo potrebno. Organizacija svih školskih i poslovnih aktivnosti je bila takva da sam se osećao kao da radim na svom matičnom fakultetu.

Zahvalnost dugujem i dr Norbertu Babskanu sa kojim sam sarađivao u kompaniji Bay Zoltan Non-profit Ltd., Mađarska, gde sam se prvi put susreo sa metalnim penama.

Zahvaljujem se i Prof Jordiju Sort i Prof Evi Pellicer na ogromnoj pomoći oko istraživanja tokom trajanja projekta.

Zahvaljujem se i Prof U. Klement (Chalmers University of Technology, Gothenburg), dr W. Hansal, (Happy Plating), profesoru dr C. Lekka (University of Ioannina), dr Z. Stylist i Prof dr A.L. Greer (University of Cambridge) za osmišljavanje i organizaciju izuzetno naprednih tematskih sastanaka unutar projekta SELECTA.

Zahvaljujem se i gospodinu Jordiju Malapiera na pomoći oko rešavanja svih pitanja i problema sa kojima se sreću međunarodni studenti.

## REZIME

Metalne pene su dobar izbor za multidisciplinarnu primenu, jer ih njihove fizičke i mehaničke karakteristike čine posebno atraktivnim za automobilsku industriju. Ova studija ima za cilj da utvrdi pogodnost metalnih pena ispitivanjem njihovih mehaničkih i fizičkih svojstava. U ovom radu su projektovane i razvijene porozne aluminijumske strukture, a nakon toga je realizovana njihova karakterizacija. Jedan od glavnih ciljeva je određivanje metodologije proizvodnje poroznih struktura sa poboljšanim elastičnim i plastičnim karakteristikama. Eksperimentalna istraživanja i numeričke simulacije su realizovane da bi se utvrdio mehanizam deformacije, kao i izbora materijala za primenu pena na bazi aluminijuma.

Prvi korak u razvoju metalne pene bio je korišćenje različitih proizvodnih tehnologija. Opisano je nekoliko glavnih proizvodnih tehnologija, uključujući livenje plastike korišćenjem prekursora polimera ili voska, ekspanziju zarobljenog gasa, ALCAN proces i ubrizgavanje rastopljenog gasa (mehurići vazduha). Utvrđeno je da je metoda ubrizgavanja rastopljenog gasa efikasnija u proizvodnji homogenih veličina pora jer se parametri procesa mogu lako menjati. Iz tog razloga su uzorci pripremljeni ovom metodom. Ovom metodom su dobijeni uzorci metalne pene sa porama dužine oko 1 mm i gustine  $0,6 \text{ g/cm}^3$ . Ovi uzorci su ispitivani jednoosnim pritiskivanjem pri brzini pomeranja od 0,001 mm/s. Eksperimentalni rezultati daju vrednosti napona i deformacije u funkciji zatezanja i opterećenja, respektivno. Eksperimentalni rezultati pokazuju da do potpunog loma uzoraka dolazi pri opterećenju od 90 kN. Uzorci pripremljeni metodom uduvavanja gasa pokazali su: elastičnu zonu, zonu uniformnog ponašanja (pri oko 23 MPa) i zonu sabijanja pri oko 35 MPa. Tokom ispitivanja pritiskivanjem određen je napon tečenja koji iznosi 20 MPa. Zanimljivo je da su zona sabijanja i brzo povećanje napona počeli od oko 52% deformacije uzorka metalne pene.

Razvijen je novi model za numeričku simulaciju zasnovan na Voronoi modelu i kodu (Voronoi Tessellated Model, VTM) za generisanje porozne strukture otvorenih pora. Razvijeni model je korišćen za proučavanje mehanizma deformacije. Ispitivanje jednoosnim pritiskivanjem je izvedeno sa opterećenjem od 20 N. Ispitivanja su izvedena na tri različita uzorka različite poroznosti (30%, 60% i 80%) radi proučavanja uticaja poroznosti. Model elastično-plastičnog materijala zasnovan na von Mises-ovom kriterijumu tečenja materijala sa idealnom plastičnošću (bez deformacionog ojačavanja) primenjen je za deformacije manje od 10%. Numeričkim simulacijama su dobijene vrednosti napona i deformacija koje pokazuju da uzorci sa većom poroznošću imaju značajno veću normalnu komponentu napona i širi opseg ravni maksimalnog napona. Naponi pri ispitivanju pritiskivanjem i zatezanjem rastu sa povećanjem poroznosti. Slično, strukturni ligamenti porozne strukture (zidovi pora) su pokazali komplikovanu raspodelu polja napona. Rezultati dobijeni numeričkim metodama su u skladu sa eksperimentalnim ispitivanjima. Da bi se steklo bolje razumevanje, potrebna su dodatna istraživanja rezultata dobijenih numeričkim simulacijama stvarnog dinamičkog ponašanja u zoni elastičnosti, plastičnosti i u uslovima jednoosnog pritiskivanja za strukturu otvorenih pora kreiranu Voronoi modelom.

Za modeliranje zatvorenih pora, korišćene su 3D slike aluminijumskih pena dobijene kompjuterskom tomografijom (CT skeniranje). 3D model je razvijen nakon obrade slika dobijenih sa CT skenera i dalje je primenjen za numeričku simulaciju. Mreža konačnih elemenata je kreirana korišćenjem tetraedarskih elemenata. Jednačine elasto-plastičnog modela sa svojstvima izotropnih materijala su korišćene za nelinearnu statičku analizu. Numerička simulacija je realizovana u uslovima jednoosnog pritiskivanja. Tokom testa pritiskivanja, opterećenje je zadato na gornjoj strani uzorka u pravcu y-ose. Rezultati pokazuju da kompleksna raspodela polja napona utiče i na napone pri ispitivanju zatezanjem i

pritiskivanjem. Na deformaciju takođe utiče napon smicanja. Zona sa većim prečnikom pora je podložnija naponima koji nastaju usled pritiskivanja, dok je zona sa maksimalnim brojem pora i tankim zidovima podložnija naponima koji nastaju prilikom zatezanja.

Realizovana je višekriterijumska analiza (Multicriteria Decision Making, MCDM) uporedno na više materijala za lake železničke vagone u poređenju sa poroznim aluminijumom. Primenjeno je nekoliko MCDM modela optimizacije: TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution), PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluation) i VIKOR (Višekriterijumska optimizacija i kompromisno rešenje). Cilj istraživanja bio je pronalaženje najboljeg optimalnog materijala za lake železničke vagone korišćenjem MCDM alata. Analizirano je šest potencijalnih inženjerskih materijala: napredni čelici Dual-Phase DP 600, Transformation Induced Plasticity TRIP 700, Twinning Induced Plasticity, TVIP, Aluminijum, Al 6005 - T6, Aluminijum, Al 6082 - T6 i porozni Al sa zatvorenim porama. Izbor materijala zasnovan na MCDM kriterijumima je realizovan na osnovu karakteristika materijala kao što su gustina, granica tečenja, zatezna čvrstoća, Jangov modul elastičnosti, cena, otpornost na koroziju. Rezultati pokazuju da su aluminijum i njegove legure najpogodniji materijal za izradu lakih železničkih vagona.

**Ključne reči:** Voronoi Tessellated Model (VTM), otvorena poroznost, zatvorena poroznost, porozna struktura, ispitivanje pritiskivanjem, napon, deformacija, CT skeniranje, kompjuterska tomografija

## ABSTRACT

Metal foams are excellent candidates for multidisciplinary applications, as their physical and mechanical properties make them particularly attractive for the automotive industry. This study aims to determine the suitability of metal foams by investigating their mechanical and physical properties. In this project, porous aluminium structures will be designed, developed and characterized. One of the main objectives is to find out how to fabricate porous structures with improved elastic, plastic and densification regime. Experimental and numerical simulations have been carried out to determine the deformation mechanism as well as the material selection method for structural applications of aluminium-based foams.

The first step in the development of metal foam was to use different processing techniques. Several main production technologies have been described, including plastic casting using a polymer or wax precursor, trapped gas expansion, the ALCAN process, and melt gas injection (air bubbling). The melt gas injection method was found to be more effective in producing homogeneous pore sizes because the process parameters can be easily adjusted. Therefore, the samples were prepared using the gas blowing method. The results of this method show a foam with cells of about 1 mm length and a density of  $0.6 \text{ g/cm}^3$ . These specimens were subjected to a uniaxial compression test at a displacement rate of  $0.001 \text{ mm/s}$ . The experimental results provide stress and strain values as a function of extension and load, respectively. The experimental results show that complete failure of the specimens occurs at a load of 90 KN. The specimens prepared by the gas blowing method showed: an elastic region, a uniform plateau region at about 23 MPa and densification region at about 35 MPa. During compression, a yield or collapse stress was measured at about 20 MPa. Interestingly, the densification region and the rapid increase in stress started at about 52%.

A new model was developed for numerical simulation based on a Voronoi tessellation code to generate an open-cell porous structure. The developed model was used to study the deformation mechanism. A uniaxial compression test was performed with a uniformly applied load of 20 N. The tests were performed on three different specimens with different porosity (30%, 60% and 80%) to study the effect of porosity. The elastic-plastic material model based on Von Mises yield criterion with perfect plasticity (without strain hardening) was applied below 10% strain. Numerical simulations yielded stress and strain values and interestingly, the results show that specimens with higher porosity exhibited significantly higher normal stresses and larger stress plateaus. Both compressive and tensile stresses increase with increasing porosity. Similarly, ligaments and struts showed complicated stress fields. The results also show that the developed Voronoi-based numerical model are consistent with the experimental results in the case of quasi-static conditions up to the linear elastic region. In order to gain a better understanding, the simulation of the real dynamic behavior under elastic, plastic and compaction conditions for the open cell structure created with the Voronoi code needs to be investigated.

For closed cell modelling, computer tomography is used to create 3D images of closed cell foam made of aluminum. The 3D model was developed and used for numerical simulation after thresholding and identifying the correct images. The mesh was very finely tuned using size 10 tetra-node elements. Moreover, elastic and plastic equations with isotropic material properties were applied to a nonlinear static test. Numerical simulation was performed under uniaxial compression conditions. During the compression test, a uniform compressive load was applied to the top surface of the specimen in the y-direction. The results show that the complicated stress fields affect the compressive and tensile stresses. The deformation is also strongly influenced by the shear stress. The zone with larger cells diameter exhibits

compressive stresses, while the zone with a maximum number of cells and thin walls exhibits tensile stresses.

Furthermore, a statistical model was applied to find the best level of alternative material under conflicting criteria and Multicriteria Decision Making (MCDM) tools helped to determine the best level of alternative material. Some of the recent MCDM tools used in the research work are TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution), Weighted aggregated sum product assessment, PROMETHEE (Preference ranking organisation method for enrichment evaluation) and VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje). The aim of the study was to find the best optimal material for light railway wagon using the above mentioned MCDM tools. For this purpose, six potential engineering materials were used as alternatives, namely Dual-Phase DP 600, Transformation Induced Plasticity TRIP 700, Twinning Induced Plasticity, TWIP, Aluminium, Al 6005 - T6, Aluminium, Al 6082 - T6, Porous Structure, (Al - Closed cell). Criteria based selection was done on the basis of perspective material properties such as density, Yield Strength (Y.S), Tensile Strength (T.S), Y.S/T.S ratio, Young's modulus (Y.M), price, Corrosion Resistance (C.R.). The research results show us that aluminium and its alloys are the most suitable material for light railway wagon due to its superior properties.

**Keywords:** Voronoi Tessellated Model (VTM); open cell porosity; closed cell porosity; porous structure; compressive load; stress; strain; computer tomography (CT)



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1 PREGLED</b> .....	1
<b>1.2 CILJ RADA</b> .....	2
<b>2. PREGLED LITERATURE I DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA</b> .....	5
<b>2.1 POROZNE STRUKTURE</b> .....	5
<b>2.2 METALNE PENE</b> .....	7
<b>2.3. PROIZVODNE TEHNOLOGIJE</b> .....	10
<b>3. DIZAJN POROZNE STRUKTURE</b> .....	19
<b>3.1. VRSTE METODA</b> .....	19
<b>3.2. MODEL OTVORENIH PORA ZASNOVAN NA VORONOI OBLIKU POROZNOSTI (VORONOI TESSELLATION MODEL - VTM)</b> .....	21
<b>3.3. PENA ZATVORENIH PORA ZASNOVANA NA KOMPJUTERSKOJ TOMOGRAFIJI (CT)</b> .....	22
<b>3.4. NUMERIČKO MODELIRANJE</b> .....	25
<b>3.4.1 ANALIZA PENE SA OTVORENIM PORAMA METODOM KONAČNIH ELEMENATA</b> .....	25
<b>3.4.2. ANALIZA PENE SA ZATVORENIM PORAMA METODOM KONAČNIH ELEMENATA</b> .....	27
<b>4. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA</b> .....	29
<b>4.1 PROIZVODNJA POROZNIH ALUMINIJUMSKIH PENA</b> .....	29
<b>4.2 ISPITIVANJE JEDNOOSNIM PRITISKIVANJEM</b> .....	30
<b>4.3 CT SLIKE ZASNOVANE NA TRODIMENZIONALNOM MODELU SA ZATVORENOM ČELIJSKOM STRUKTUROM</b> .....	31
<b>4.4 TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA</b> .....	32
<b>4.4.1 TRIBOKOROZIJA</b> .....	33
<b>4.4.2 METODE PROCENE KOROZIJE</b> .....	34
<b>4.4.3 TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA PENE OD ALUMINIJUMA</b> .....	36
<b>5. IZBOR MATERIJALA KORIŠĆENJEM ALATA ZA ODLUČIVANJE (MCDM)</b> .	38
<b>5.1 IZBOR MATERIJALA: PRAKTIČNA STUDIJA IZBORA LAKIH MATERIJALA ZA PRIMENU KOD ŽELEZNIČKIH VAGONA</b> .....	41
<b>5.2 METODE VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE</b> .....	44
<b>5.2.1 VIKOR METODA</b> .....	44
<b>5.2.2 TOPSIS METODA (TECHNIQUES FOR ORDER OF PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTIONS)</b> .....	44
<b>5.2.3 METODA PROMETHEE</b> .....	45
<b>5.2.4 WASPAS (WEIGHTED AGGREGATED SUM PRODUCT ASSESSMENT) METODA</b> .....	46
<b>6. REZULTATI I DISKUSIJA</b> .....	48

<b>6.1 EKSPERIMENTALNI REZULTATI</b> .....	48
<b>6.1.1 Ispitivanje ALUHAB pene jednoosnim pritiskivanjem</b> .....	48
<b>6.1.2 Tribološka ispitivanja</b> .....	49
<b>6.2 REZULTATI NUMERIČKOG MODELIRANJA</b> .....	50
<b>6.2.1 Struktura zatvorenih pora</b> .....	50
<b>6.2.2 Otvorena porozna struktura</b> .....	54
<b>6.3 IZBOR MATERIJALA PRIMENOM VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE</b> .....	58
<b>6.3.1 VIKOR metoda</b> .....	59
<b>6.3.2 TOPSIS metoda</b> .....	60
<b>6.3.3 PROMETHEE metoda</b> .....	62
<b>6.3.4 WASPAS metoda</b> .....	65
<b>6.3.5 Izbor optimalnog materijala poređenjem više metoda</b> .....	66
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	68
<b>8. LITERATURA</b> .....	70
<b>9. BIOGRAFIJA</b> .....	84
<b>10. IZJAVA O AUTORSTVU</b> .....	85

## LISTA SLIKA

Slika 1. Dijagram čvrstoća – gustina materijala

Slika 2. Unutrašnja struktura pene otvorene porozne strukture kreirana korišćenjem Voronoi (VTM) algoritma

Slika 3. Metoda livenja koja se koristi za proizvodnju metalnih pena sa otvorenom poroznom strukturom (DUOCEL postupak)

Slika 4. Koraci u postupku metalurgije praša pri proizvodnji metalne pene oslobađanjem gasa

Slika 5. Metoda duvanja koristeći gas kao medijum

Slika 6. Struktura gasne pene i alulight fominal procesa

Slika 7. Šematski prikaz proizvodnje aluminijumske pene metodom ubrizgavanja gasa u rastop (CIMAT i HIDRO procesi)

Slika 8. Tipični prikaz krive napon – deformacija

Slika 9. Proces kreiranja metalne pene otvorenih pora korišćenjem Voronoi modela (VTM)

Slika 10. Detaljni koraci koji su izvedeni za razvoj aluminijumske pene sa zatvorenim porama korišćenjem CT Scan tehnike

Slika 11. Pravac opterećenja i granični uslovi na simetričnom modelu

Slika 12. Pravac opterećenja na poroznu strukturu (a); Granični uslovi na simetričnom modelu (b)

Slika 13. Aluminijumska pena sa zatvorenom poroznom strukturom proizvedena korišćenjem ALUHAB tehnologije - pogled spread

Slika 14. Dijagram napon - deformacija aluminijumske pene sa zatvorenom ćelijskom strukturom

Slika 15. A). 2D presek slike dobijene CT skeniranjem B). Slike sa deformisanim porama V). Slike sa pravilnim rasporedom pora nakon podešavanja praga.

Slika 16. Eksperimentalna postavka nanotribometra

Slika 17. Izbor inženjerskog materijala za lake vagone

Slika 18. Koeficijent trenja u odnosu na različita normalna opterećenja

Slika 19. Dubina prodiranja u zavisnosti od broja ciklusa tokom različitih uslova opterećenja

Slika 20. Podela modela numeričkog uzorka zatvorene porozne strukture u četiri zone za analizu napona u zapreminskom modelu

Slika 21. Nedeformisani uzorak i deformisani uzorak sa zatvorenom poroznom strukturom primenom FEA. Leva strana prikazuje geometrijski model numeričkog uzorka dok desna strana prikazuje konturu napona u pravcu opterećenja (y-osa)

Slika 22. Konture napona numeričkog modela opterećenog pritiskivanjem: Nelinearni čvrsti srednji napon (levo); nelinearni čvrsti maksimalni smičući napon (centar); i nelinearni čvrsti maksimalni glavni napon (desno)

Slika 23. Krive napon–deformacija za numerički model: (A) naponi u pravcima x-, y- i z-ose kao funkcija deformacije; (B) naponi smicanja u pravcima xy, yz i zx kao funkcija deformacije; (C) maksimalni glavni napon, maksimalni smičući napon i maksimalni srednji

napon, kao funkcija deformacije; (D) poređenje krive napon–deformacija u slučaju eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja

Slika 24. Konture Von Mises-ovog napona u smeru ispitivanja za tri različite poroznosti pod jednoosnim ravnomerno primenjenim opterećenjem

Slika 25. Kontura Von Mises-ovog napona, uzorak sa 80% poroznosti; (B) kriva napon–deformacija, log oblik; (C) idealna kriva elasto-plastični napon-deformacija

Slika 26. Krive napon–deformacija za tri različite poroznosti (30, 60, 80%): (A–C) naponi u pravcima x-, y- i z-ose kao funkcija deformacije, respektivno; (D–F) smicajni naponi u pravcima xy, yz i xz kao funkcija deformacije; (G–I) maksimalno glavno naprezanje, maksimalno smicanje i maksimalno srednje naprezanje, kao funkcija deformacije, respektivno

## LISTA TABELA

Tabela 1. Fizičke karakteristike aluminijumske pene u poređenju sa aluminijumom i čelikom

Tabela 2. Karakteristike metalne pene otvorenih pora kreirane primenom Voronoi modela (VTM)

Tabela 3. Uslovi triboloških ispitivanja

Tabela 4. Karakteristike materijala kod FEA modela

Tabela 5. Broj elemenata u simulacijama za tri različite poroznosti

Tabela 6. Hemijski sastav DP 600, TRIP 700 i TWIP čelika

Tabela 7. Karakteristike inženjerskih materijala za MCDM analizu

Tabela 8. Hemijski sastav 6005 - T6 i 6082 - T6

Tabela 9. Naponi u različitim zonama i raspored deformacija pri ispitivanju pritiskivanjem ALUHAB pene

Tabela 10. Osobine materijala za lake vagone

Tabela 11. Inženjerski materijali koji su u primeni za izradu elemenata železničkih vagona

Tabela 12. Normalizacija matrice vrednovanja (Matrica izbora)

Tabela 13. Vrednosti  $S_j$ ,  $[R]_j$  and  $Q_j$  (mera korisnosti, meru beskorisnosti i VIKOR indeks)

Tabela 14. Normalizacija matrice odlučivanja

Tabela 15. Izračunavanje ponderisane normalizovane matrice odluke (sa idealnom najboljom/najgorom vrednošću)

Tabela 16. Euklidska udaljenost od idealne najbolje (pozitivne) i najgore (negativne) vrednosti

Tabela 17. Konačno rangiranje materijala prema rezultatu kalkulacije

Tabela 18. Normalizacija matrice vrednovanja (Matrica izbora)

Tabela 19. Izračunavanje evaluacionih razlika i-te alternative u odnosu na druge alternative

Table 20. Računanje funkcija preferencija  $P_j(a, b)$

Tabela 21. Dobijene vrednosti zbirne preferencije

Tabela 22. Zbirna preferencija za različite materijale

Tabela 23. Zbirna preferencija za različiti materijal za proračun izlaznog toka

Tabela 24. Rangiranje materijala prema toku izlaza, ulaza i razlike

Tabela 25. Normalizovane vrednosti matrice odlučivanja

Tabela 26. Vrednosti dobijene ponderisanom normalizovanom matricom odlučivanja korišćenjem metode zbira (WSM)

Tabela 27. Vrednosti dobijene ponderisanom normalizovanom matricom odlučivanja korišćenjem metode proizvoda (WSP)

Tabela 28. Ocena učinka dobijena ponderisanom normalizovanom matricom odlučivanja korišćenjem obe metode zbira i proizvoda

Tabela 29. Rangiranje materijala korišćenjem više MCDM alata

---

# 1. UVOD

## 1.1 PREGLED

Metalne pene predstavljaju klasu novih naprednih materijala. Ovu grupu materijala odlikuje niz karakteristika kao što su mehaničke, fizičke, električne, termičke i akustičke karakteristike. Moguće ih je koristiti za udarnu apsorpciju energije, strukture u kojima je neophodno redukovanje mase ili u slučaju kontrolisanja protoka toplote. Metalne pene predstavljaju bitan deo u klasi poroznih metala. Uprkos dugoj istoriji i mnoštvu sprovedenih istraživanja i dalje postoji potreba za istraživanjima u oblasti proizvodnje stabilnih metalnih pena. U poslednjih 10 godina sprovode se istraživanja za poboljšanje svojstava metalnih pena, ali istraživači još uvek nisu uspjeli da postignu adekvatne rezultate za poboljšanje kvaliteta metalnih pena na osnovu parametara kao što su uniformnost, stabilnost, ponovljivost i isplativost. U pogledu strukture, metalne pene su kategorisane u dve grupe: metalne pene sa otvorenim porama i metalne pene sa zatvorenim porama strukturom. Metalne pene sa otvorenim porama se nazivaju metalnim sunderom [1]. Kod ovih vrsta pena, pore su međusobno povezane čvrstom i gasovitom fazom koja je neprekidno raspoređena u materijalu [2]. Otpornost na udar ovih pena je povezana i sa karakteristikama materijala i sa poroznošću otvorenih pora. Metalne pene sa strukturom otvorenih pora mogu da učine nosive konstrukcije lakim i mogu da zadovolje druge funkcionalne zahteve. U metalnim penama sa zatvorenom poroznom strukturom, pore su odvojene jedna od druge. Ponovljena distribucija je predstavljena čvrstim polimerom, a gasovita faza se javlja unutar izolovanih pora [3]. Metalne pene sa zatvorenom poroznom strukturom koriste se uglavnom za noseće konstrukcije. Ponekad dolazi do pucanja zidova pora u peni sa zatvorenim porama, što dovodi do stvaranja metalne pene sa otvorenim porama [4]. U ovom radu proučavana su oba tipa metalnih pena. Glavni cilj ove disertacije je eksperimentalna i numerička karakterizacija pena sa otvorenom i zatvorenom poroznom strukturom od aluminijuma i njegovih legura. Aluminijum je izabran zbog njegove dostupnosti u EU i niskih troškova recikliranja. Takođe, aluminijum nije na listi deficitarnih materijala koju je objavila Evropska komisija. Doktorska disertacija je nastala kao rezultat projekta "SELECTA" EU Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network. Primarni cilj projekta „SELECTA“ je naučni pristup zasnovan na održivosti, projektovanju i razvoju legura sa ili bez značajnih količina retkih ili štetnih elemenata uz poštovanje ekološki prihvatljivih normi. Stoga, doktorske disertacije u okviru tog projekta uzimaju u obzir i niz ekonomskih, socioloških, ekoloških i drugih aspekata vezano za aktuelnu zelenu agendu u Evropskoj Uniji, kao i Srbiji. Takođe, sva istraživanja u okviru ove doktorske disertacije odvijala su se u skladu sa propisima i smernicama Evropske komisije. Prvi zadatak je razvoj metalne aluminijumske pene sa optimizovanim dizajnom. Proizvodnja metalnih pena je otežana zbog potpuno slučajnog rasporeda pora. Različite metode za proizvodnju metalnih pena daju i različite stepene fleksibilnosti prilikom dizajniranja i proizvodnje istih. Dakle, prethodno urađeni model, postulati dizajna, teorijske paradigme i već razvijeni modeli su temeljno proučeni pre kreiranja novog modela. Neke od dostupnih tehnologija koje je moguće koristiti za karakterizaciju metalnih pena su:

- Magnetna rezonanca (MRI) i mikro CT skeniranje,
- Metoda kompjuterski potpomognutog dizajna (CAD),
- Metoda zasnovana na numeričkom Voronoi modelu (VTM) i
- metalografska analiza preseka.

Među navedenim metodama, 3D modeliranje uz primenu Voronoi modela je najbolja metoda pri dizajniranju modela metalne pene sa strukturom otvorene poroznosti. To je nova metoda koja se koristi za dizajn fizičkog modela metalne pene. Za metalne pene sa strukturom zatvorene poroznosti, treba uzeti u obzir metodologiju dizajna zasnovanu na mikro-CT skeniranju. Ove tehnike omogućavaju detaljne informacije o porama, njihovoj debljini i heterogenosti topologije. Drugi zadatak se sastoji od fizičkog razvoja modela metalne aluminijske pene u proizvodnom pogonu u ALUINVENT-u, Mađarska (industrijski partner u okviru projekta "SELECTA"). Tehnologija razvijena u okviru ALUINVENTA ima zaštićeno ime ALUHAB. Tehnologija proizvodnje metalne aluminijske pene (ALUHAB pene) zasnovana je na metodi uduvavanja gasa. Metoda uduvavanja gasa se koristi za formiranje metalne aluminijske pene od posebne legure aluminijuma koja sadrži ultrafine čestice safira. Nakon izrade uzorke ALUHAB pene je neophodno eksperimentalno ispitati jednoosnim pritiskivanjem u cilju boljeg proučavanja mehanizma deformacije. U okviru eksperimenta uočene su različite karakteristične zone – elastična, zaravnanje i zona razaranja-ojačanja. Eksperiment omogućava da se utvrdi nosivost materijala, ponašanje pri testu pritiskivanja, uticaj poroznosti na strukturne ligamente (zidove) pora, uticaj pora, veličinu pora i drugo. Važno je i proučavanje triboloških svojstava porozne strukture sa zatvorenim porama od legure aluminijuma. Tribološka ispitivanja uzoraka su izvršena na CSM nanotribometru sa linearnim naizmjeničnim kretanjem. Uzorci su testirani sa nekoliko vrednosti opterećenja: 10 mN, 25 mN, 50 mN, 75 mN i 100 mN. Za određivanje vrednosti dinamičkog koeficijenta trenja se primenjuje softver nanotribometra. Dalje istraživanje obuhvata numeričku analizu korišćenjem metode konačnih elemenata u softveru FEMAP sa NX Nastran solverom. Cilj je da se metalna aluminijska pena ispita pritiskivanjem numeričkim i eksperimentalnim putem sa ciljem dobijanja približnih rezultata numeričkom analizom i eksperimentom. Za numerička ispitivanja korišćena je elasto-plastična nelinearna statička analiza. U analizi i poređenju numeričkih rezultata korišćene su vrednosti Von Misesovog napona u skladu sa preporukama odgovarajućih standarda. U numeričkim analizama, su za izradu mreže konačnih elemenata korišćeni tetraedarski konačni elementi su korišćeni za simulaciju izotropnog mehaničkog ponašanja. Pri definisanju materijalni karakteristika modela korišćene su vrednosti za aluminijum. Gornja površina uzorka je ravnomerno opterećena silom pri ispitivanju pritiskivanjem. Rezultati dobijeni metodom konačnih elemenata su upoređeni sa rezultatima dobijenim eksperimentalnim putem.

## 1.2 CILJ RADA

Ciljevi doktorske disertacije su:

1. Definicija obrade pene na bazi aluminijuma sa aspekta konstruktivne primene.
2. Razvoj 3D modela aluminijske pene sa otvorenom i zatvorenom ćelijskom strukturom zasnovan na numeričkoj simulaciji kako bi se opisalo mehaničko ponašanje i uticaj poroznosti na mehaničko ponašanje.
3. Određivanje metode izbora materijala za konstrukcijsku primenu pena na bazi aluminijuma.
4. Karakterizacija strukture aluminijske pene i tribološkog ponašanja primenom eksperimentalnih metoda.

Osnovne hipoteze od kojih se polazi:

1. Različite proizvodne tehnologije mogu da se primene za proizvodnju pena na bazi aluminijuma čime se omogućava variranje procesnih parametara radi dobijanja optimalne poroznosti, geometrije i tipa pora.



2. Različite geometrije elemenata u okviru numeričkog modeliranja poroznih struktura su više ili manje približne realnoj strukturi materijala. Metoda Voronoi modela može omogućiti efikasno modeliranje nepravilnih poroznih struktura na bazi aluminijuma sa otvorenim porama, približno geometriji strukture realnih materijala.
3. Postoji direktan uticaj oblika, veličine i distribucije pora na mehaničke karakteristike materijala, odnosno kontrolom poroznosti može se direktno upravljati mehaničkim osobinama materijala.
4. Postojeće metode izbora materijala omogućavaju poređenje različitih materijala prema njihovoj finalnoj primeni u realnoj praksi, kao i prema željenim karakteristikama, omogućavajući tako određivanje optimalnog materijala za specifične primene.
5. Postojeće eksperimentalne metode omogućavaju precizno određivanje strukture materijala po zapremini, kao i mehaničkih osobina materijala, čime je omogućena validacija primenjenog numeričkog modela. Razvoj kompjuterske tomografije (CT skeniranje) omogućio je preciznu strukturnu karakterizaciju materijala po zapremini, bez razaranja uzoraka.

Istraživanja u okviru doktorske disertacije su teorijskog, eksperimentalnog i numeričkog karaktera. Metode korišćene u radu su:

1. Eksperimentalne metode.
2. Numeričko modeliranje.
3. Statističke korelacije.

Nivo poroznosti, oblik, veličina i distribucija pora unutar porozne strukture imaju najznačajniji uticaj na mehaničko ponašanje dobijenog materijala. Eksperimentalna studija proizvodnog procesa za otvorene i zatvorene porozne strukture na bazi aluminijuma će se koristiti za proizvodnju različitih uzoraka. Eksperimentalni uzorci su analizirani u odnosu na strukturne, fizičke i mehaničke karakteristike, kao i izvršilo poređenje sa numeričkim modelima. Izrada uzoraka je realizovana u kompaniji ALUINVENT u Mađarskoj.

Numeričke metode i analiza su veoma efikasni alati u dizajniranju materijala, njegovoj karakteri i predviđanju ponašanja pri funkcionisanju u planiranom sistemu. Njihova primena za porozne strukture započela je u poslednjoj deceniji, ali se još uvek razvijaju numerički modeli. Eksperimentalne tehnike kao što je kompjuterska tomografija (CT) će biti korišćene za određivanje strukturnih svojstava materijala. Dobijene CT slike realnog eksperimentalnog uzorka korišće se za modeliranje konačni elemenata (FEM) porozne strukture na bazi aluminijuma, sa zatvorenim porama. Pored navedenog, numeričko modeliranje korišće se i za modeliranje nepravilnih poroznih struktura sa otvorenim porama, koja je po svojoj strukturi slična geometriji legura na bazi aluminijuma. Metoda Voronoi (VTM) omogućava različite varijacije rasporeda pora, debljine ligamenata i zida pora, nivoa poroznosti i gustine. Tribološko ponašanje razvijenih materijala pružice uvid u mehanizme habanja i uticaje habanja koji će odrediti njegovo ponašanje u simuliranim uslovima sličnim stvarnim primenama. Eksperimentalno ispitivanje će omogućiti utvrđivanje optimalnih eksperimenata koje je moguće koristiti u karakterizaciji poroznih aluminijumskih struktura. Metode karakterizacije makro i mikro poroznih struktura su još uvek u fazi razvoja.

Na osnovu eksperimentalnih i numeričkih i rezultata primeniće se metode izbora materijala za specifične primene, za različite materijale bazirane na aluminijumu. Korišće se višekriterijumska optimizacija (MCDM) kako bi se omogućio izbor optimalnog materijala i njegove strukture za specifičnu primenu.

Na mehanička svojstva poroznih materijala najveći uticaj imaju poroznost, oblik. Izrada više eksperimentalnih uzoraka metalne pene na bazi legure aluminijuma sa otvorenim i zatvorenim

porama omogućava analizu uticajnih parametara, s aspekta dobijanja optimalnih strukturnih, fizičkih i mehaničkih karakteristika, kao i za poređenje sa numeričkim modelima.

Sadržaj doktorske disertacije:

1. Uvod
2. Dizajn porozne strukture
3. Eksperimentalno ispitivanje
4. Numeričko modeliranje
5. Izbor materijala korišćenjem alata MCDM
6. Rezultati i diskusija
7. Zaključak
8. Literatura

U okviru istraživanja u ovoj doktorskoj tezi objavljena su dva visoko rangirana naučna rada [149, 153], kao što se može videti u poglavlju 6 gde su prikazani rezultati.

---

## 2. PREGLED LITERATURE I DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

### 2.1 POROZNE STRUKTURE

Porozne strukture su poznate već dugi niz godina. Istraživanja tokom poslednje decenije ukazala su na nove mogućnosti primene poroznih struktura. Najčešće primenu nalaze u različitim domenima upravljanja energijom, toplotne izolacije, filtracije fluida, ili prigušenje vibracija. Porozni materijali veće poroznosti imaju relativno nisku gustinu, visoku strukturnu krutost, veliku površinu razmene ( $102-104 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ), dobru otpornost na toplotne udare, visoke pritiske, visoke temperature i termičke cikluse, odličnu apsorpciju mehaničkih udara i elektromagnetnog prigušenja, pa se u prirodi porozni materijali često nalaze kao strukturni materijali [5, 6]. Porozne strukture mogu biti strukturno-funkcionalni materijali sa optimalnim indeksom fizičko-mehaničkih svojstava, zbog svoje poroznosti. Takve strukture predstavljaju napredne materijale i izazovne su za istraživanje. Porozne strukture su u osnovi vrlo slični organskim materijalima, kao što je slučaj kod na primer polimerne pene. Kod neorganskih poroznih struktura, pore su međusobno povezane preko ligamenata ili uskih kanala i predstavljaju osnovu skeletne strukture matrice. Kako bi se postigla veća gustina celokupne strukture matrice su postavljene naizmenično u redovima i kolonama. Karakteristike poroznih materijala variraju u zavisnosti od sastava materijala, oblika i rasporeda pora i veličine pora. Da bi se od poroznog materijala očekivalo da ima dobre performanse, on mora imati dve ključne karakteristike: mora imati dosta pora i njegove pore moraju biti posebno dizajnirane.

- Prirodne porozne strukture

Prirodna porozna tela se nalaze u prirodi, kao što su drvo, koral, sunđer, stena, kamen, zemlja, lišće biljaka, kosti. Na primer, kost čoveka ima poroznost od 50-90% i može da podnese veliko opterećenje pod različitim uslovima. Pluća kod čoveka imaju veliku poroznost koja omogućava protok vazduha. Sneg takođe spada u kategoriju prirodnog poroznog materijala zbog visoke latentne toplote isparavanja i visoke refleksije. Prirodno drvo je porozni materijal. U porama prirodnih poroznih struktura gotovo uvek je sadržana tečna komponenta, dok je u slučaju veštačkih poroznih tela fluidna faza uglavnom gas. Generalno, prirodne porozne strukture postoje u formi fluida i čvrstih tela. Treba naglasiti da je jako tanka linija u klasifikaciji između poroznih struktura i pena u nekim oblastima primene, kao što je prehrambena industrija. U tom slučaju porozne strukture mogu da se sastoje od makro klastera gasova koji sadrže rasute čestice dok se pene uglavnom sastoje od gasovite i tečne faze.

- Veštačke porozne strukture

Veštačke porozne materijale je proizveo čovek. To spadaju najrazličitiji proizvodi kao što su cigle, odeća, cement, sunđer, papir i drugo. Najčešće korišćene veštačke porozne strukture su nemetalne pene koje uključuju pene na bazi polimera, vodene pene, poroznu keramiku i drugo. Polimerne pene (porozna plastika ili plastične pene) uglavnom se koriste u čvrstom obliku [7] i ispunjene su porama poput mehurića. U polimernoj peni često je zastupljen mrežasti tip strukture. Mogu se čak smatrati kompozitnom plastikom jer ovi materijali sadrže veliki broj pora ispunjenih gasovima. Ovakve porozne strukture se u velikoj meri koriste u industriji plastike, gde se dobijaju metodom nukleacije mehurića. Nukleacija pora se može desiti ili na površini nekih aditiva ili se može sama razvijati. Na osnovu krutosti, polimerne pene su

grupisane u tri kategorije: fleksibilne, čvrste i polučvrste. Kod čvrstih polimernih pena, kristalna struktura se dobija na određenoj temperaturi koja je većinom oko sobne temperature. Kod fleksibilnih polimernih pena polimerni kristali imaju tačku topljenja nižu od sobne temperature. Polučvrsta pena se dobija na temperaturi između čvrste i fleksibilne polimerne pene. Materijali koji se koriste za dobijanje polimernih pena su najčešće poliuretan (PU), polipropilen (PP) i poliamid (PA). Polimerne pene se odlikuju velikom koncentracijom pora. Neke od karakteristika polimernih pena su:

- Niska relativna gustina – Kako polimerne pene uglavnom sadrže mnogo pora, one imaju veoma nisku relativnu gustinu.
- Dobra toplotna izolacija - Zbog velikog broja pora, toplotna provodljivost polimernih pena je znatno smanjena. Gas prisutan unutar pora ima manju toplotnu provodljivost u poređenju sa drugim gustim čvrstim materijalima. Gasovita faza je odvojena u slučaju penastih materijala sa zatvorenim poroznom strukturom, čime se smanjuje konvekcijski prenos toplote.
- Postepena apsorpcija energije - Gas prisutan unutar pora se kompresuje pod uticajem udarnog opterećenja. Ova kompresija i dekompresija na taj način pomažu apsorpciji energije.
- Dobra zvučna izolacija - Energiju zasnovanu na zvučnom talasu porozno telo apsorbuje tako što prekida refleksiju i prenos zvučnog talasa. Pored povećane krutosti polimerne pene će pomoći u eliminisanju ili smanjenju rezonancije kao i buke koju stvara zvučni talas.
- Odlična specifična čvrstoća - Specifična čvrstoća se može navesti kao odnos čvrstoće materijala i relativne gustine. Povećanjem poroznosti mehanička čvrstoća se smanjuje, ali se specifična čvrstoća povećava.

Kod poroznih keramika, poroznost varira od 20-95 % [8,9]. Najčešće primenjene su sačasta keramika (sastoji se od poligonalnih stubastih pora sa ravanskom strukturom) i keramička pena (sastoji se od poliedarskih pora sa prostornom strukturom). Keramičke pene mogu da sadrže otvorene i zatvorene pore, pri čemu obe vrste uglavnom imaju veću zapreminsku gustinu i relativno nisku toplotnu provodljivost. Otvorena struktura pora ima veće ivice u poređenju sa zatvorenim strukturom pora u skladu sa svojom mrežastom 3-D strukturom i velikom specifičnom površinom. Porozna keramika ima primenu u metalurgiji, filtraciji metalnih rastopa, prečišćavanju gasova, u medicini (koštani graftovi, kao dentalni materijali) i drugo [10]. Neke važne karakteristike porozne keramike uključuju dobru termičku stabilnost, hemijsku stabilnost, krutost i specifičnu čvrstoću. Porozna keramika je korišćena i kao materijal za izradu filtera različitih namena uključujući i industrijsku primenu. Njihova upotreba se može naći u procesu disperzije, adsorpcije i separacije u različitim tehničkim i industrijskim oblastima.

Vodene pene - U vodenim penama mehurići aglomeriraju i izoluju se jedan od drugog tečnim filmom. Molekuli polimera ili deterdženti se mogu koristiti kao površinski aktivni agens [11]. Primeri vodenih pena u prehrambenoj industriji su sladoledi, pivo, hleb, koka-kola itd. Na primer u slučaju hleba, kvalitet zavisi od brzine mešanja testa i vremena mešanja, jer spora brzina mešanja dovodi do stvaranja velikih pora, a mehurići se urušavaju što dovodi do pogoršanja kvaliteta hleba. U peni za prehranu, molekul proteina ili alkohola deluje kao površinski aktivni agens. Jedna od primena vodene pene je flotacija, u kojoj se mineralne čestice odvajaju kada se mehur diže, dok pena ostaje sa zrnima rude. Ostale primene različitih vrsta pena su i u naftnoj industriji, amortizerima, privremenim toplotnim izolatorima i gašenju požara.

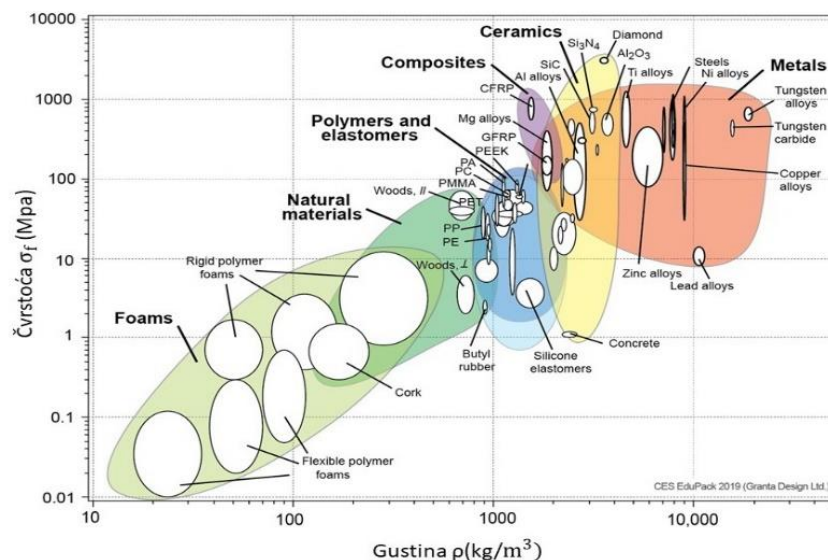
## 2.2 METALNE PENE

Metalnom penom se smatra materijal dobijen isključivo kombinacijom metalnih materijala i gasnih uključaka. Metalne pene su najznačajnije strukture iz kategorije poroznih materijala. Pripadaju relativno složenoj grupi inženjerskih materijala. Iako jedna od ključnih oblasti istraživanja, trenutno je oblast metalnih pena samo delimično istražena i tehnologije proizvodnje samo donekle osvojene. Uprkos dosadašnjim istraživanjima, problem sa kojim se istraživači susreću je mogućnost da se poveća uniformnost, stabilnost, ponovljivost ili profitabilnost metalnih pena. Samim tim razvoj metalnih pena je jedan od najvećih izazova u oblasti poroznih materijala. U razvoju ovih materijala, pored naučnih istraživanja, veoma veliki doprinos ima iskustveno znanje vezano za različite proizvodne tehnologije. Kod metalnih pena struktura pora se sastoji od čvrstog materijala. Za razliku od metala kao što su Fe, Sn, Ag itd. Al je pogodan za proizvodnju pena zbog svojih karakteristika. Metalne pene uglavnom imaju veoma veliku poroznost. Osnovni materijal (metal) zauzima samo 5-25% ukupne strukture, pa se metalna pena smatra izuzetno laganim materijalom.

Prednosti primene metalnih pena:

- Poboljšanje bezbednosti zgrada i automobila ekonomski isplativim materijalima koji apsorbuju energiju.
- Cena proizvoda se može povećati
- Smanjenje nivoa buke prigušenjem vibracija i apsorpcijom zvučnih talasa.
- Nova istraživanja ukazuju na potencijal inovacija vezano za razvoj metalnih pena
- Posebno treba istaći važnost pene na bazi metala kao što su gvožđe, aluminijum.

Dijagram (Slika 1.) prikazuje poredjenje pena i ostalih vrsta materijala prema kriterijumu zapreminske gustine u odnosu na mehaničke karakteristike materijala.



**Slika 1.** Dijagram čvrstoća – gustina materijala [33]

Slika 1 pokazuje da su keramika, metali i legure čvrsti materijali i da imaju veliku gustinu [33]. Zbog direktne korelacije između gustine i Jangovog modula, keramike, metali i legure imaju veću numeričku vrednost ove karakteristike. Pene sa donje leve strane dijagrama su čvrste i fleksibilne polimerne pene koje imaju najmanju gustinu i imaju nižu numeričku

---

vrednost modula elastičnosti u poređenju sa drugim materijalima jer se vazduh zadržava unutar pora. Kod primera izbora materijala opisano u narednim poglavljima ovog rada, dve glavne osnovne veličine su Jangov modul i gustina. U odnosu na keramiku (čvrsta) i metale (teški), metalne pene su lakše i stoga su moguće različite oblasti primene gde se zahteva mala težina. Metalne pene mogu se kategorisati u dve kategorije u skladu sa strukturom pora, a to su pene sa otvorenim porama i pene sa zatvorenim porama [12, 13].

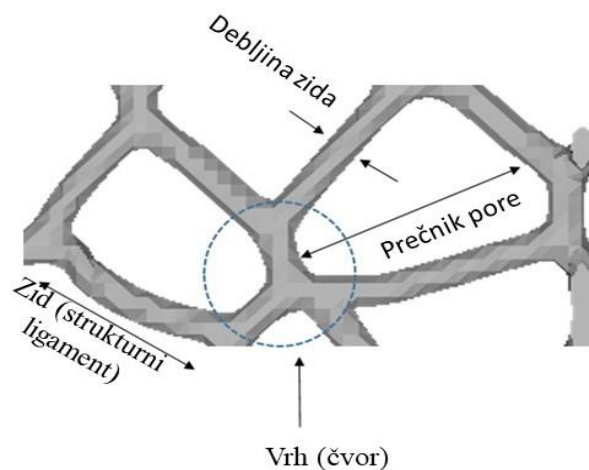
1. Pena otvorene strukture pora: Metalne pene otvorene porozne strukture se takođe nazivaju metalnim sunderom [1]. Čvrsta i gasovita faza su u ovom slučaju ravnomerno raspoređene kroz pore [2]. Otpornost na udar ovih pena je povezana i sa karakteristikama polimera i sa poroznošću. Metalne pene sa otvorenom poroznom strukturom mogu da učine nosive konstrukcije lakim uz zadovoljavanje drugih funkcionalnih zahteva.

2. Pena zatvorene porozne strukture: Kod ovakvih tipova pene pore su odvojene jedna od druge. Unutar izolovanih pora čvrstog polimera formira se gasovita faza [3]. Metalne pene sa zatvorenom ćelijskom strukturom primenjive su samo kao noseće konstrukcije. Ponekad u zatvorenoj ćelijskoj strukturi dolazi do pucanja ćelijskog zida što dovodi do formiranja otvorene strukture [4].

Sa stanovišta strukture, termin pena se najbolje može objasniti kao supstanca nastala hvatanjem molekula gasa u čvrstu supstancu ili tečnost. Proces dispergovanja gasnih mehurića u tečnosti se takođe može opisati na ovaj način [14]. Uglavnom je u penama zapremina gasa velika a tanki filmovi čvrste ili tečne materije razdvajaju uključke gasa. Da bi se dobila čvrsta pena ili sačuvala morfologija pene, tečna faza se može pretvoriti u solid [15]. Za dobijanje metalne pene se uglavnom koristi tečna faza [16]. Metalna pena je u nekim slučajevima čvrsta dok tečna metalna pena predstavlja njen pandan [17]. Jedna od glavnih odlika pene je relativna gustina [18]. Moguće je izračunati relativnu gustinu deljenjem prividne gustine sa zapreminskom gustinom. Termin struktura se koristi za označavanje ćelijskih materijala na različitim nivoima posmatranja (strukturolgija), geometrijske arhitekture skeletnog tipa u pojedinačnim porama i njihovog prostornog rasporeda.

Pena se može klasifikovati u dve kategorije: monodisperzna pena i poli-disperzna pena u zavisnosti od veličine mehurića. Monodisperzna pena se formira od mehurića jednake veličine, dok se poli-disperzna pena formira sa velikom varijacijom u veličini mehurića [19]. Sferna struktura će se prvo proizvesti formiranjem tečnosti, iz sferne strukture tečnost se ispušta i nakon prolaska kroz kratku prelaznu fazu dobija se konačna poliedarska struktura pene [20]. Mehurići sastavljeni od sferne strukture tokom nastajanja pene će se na kraju transformisati u ćelije. Glavne strukturne komponente pora su - ivica platoa (potpora i ivica), zid (strukturni ligament) i vrh (čvor). Veličina pore je relevantan parametar i u korelaciji sa relativnom gustinom [21]. Zid koji se naziva i lice pore je membrana ili tanak film koji se završava granicama platoa. Debljina zida zavisi od materijala pene. Metalne pene imaju najveću debljinu od 200 um, dok tečne pene imaju najnižu vrednost debljine od 10 nm. Na slici 2 prikazana je unutrašnja struktura pene otvorene porozne strukture kreirana korišćenjem Voronoi (VTM) algoritma.





**Slika 2.** Unutrašnja struktura pene otvorene porozne strukture kreirana korišćenjem Voronoi (VTM) algoritma

Pore obično imaju poliedarski oblik kada je relativna gustina ispod 0,1. Savremene tehnologije pene u tečnom stanju mogu se koristiti za oblikovanje metalne pene sa zatvorenim ćelijskim strukturama. Pore se mogu konstruisati u različitim poliedarima. Oblik se određuje koristeći pravila platoa i minimizirajući površinu. Pravila platoa su data u nastavku [22]. Prvu metalnu penu pronasao je B. Sosnick 1948. godine koja je nazvana „penasta masa metala,“ [23] u koju je mešavina aluminijuma i žive napravljena u zatvorenoj komori visokog pritiska. Mešavina je prvo istopljena i čim je pritisak pušten, živa je isparila što je dovelo do stvaranja pene. J.C. Elliot je 1956. opisao proizvodnju prve metalne pene od aluminijuma korišćenjem sredstava za duvanje kao što su  $ZrH_2$  i  $TiH_2$ , ali je nestabilnost pene bila glavni nedostatak ove studije [24]. Pashak je 1960-ih došao na alternativnu ideju čvrstog penjenja [25]. U ovom eksperimentu je pomešao magnezijum i aluminijumski metalni prah sa kadmijum karbonatom i presovao smešu, nakon što je zagrejao blizu temperature topljenja, dobijena je porozna struktura. Kasnije se došlo do toga da se mogu formirati pore u vidu ljuspica, pa je preporučeno zagrevanje smeše iznad tačke topljenja metala. 1963. godine, Allen et al. [26] je istražio da ako se ekstruzioni prekursor zagreje iznad tačke topljenja, a zatim se izvrši brzo hlađenje nakon ekspanzije, nastaje stabilna pena. Eksperiment je izvršio imajući u vidu pređašnji postupak i dobio stabilniju penu. Analiziran je razlog urušavanja pene ili nestabilnosti pene, odnosno loma oksidnog sloja na površini zida koji sadrži nanočestice. Isplativa metalna pena se može proizvesti direktnim penjenjem rastopa metala ili indirektnim penjenjem metalnog praha. Ova metoda je ustanovljena 90-ih godina. Ponovljivost i kontrola arhitekture pene su glavni problemi koje je potrebno rešiti kako bi se postigla uniformna porozna struktura. Leitneir i saradnici su 2000. godine u Austriji uspešno razvili METCOMB proces [27, 28]. Stabilnost pene se ne može poboljšati ako i dok se ne postigne jasno razumevanje procesa iako su istraživački rad J. Banhart, G. Kaptai i H.P. Degischer o stabilnosti pene dali neke smernice i odgovore. Potrebno je pronaći tehnologiju za jeftinije i stabilnije metalne pene. Tokom 90-ih, disperzija u metalnom rastopu i stabilizacija tečne pene postala je predmet interesovanja mnogih istraživača. Neke istraživačke studije su zaključile da čestice mogu delovati kao površinski aktivni agensi jer mogu imati sposobnost da efikasno smanje površinski napon. Brojne publikacije iz 60-ih i 70-ih su pokazale da se viskozitet

---

topljenja i debljina aluminijske pene mogu povećati kako bi se poboljšala stabilnost. Ove metode uključuju:

- Primenu aditiva na bazi slike [29]
- Dodavanje praha mangan oksida kroz oksidaciju [30]
- Mešanje aluminijske šljake sa aluminijumom [31]
- Mešanje različitih gasova kao što su argon, kiseonik i azot velikom brzinom [32]

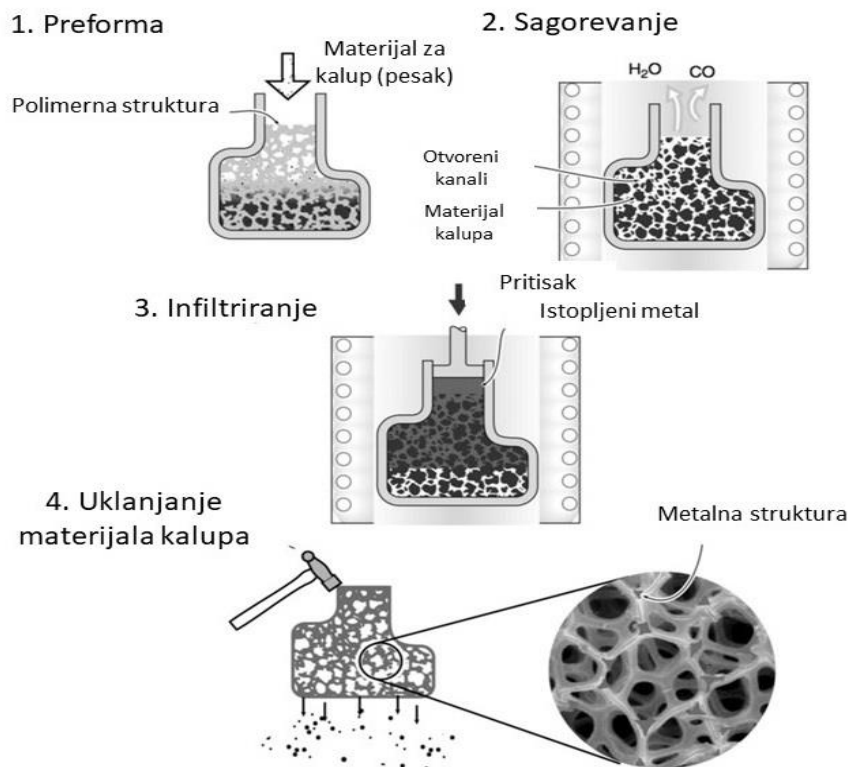
### 2.3. PROIZVODNE TEHNOLOGIJE

Metalne pene se mogu napraviti primenom niza tehnologija. Proizvodni procesi koji se primenjuju za dobijanje metalnih pena nisu idealni, što rezultira određenim varijacijama svojstava pene. Trenutni stadijum razvoja metalnih pena pokazuje veliki potencijal u stabilnosti proizvodnog procesa i unapređenju njihovih karakteristika, a tempo razvoja tehnologija primenjivih u proizvodnji metalnih pena sve je intenzivniji. Metalne pene se proizvode različitim tehnologijama. Tehnologije su podeljene u četiri grupe, one u kojima se pena proizvodi iz gasne faze, one u kojima se pena elektrotaloži iz vodenog rastvora, one koje se dobijaju iz tečnog stanja i one u kojima se pena dobija u čvrstom stanju. Deo najrasprostranjenijih tehnologija prikazan je u daljem tekstu.

#### 1. Tehnika livenja sa prekursorom od polimera ili voska

Tehnologija livenja korišćenjem prekursora od polimera ili voska se koristi za dobijanje pene otvorenih pora. Prekursor od polimera ili voska se može koristiti kao struktura za izradu kalupa za livenje gde se mogu oblikovati različite vrste metala i njihove kombinacije. Prvi korak ovakvog proizvodnog procesa podrazumeva izbor pene polimera ili voska otvorene porozne strukture koja ima željenu veličinu i oblik pora i relativnu debljinu zida pora, koja se zatim premazuje rastvorom kalupa ili keramičkim prahom [33]. Nakon premazivanja i sušenja, struktura se naliva peskom. Sledeći korak podrazumeva pečenje oblika željene strukture pri kom dolazi do topljenja i izbacivanja polimera ili voska. Nakon toga istopljena metalna smeša se puni u kalup i ostavlja da se ohladi. Termičkom obradom koja odgovara vrsti metala se topi polimer i ostaje samo metalna struktura. Ova tehnika se može koristiti za proizvodnju pene iz skoro svakog metala. Metalna pena otvorene porozne strukture koja se proizvodi ovim postupkom uglavnom ima relativnu gustinu ispod 0,05mm i veličinu pora od 1 do 5 mm. Šematski prikaz ove tehnologije prikazan je na slici 3.

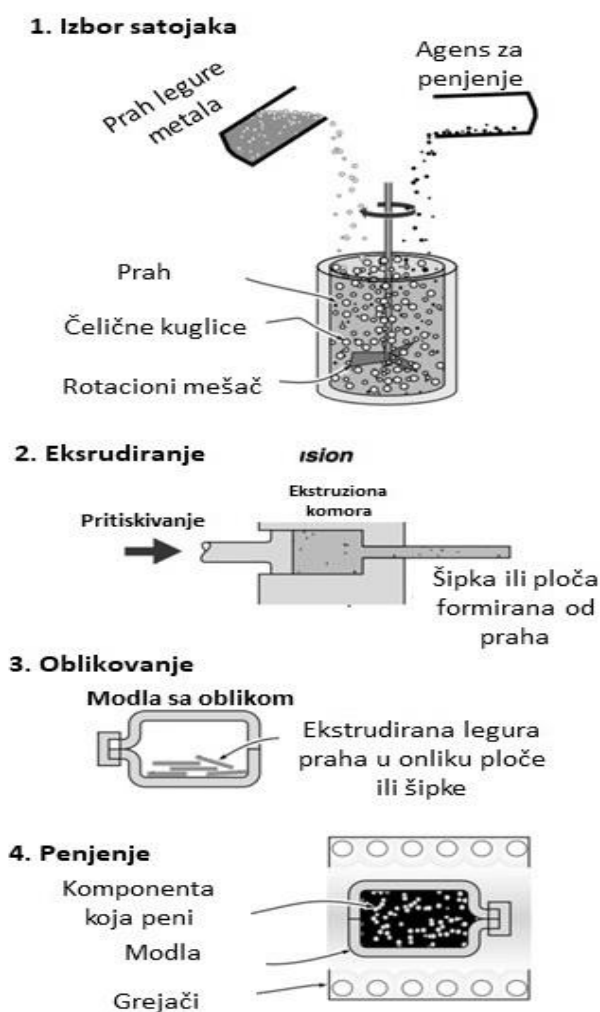




**Slika 3.** Metoda livenja koja se koristi za proizvodnju metalnih pena sa otvorenom poroznom strukturom (DUOCEL postupak) [14]

## 2. Ekspanzija zarobljenog gasa

Metoda ekspanzije zarobljenog gasa se koristi za proizvodnju metalnih pena sa otvorenom poroznom strukturom. U ovom postupku, tehnologija metalurgije praha se koristi za dobijanje dispergovanih sitnih pora koje sadrže inertni gas pod visokim pritiskom. Kada se takvi materijali zagreju, pritisak u porama se povećava što dovodi do širenja pora kroz okolni metal. Tako može da se obrađuje prah Ti-6Al-4V. Prah se zatvara u kanister od iste legure. Iz kanistera se uklanja kiseonik a zatim se puni argonom pod pritiskom u rasponu od 0,3 do 0,5 MPa kako bi se stvorila inertna atmosfera unutar kanistera. Kanister se nakon toga zatvara dok je u njemu relativna gustina od 0,9–0,98, čime se prouzrokuje povećanje pritiska približno osam puta [33]. Primarni nedostatak je to što je povećani pritisak suviše nizak da izazove ekspanziju Ti-6Al-4V na sobnoj temperaturi. Takođe, broj pora je relativno mali. Da bi se ovo prevazišlo, sledeći postupak je poznat kao korak kotrljanja, da bi se stvorila ujednačenija distribucija sitnih pora i da bi se poboljšala struktura. Proces je prikazan na slici 4.



*Slika 4. Koraci u postupku metalurgije praha pri proizvodnji metalne pene oslobađanjem gasa [14]*

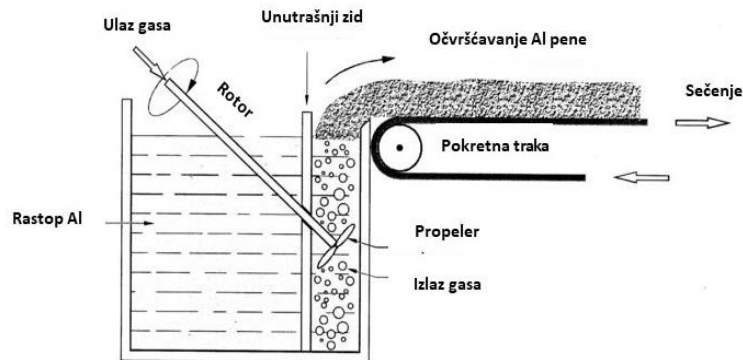
U slučaju legura titanijuma, valjanje se vrši na 900–940°C što dovodi do izduženja i uravnavanja šupljina u pravcu valjanja. Pošto se praznine prevode u dvodimenzionalne, lica šupljina dolaze u kontakt, stvarajući tako nizove sitnih pora ispunjenih gasom. Poslednji korak je ekspanzija zagrevanjem na 900°C u trajanju od najmanje 20 – 30 sati. Zbog visoke temperature, unutrašnji pritisak u porama se povećava odnosom apsolutne temperature peći prema temperaturi okoline od 10-16 MPa, što uzrokuje smanjenje ukupne gustine uzorka i dilataciju puzanja. Ova metoda se koristi u proizvodnji metalne pene zatvorene strukture sa frakcijom šupljina do 0,5 i veličinom šupljina od 10–300 mm.

### 3. ALKAN proces

Alkan proces primenjuje se u proizvodnji metalnih pena zatvorene strukture. Alcan je prvi patentirao tehniku duvanja gasom [34] nakon norveške kompanije Norsk Hidro [35]. Početni

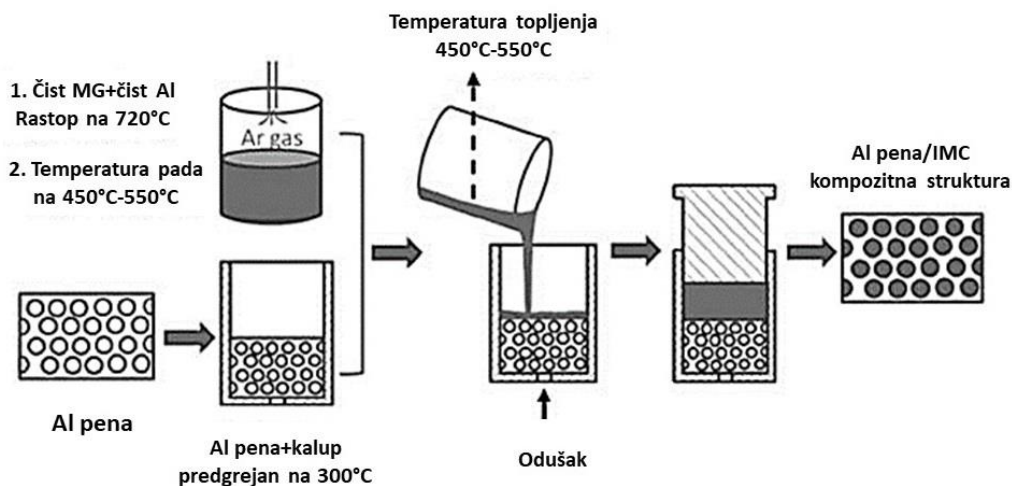
sastojak u oba procesa bili su ili aluminijum oksid ili čestice silicijum karbida. Koristi se proces flotacije iz rastopa, koji se meša primenom tehnologije vrtložnog mešanja.

Šema projektovanja metode uduvanja (gasa) je prikazana na slici 5. U ovom procesu je korišćen vazduh kao medijum za potrebe uduvanja gasa, a u hidro procesu kao sredstvo za uduvanje korišćen je vazduh ili ugljen-dioksid. Alcan [36] je patentirao 'Stabilizovanu strukturu od metalne pene' 1992. godine gde je argon korišćen kao gas koji peni. Alcan je licencirao proizvodnju aluminijumske pene Cimatu [37] 1997. godine.



*Slika 5. Metoda duvanja koristeći gas kao medijum [15]*

Još jedna tehnologija je ona pod tržišnim imenom 'Alulight and fominal' koja koristi kompaktni prah i aditiv za brizganje [38]. 1993. godine Šapovalov [39] je uspešno proizveo metalne pene sa dugim porama očvršćavanjem tečnih legura i vodonika, poznato kao Gasarov proces. Godine 1997. rastopljeni aluminijum je pomešan sa česticama magnezijum oksida što je rezultiralo proizvodnjom pene Alcan procesom [40]. Šema Gasar metode je prikazana na slici 6. Magnezijum oksid pomaže u poboljšanju obradivosti pene u poređenju sa silicijum karbidom ili aluminijum oksidom.



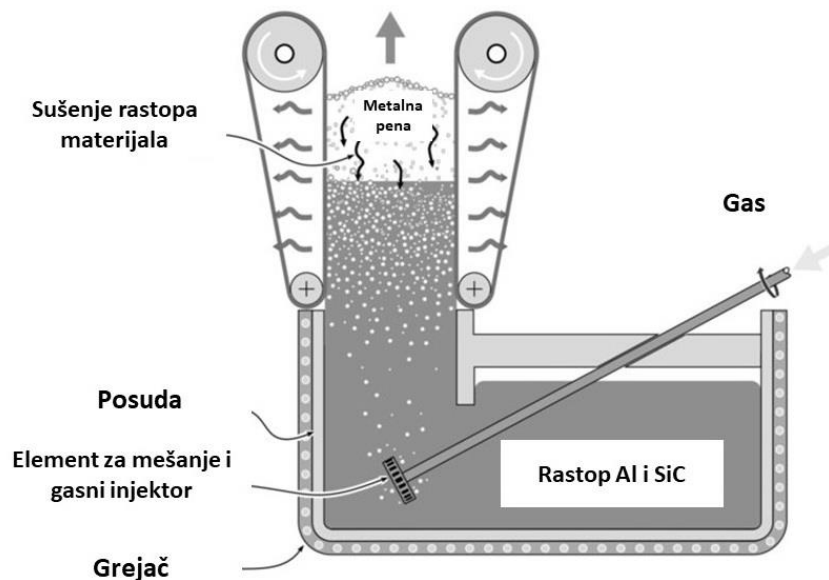
*Slika 6. Struktura gasne pene i alulight fominal procesa [15]*

#### 4. Proces ubrizgavanja (penjenje vazduhom)

Za dobijanje metalne pene sa zatvorenom strukturom koristi se tehnika ubrizgavanja gasa u rastop metala. Ovaj proces je lako primeniti na legure aluminijuma zbog relativno male gustine, pri čemu ne oksidiše previše kada je rastop izložen gasu sa kiseonikom ili vazduhu.

Kod ove tehnologije se topi čist aluminijum ili njegova legura i dodaju keramički materijali od 5-15% udela. Nekoliko gasova može da se koristi za penjenje unutar tečnog aluminijuma. Najčešće se koristi vazduh, ali gasovi poput kiseonika, ugljen-dioksida, inertnih gasova takođe se mogu ubrizgati u tečni aluminijum za stvaranje mehurića. Mehurići koji se formiraju tokom procesa imaju tendenciju da lebde iznad površine rastopa, ocede se i konačno počnu da se očvršćavaju [33]. Šema dizajna metode rastopljenog gasa je prikazana na slici 7.

Metalna pena sa zatvorenom strukturom pora se formira pažljivom kontrolom brzine hlađenja pene i procesa ubrizgavanja gasa. Jedna od glavnih odlika ove metode je ekonomičnost. Pene proizvedene tehnikom ubrizgavanja gasa u metalni rastop imaju relativnu gustinu u opsegu od 0,03-0,1.



*Slika 7. Šematski prikaz proizvodnje aluminijumske pene metodom ubrizgavanja gasa u rastop (CIMAT i HIDRO procesi) [14]*

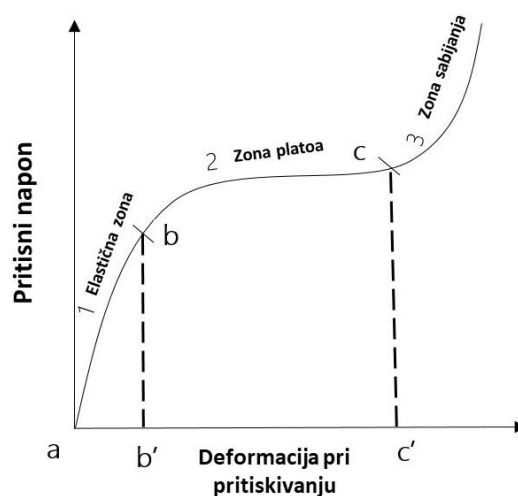
Te karakteristike su uglavnom korišćene sa stanovišta numeričkog i strukturalnog istraživanja. Mehaničke karakteristike aluminijumske pene imaju neke prednosti u poređenju sa aluminijumom i čelikom. Na primer, gustina pene je relativno niska sa visokom elastičnošću zbog veće površine i šupljina unutar nje. Takođe, savojna krutost je značajno poboljšana u poređenju sa čelikom. Shodno tome, metalne pene su počele da se koriste umesto postojećih materijala za izmenjivače toplote. One mogu doprineti poboljšanju brzine prenosa toplote i prirodne turbulencije. Zbog složenog procesa proizvodnje i složenosti dizajna, njihovom proizvodnjom se bavi mali broj firmi, što rezultira visokim cenom ovih materijala, koje se

kreću od 10 – 30 EUR/kg. Poređenje aluminijumske pene sa osobinama čvrstog aluminijuma i čelika dato je u tabeli 1.

**Tabela 1.** Fizičke karakteristike aluminijumske pene u poređenju sa aluminijumom i čelikom

Properties	Aluminium foam	Al	Steel
Gustina, g/cm <sup>3</sup>	0.07 - 0.95	2.7	7.8
Zatezna čvrstoća, MPa	0.04 - 30	100-300	600 - 800
Jangov modul (E) GPa	0.02 - 14	70	210
Specifična savojna krutost	2 - 3.9	3.1	1.9
Specific flexural stiffness	3.9 - 2.5	1.5	0.8
Koeficijent gubitka toplote, $\eta$	0.3 - 0.002	10-4	10-5
Toplotna provodljivost, Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.3 - 11	236	84
Otpornost, $\mu\Omega\text{cm}$	20 - 3000	2.65	10
Cena, EUR/kg	10 - 30	2	

Tokom testiranja metalne pene otvorene strukture pritiskivanjem, obično se javljaju tri karakteristične zone na krivoj napon - deformacija pri statičkom ili dinamičkom opterećenju, produžetku ligamenta zidova pora ili kinetičkoj energiji. Prva od navedenih zona je elastična ili linearna oblast u kojoj se materijal ponaša elastično, odnosno važi linearna veza napona i deformacije. Usled plastične deformacije ligamenata dolazi do pojave karakterističnog zaravnjenja na krivoj napon – defomacija. Linearni nagib počinje da se menja usled opterećenja. Ili obrnuto usled pojave plastičnosti dolazi do nelinearnog ponašanja celokupne strukture I srazmerno većih napona. Pri prelasku u plastičnost dolazi do izvijanja zidova ćelija kao I samih ligamenata i urušavanja celokupne strukture. Usled svega navedenog u ovoj fazi dolazi do sabijanja metalne pene. Na slici 8 je data tipična kriva napon-deformacija metalne pene otvorene porozne strukture pri pritiskivanju, uključujući tri režima opterećenja. Na slici 8, deo krive ab definiše modul elastičnosti ( $E_L$ ), deo krive b-c se odnosi na zaravnjenje napona ( $\sigma_{pl}^n$ ) i od dela krive c na dalje se odvijaju velike deformacije sabijanja metalne pene ( $\epsilon_D$ )



**Slika 8.** Tipični prikaz krive napon – deformacija

Na osnovu literature [41], poroznost je deo ukupne zapremine medijuma koji je zauzet praznim prostorom. Za izračunavanje procenta poroznosti koristi se specifična površina i specifična zapremina pora.

$$\text{poroznost (\%)} = 1 - (\text{zapremina solida} / \text{ukupna zapremina}) \times 100 \quad (\text{a})$$

$$\text{specifična površina (m}^2/\text{g)} = \text{ukupna površina (m}^2) / \text{masa solida (g)} \quad (\text{b})$$

$$\text{specifična zapremina pora (cm}^3/\text{g)} = \text{ukupna zapremina pora (cm}^3) / \text{masa solida (g)} \quad (\text{c})$$

Za pene, efektivni modul elastičnosti se procenjuje korišćenjem Gibsonovog i Ešbijeovog pristupa [42,43],

$$\frac{E^*}{E_s} = C \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (\text{d})$$

gde je:

$E^*$  modul elastičnosti pene

$E_s$  modul elastičnosti čvrstog materijala od kojeg je napravljena pena

$\rho^*$  je gustina pene

$\rho_s$  je gustina čvrstog materijala

$c$  je konstanta, približna 1

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{V^*}{V_s} = \frac{12l \left( \frac{t}{2} \right)^2}{l^3} = 3 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \quad (\text{e})$$

gde je

$V_s$  zapremina čvrstog materijala pene

$V^*$  zapremina poroznog materijala

Kombinovanjem jednačina (5) i (6) može se dobiti jednačina za proračun modula elastičnosti pene;

$$\frac{E^*}{E_s} = \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 = \left[ 3 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \right]^2 = 9 \left( \frac{t}{l} \right)^4 \quad (\text{f})$$

Dok se napon urušavanja pene može izračunati na sledeći način:

$$\frac{\sigma_{cp}^*}{\sigma_{ys}} = 0.3 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{g})$$

gde je

$\sigma_{cp}^*$  napon urušavanja pene



$\sigma_{ys}$  napon tečenja čvrstog materijala

Kombinovanjem jednačina (5) i (7),  $\sigma_{cp}$  može se izračunati kao:

$$\frac{\sigma_{cp}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0.3 \left( \frac{\rho^*}{\rho_S} \right)^{\frac{3}{2}} = 0.3 \left[ 3 \left( \frac{t}{l} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} = 1.6 \left( \frac{t}{l} \right)^3 \quad (h)$$

Gergely i Clyne [131], za proizvodnju metalnih pena koriste novu metodu topljenja koja. Štaviše, ciklus uključuje raspršivanje čestica koje proizvode gas (prethodno tretiranih da bi se odložilo pražnjenje gasa) u tečnom kompozitu na bazi aluminijuma/SiC. Ovom metodom postiže se specifičan nivo prilagodljivosti u toku razvoja strukture pene, jer se može postići bolja kontrola mehanizma drenaže i aktivnosti/kinetike razvoja vodonika koji se dešavaju pri slaganju pene. AlSiMg legure su se pokazale kao bolje sredstvo za proizvodnju metalnih pena u poređenju sa drugim aluminijumskim legurama jer imaju bolju otpornost na koroziju i poseduju izuzetne mehaničke karakteristike [132]. To omogućava njihovu upotrebu u oblasti vazduhoplovstva, automobilske industrije i građevinarstva. Güner, Arıkan i Nebioglu [133] su novom metodom livenja metalnih pena na bazi aluminijuma uspeli da drastično smanje cenu proizvodnje istih. Nedostatak ove metode je nemogućnost da se njome objasni formiranje pora i njihovih struktura. Iz tog razloga se otvara prostor za dalja istraživanja.

Takođe je objavljena studija o automatizovanoj kontinualnoj proizvodnoj liniji za metalne pene [134]. U navedenoj studiji kontinuirana proizvodna linija (7 m × 1,5 m × 1 m) se koristi za proizvodnju visokokvalitetnih metalnih pena. Ova automatizovana kontinualna proizvodna linija omogućava smanjenje rizika i opasnosti povezanih sa radom na višim temperaturama i da bi se poboljšala efikasnost bez učešća ljudi. Nivo poroznosti do 90% je postignut [135] korišćenjem metalurške tehnologije praha. Ovo je postignuto korišćenjem povećanja pritiska kojim se razgrađuje agensa za penjenje. Za ova eksperimentalna ispitivanja korišćeni su aluminijum, olovo i cink. Nano porozne metalne strukture su takođe privukle interesovanje naučne zajednice u poslednje vreme [136]. Ovi materijali su identifikovani sa veoma velikom specifičnom površinom i finom veličinom pora. Otuda su našli svoju primenu u elektrodama, katalizatorima, senzorima, aktuatorima i procesima filtracije [137,138,139]. Ovi materijali otporni na visoke temperature su takođe jedan od najtraženijih tipova jer se moraju ispuniti obaveze strogih parametara EURO IV. Oni omogućavaju upotrebu metalnih pena koje su otporne na koroziju na temperaturama do 600–800 °C, posebno legure na bazi NiCrAl, razmatraju se za primene u automobilske industriji [136].

Koh i drugi [140] su izučavali alternativni proces za proizvodnju anizotropnih poroznih cevastih struktura ekstrudiranjem bakarnih i aluminijumskih žica. U ovom procesu se nakon toga ispiranjem aluminijuma dobija materijal za proizvodnju cevi sa dugim izduženim porama. Pokazalo se da strukture koje se dobijaju ovakvim postupcima imaju nisku vijugavost i visoku permeabilnost. U uporednoj studiji, korišćena su polimerna ili organska veziva umesto aluminijuma, a nakon toga ekstrudirana, sprovedena je za različite metale, uključujući bakar, koji nalazi svoju primenu za hladnjake i izmenjivače toplote [141]. Prema Banhartu i Baumeisteru [142] postoje različite metode za proizvodnju metalnih pena koje mogu da koriste niz početnih materijala kao što su tečni metal, metal u prahu ili čak elektrolit koji sadrži metalne jone. Svaka od ovih metoda može da funkcioniše drugačije za obradu metalnih pena različitog opsega gustine i morfologije, stoga istraživač mora da skroji ili prilagodi proces na osnovu zahtevanih svojstava metalne pene i tako postigne jedinstveno rešenje za

sopstvene potrebe. Ekonomičnost procesa još uvek ostaje nerešeno pitanje pošto se većina specijalizovanih metoda za proizvodnju metalnih pena može koristiti samo kada finansije nisu relevantne, pa je velikoserijska proizvodnja onemogućena. Pregledom literature pri izradi doktorske disertacije došlo se do zaključka da se metalne pene najčešće proizvode primenom ALCAN metode.



---

## 3. DIZAJN POROZNE STRUKTURE

### 3.1. VRSTE METODA

U poređenju sa metalnim materijalima pune gustine, aluminijumske pene su poslednjih godina dobile na značaju zahvaljujući svojim fizičkim i mehaničkim karakteristikama [44-49]. Uzimajući u obzir njihovu težinu i otpornost prilikom sudara, nalaze primenu u oblastima koje zahtevaju dobre karakteristike apsorpcije vibracija i energije tokom sudara [50,51]. Mnoge komponente u automobilske industriji se dobijaju od aluminijumskih pena. Nasuprot tome, složena geometrijska priroda i neizvesno mehaničko ponašanje pene otvorenih pora otvaraju mnogo prostora za dalja istraživanja, posebno uz pomoć numeričkog modeliranja. Štaviše, složena mikrostruktura i karakteristike materijala odvrću od primene računskih metoda za određivanje mehaničkih svojstava [52]. Aluminijumske pene na bazi sintaktičkih pena sa metalnom osnovom (engl. Metal matrix syntactic foams, MMSF's) pokazuju određene prednosti [53] što ih čini traženim u raznim industrijskim granama hemijske industrije [54], vazduhoplovnim [55], automobilske [56], i vojnim aplikacijama. Ove prednosti se odnose na jedinstvene karakteristike koje poseduju pene, kao što je efekat elektromagnetne zaštite [57], mala masa, toplotna izolacija i apsorpcija energije. Sendvič konstrukcije od aluminijumske pene (engl. Aluminium foam sandwiches, AFS) i strukture oblika cevi punjene penom (engl. foam filled tube structures, FFTSs) takođe mogu da se proizvedu korišćenjem metalnih cevi i panela [58], što je dovelo do značajnog razvoja u pogledu svojstava otpora na savijanje [59] i udar [60] kod aluminijumskih pena. Sintaktičke pene sa metalnom osnovom (MMSF's) su višefazni materijali koji sadrže metalnu matricu i skup šupljih inkluzija [61].

Niz osobina koje pružaju aluminijumske pene čini ih privlačnim za mnoštvo inženjerskih primena. Povoljno ponašanje pena u uslovima pritiskujućeg opterećenja, struktura u obliku saća i mala težina pena čini ih veoma pogodnim za strukturne sendvič panele, što je dodatna prednost uz nedavno razvijene jeftine metode proizvodnje. Metalna pena može da podnese velike deformacije, sa skupljanjem čitave strukture (do 60%), čime omogućava konstrukciju efikasnih uređaja za apsorpciju energije. Metalne pene otvorenih pora takođe pokazuju visokokvalitetnu strukturu u pogledu disipacije toplote koja omogućava veću toplotnu provodljivost, dok unutrašnja površina i povezanost šupljina zauzvrat omogućavaju prolaz rashladnog gasa. Generalno gledano, MMSF se sastoji od lakih legura (Al, Mg, Fe, Zn, Ti) [62]. Proizvodnja pena kako otvorenih tako i zatvorenih pora se sprovodi pomoću tehnologija oblikovanja topljenjem (MF), ubrizgavanja gasa (GI), metalurgije praha (PM), i infiltracionog livenja (IC) [53], ali postoji mnogo prostora za istraživanja koja se odnose na poboljšanje mehaničkih svojstava. Pritisna čvrstoća pene može se povećati legiranjem sa Mn i Sc. Takođe, dodavanje mikročestica ugljeničnih nanocevi [63], pepela [47] i nano SiC [64] se pokazalo da daje aluminijumske pene sa višom granicom tečenja. Poboljšane mehaničke karakteristike metalnih pena takođe su postignute dodavanjem materijala visoke čvrstoće. Uvođenjem gvozdених šupljih sfera u metalnu matricu i sintaktičke pene zabeleženo je značajno povećanje čvrstoće na pritisak [65]. Standardni test pritiskivanjem MMSF-a podrazumeva merenje napona i deformacija. Neki od drugih autora predlažu ispitivanje svim osnovnim načinima opterećenja (udar, zatezanje, i savijanje) [59,60,66-69]. U poslednjoj deceniji, numeričke metode i analize su se našle kao moćni alati u dizajnu materijala, karakterizaciji i predviđanju svojstava poroznih struktura. Analizirane su različite metode za modeliranje i

analizu pena otvorenih i zatvorenih pora [66,67]. Modeliranje metodom konačnih elemenata (MKE, engl. FEM) može pokazati odnos između mehanizama deformacije i relativne gustine pene [49]. Modeliranje u više skala (engl. Multi-scale modelling) također može pomoći u razumevanju penastih komponenti sa složenim i nepravilnim oblicima [70]. Metoda za velike brzine zasnovana na FEM-u se koristi za prikaz brzine pri sudaru prototipa poroznog materijala. Takođe, FEM model se koristi za određivanje ukupne deformaciju kod nižih brzina [71]. U slučaju pene sa otvorenim porama, numeričko modeliranje elastično-plastičnog ponašanja je pokazalo da se vrednost platoa i apsorpcija energije pena povećavaju sa smanjenjem veličine šupljina i povećanjem gustine [72].

Metoda bazirana na VTM-u (engl. Voronoi Tessellation Method) upotrebljena je pri izradi 3D modela. Određena istraživanja pokazuju da se rekonstrukcija troslojnih modela zasnovanih na Voronoi-u koristi za otkrivanje neposredne veze između mehaničkih svojstava i granice konzistentnosti [73, 74]. Kompjuterska tomografija može efikasno da izmeri prirodne zapremine i gustine uzimajući u obzir diskretizovane informacije i proizvoljne modele raspodele prostornih konačnih elemenata [75]. Spajanje Lagerovog modela sa Voronoi modelom, također je korišćeno za numerički dizajn struktura pene sa odličnim rezultatima [76,77]. Dodatno se pokazalo da je izvodljivo da se izvrši trodimenzionalna analiza konačnih elemenata heterogenih materijala sa elipsoidnim uključcima ili šupljinama [78]. Relevantne probne studije koje se povezuju sa pritiskom čvrstoćom aluminijske pene na bazi otvorenih pora su se pobrinule za različite perspektive, na primer, zavisnost od brzine deformacije strukture [79], uticaj toka rukovanja i brzine deformacije na reakciju na pritisak [80], i dobro mehaničko ponašanje pri pritisku [81]. Ovi probno dobijeni rezultati određuju pogodne oblasti za numeričku simulaciju. Dizajniranje metalne pene otvorenih pora može biti izazovna situacija zbog haotičnog i nenasumičnog rasporeda pora. Različiti istraživači su postavili različit stepen fleksibilnosti u dizajnu; međutim, situacija i dalje ostaje dvosmislena i rešava se korišćenjem istraživanja koja pokrivaju ograničenja kao i razgraničenje metodologije dizajna. Postoje uglavnom četiri različite vrste metoda koje su dostupne za kreiranje numeričkih 3D modela otvorenih i zatvorenih pora.

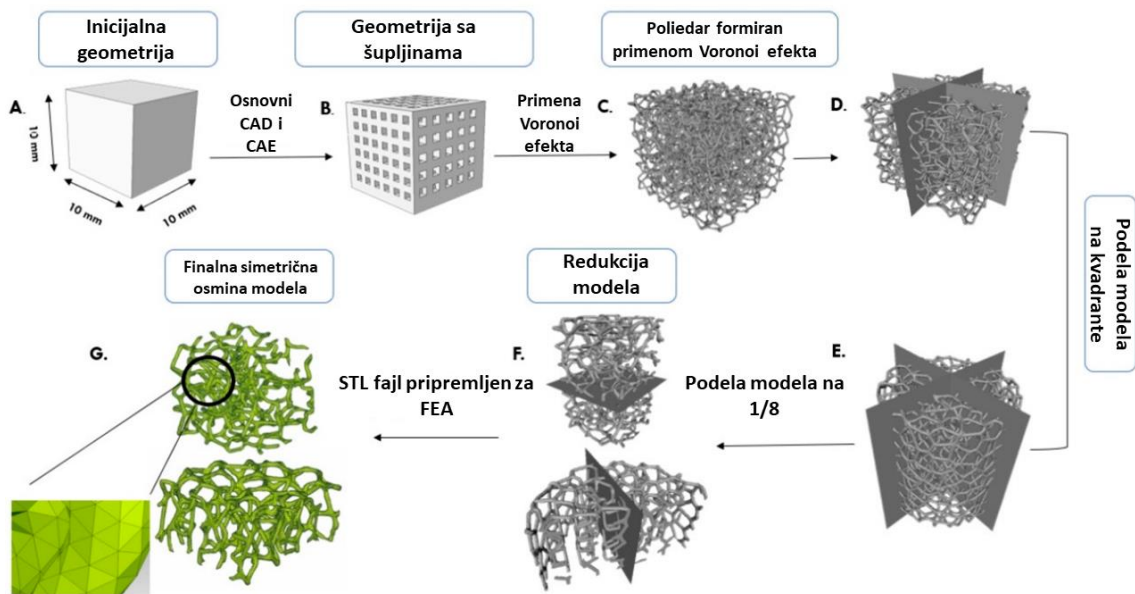
- Skeniranje magnetnom rezonancom (MRI) i kompjuterskom tomografijom (CT) je osnovna i najčešće korišćena tehnika. Ta metoda zahteva više napora prilikom uvoza i generisanja modela iz skenirane slike. Takođe, to je vremenski zahtevan proces. Nailazi se na razgraničenje rezolucije prečišćavanja mreže i iskrivljenosti ivica za dalju analizu.
- CAD model – CAD model se pokazao kao originalan metod koji se lako primenjuje. CAD modeli se obično koriste za Gibson-Ašbi model, Kelvinov model poroznosti, periodične i neperiodične tetraedarske oblike, dodekaedar, ikosaedar, tetrakaidekaedarski oblik, kocku sa ekstrudiranim krugom, oblike saća, pravilne i nepravilne oblike itd. Analiza i izrada ovih oblika se mogu lako izvesti uz manje napora. Takođe, implementacija uvoza, izvoza, rafinisanje mreže, i model plastičnosti mogu se jednostavno uraditi.
- Voronoi model – Ovo su tehnike replikacije koje mogu pomoći u izradi modela metalne pene. Ova metodologija je povoljna u kreiranju različitih stepena modifikacija rasporeda pora, debljine ćelijskog zida, poroznosti, varijacije gustine itd. Ova tehnika još uvek ima određene probleme vezano za prečišćavanja mreže, iskrivljene površine i zakrivljenosti ivica tokom kompjuterskog modeliranja. Još jedno razgraničenje je da tokom optimizacije, uvoza i izvoza površina podataka mogu nastati problemi sa tačnošću mreže.
- Metalografsko prikazivanje – Ova metoda zahteva dalje istraživanje i ispitivanje pre nego što se može uraditi bilo kakvo pravilno sečenje modela. U svakom slučaju, glavna prednost

ove tehnike je da se određivanju pora daje visoka preciznost. Za pregled koji je u toku, Voronoi kod spojen sa CAD-om je korišćen za promenu preko poliedarskog modela u sporadičnu otvorenu ćelijsku strukturu. Zatim je izvršeno ispitivanje zasnovano na analizi konačnih elemenata (FEA) pod jednoosnim pritiskujućim opterećenjem, sa tri jedinstvena stepena poroznosti: 30%, 60% i 80% poroznosti. Za uticaj poroznosti na deformaciono ponašanje, takođe je dobijena kriva napon-deformacija.

### **3.2. MODEL OTVORENIH PORA ZASNOVAN NA VORONOI OBLIKU POROZNOSTI (VORONOI TESSELLATION MODEL - VTM)**

Struktura sa sporadičnim otvorenim porama uvedena je korišćenjem modela zasnovanog na Voronoi kodu (VTM). Ova tehnika dozvoljava različita odstupanja plana praznine, debljine pregrade pora, nivoa poroznosti i debljine. U VTM metodi daju se fokusi ili semena u prostoru, koji su raspoređeni u grupe da bi se uvele Voronoi pore. Stanja ovih pora su po prirodi poliedarska. Praznine su generalno napravljene u unakrsnoj strukturi i konsoliduju se u neku vrstu grupe. Ovom tehnikom se ne dizajniraju proizvoljni sporadični modeli. Nakon toga, korišćen je VTM pristup sa Voronoi poliedrom, kao skup pora. Koristeći VTM pristup, mogu se proizvesti različite dužine i debljine podupirača, kao i poliedarski oblik. Da bi se dizajnirao model otvorene ćelije, potrebno je dizajnirati kocku  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  i njenu unutrašnjost. Zatim je primenjen algoritam zasnovan na Voronoi kodu da se unutrašnjost i spoljašnjost kocke promeni u poliedre. Ova transformacija se može izvršiti pomoću MATLAB® ili Octave izvornog koda, ili korišćenjem ugrađenog programskog proračuna. Do sada je ova transformacija izvedena korišćenjem Voronoi otvorenog koda. Voronoi proces kodiranja stvara binarnu datoteku tipa PLY ili STL (Polygon/Stereo lithography double), kojom se može dodatno rukovati korišćenjem softvera konačnih elemenata (FEM). Primena FEM softvera sa ulaznim STL fajlovima još uvek zahteva velike resurse jer su ulazne informacije nestrukturirane. Zbog toga su promene u STL formatu da bi odgovarale CAD formatu konačnih elemenata realizovane programiranjem u MeshLab-u (verzija 2016.12). Nakon dizajniranja, dizajn strukture još uvek je bio prevelik, sa brojnim komponentama (čvorišta i poliedarske šupljine). Stoga je dodatno ispitivanje urađeno u FEMAP-u sa Nx Nastran solverom (verzija 10.3).

Korišćenjem ovog softvera, potreban zapreminski model je podeljen na manje segmente, kao na slici 9. Koristeći strategiju reprezentativne zapremine, simulirana je samo 1/8 osnovnog modela (unutar ovog delegatskog volumena nije bilo manje od 24 ćelije). Celokupna strukturna reakcija je numerički prikazana na tri različita stepena poroznosti: 30%, 60% i 80% poroznosti. Sve praznine su raspoređene u direktnom planu unutar spolja obloženog bloka. Tabela 2 sadrži ograničenja korišćena za numeričke proračune.



*Slika 9. Proces kreiranja metalne pene otvorenih pora korišćenjem Voronoi modela (VTM)*

*Tabela 2. Karakteristike metalne pene otvorenih pora kreirane primenom Voronoi modela (VTM)*

Poroznost	Veličina interne matrice data za Voronoi kod (mm)	Dužina podupirača (mm)	Prečnik pore (mm)
30 %	0.6 – 0.7	1 – 1.5	≈ 0.5
60 %	0.4 – 0.5	0.75 – 1	≈ 1.0
80 %	0.25 – 30	0.5 – 0.75	≈ 1.5

### 3.3. PENA ZATVORENIH PORA ZASNOVANA NA KOMPJUTERSKOJ TOMOGRAFIJI (CT)

Aluminijumske pene sa zatvorenim porama daju korisnicima više opcija u zavisnosti od krajnjeg rezultata [82]. Ostvarena su brojna poboljšanja karakteristika ovih pena uzimajući u obzir njihovu primenu prvenstveno u oblastima šinskog inženjerstva i automobilske dizajna, kao materijala koji može da apsorbira mnogo energije [83]. Menjanje svojstava ispitivano je u nizu istraživanja, jedno od kojih je sprovedeno na temu konstrukcije materijala tokom stvaranja pene, odnosno kontrolisanju veličine i disperzije pora [83,84]. Procenjuje se nekoliko povoljnih svojstava pene na bazi Al, uključujući mehaničke karakteristike na pritisak i apsorpciju energije [85], multifunkcionalne primene [86], akustičko prigušivanje i zadržavanje zvuka [87], elektromagnetna zaštita [88] i toplotna provodljivost [89]. Posebno, osobina apsorpcije energije pene na bazi aluminijuma ima različite primene [90]; naročito u kontekstu uticaja komponente [91-93].

Dodatno se vidi da je pena na bazi aluminijuma sa zatvorenim porama veoma dobro opremljena za ublažavanje udara i može bez mnogo istezanja da zadrži energiju kada je izložena opterećenjima. Na ovaj način, još jedna upotreba aluminijumske pene može se videti

u nuklearnom transportu jer ima prirodu efikasne zaštite energije [94]. U ispitivanjima mehaničkog ponašanja, ispitivanje pritiskujućim opterećenjem je dobilo veliki značaj kao opšte istražena metoda [95-97], dok su za penu sa visokim nivoom poroznosti primenjeni režimi niske deformacije [98]. Da bi se shvatio i predvideo način ponašanja ovih materijala, izvršena su statička i dinamička ispitivanja na penama sa zatvorenim porama [99, 100]. Pod jednoosnim kompresionim opterećenjem primećeno je anizotropno ponašanje [101,102]. U kvazistatičkim uslovima, pokazalo se da se čvrstoća pene i razna druga svojstva poboljšavaju u slučaju da dođe do širenja relativne debljine [103,104]. Za aluminijumsku penu sa zatvorenim porama, na proces deformacije utiče nekoliko elemenata, uključujući relativnu gustinu, veličinu i oblik ćelije, debljinu ćelijskog zida, raspodelu šupljina i parametri procesa [82, 105-107]. Praćen je odnos između modula elastičnosti/modula smicanja i varijanti veličine pora/razdelnika pora [107]. Izobličenje dizajna se kontroliše faktorima uvrtnja, smicanja, pritiska i zatezanja strukture pora [108, 109]. Strukturni parametri i deformaciono ponašanje su povezani sa radom sa idealnim planom sa elastičnom zonom, popuštanjem i lomom, zonom platoa i režimima zgušnjavanja [109,110]. Istražuju se numerički modeli povezani sa zonom loma na aluminijumskoj peni [110]. Mogućnosti za očekivanje fleksibilnih svojstava aluminijumske pene sa zatvorenom ćelijskom strukturom procenjene su korišćenjem računarske homogenizacije i logičkih modela idealizovane geometrije i izotropnih svojstava [111].

Utvrđen je značajan uticaj reprezentativnih zapreminskih svojstava na mehaničko ponašanje u ispitivanju analize konačnih elemenata. Zavisnost Poasonovog koeficijenta od debljine pene je takođe prikazano [112] kao relevantne jer analiza konačnih elemenata uključuje vrednost Poasonov koeficijenta kao suštinske osobine materijala koje može direktno uticati na poslednje numerički isprobane rezultate. Tokom modeliranja metodom konačnih elemenata (FEM) i analize (FEA), numerički model (oblik ćelije i poprečni presek) je značajan deo. Postoje različite metodologije kod numeričkog dizajna materijala [113-118].

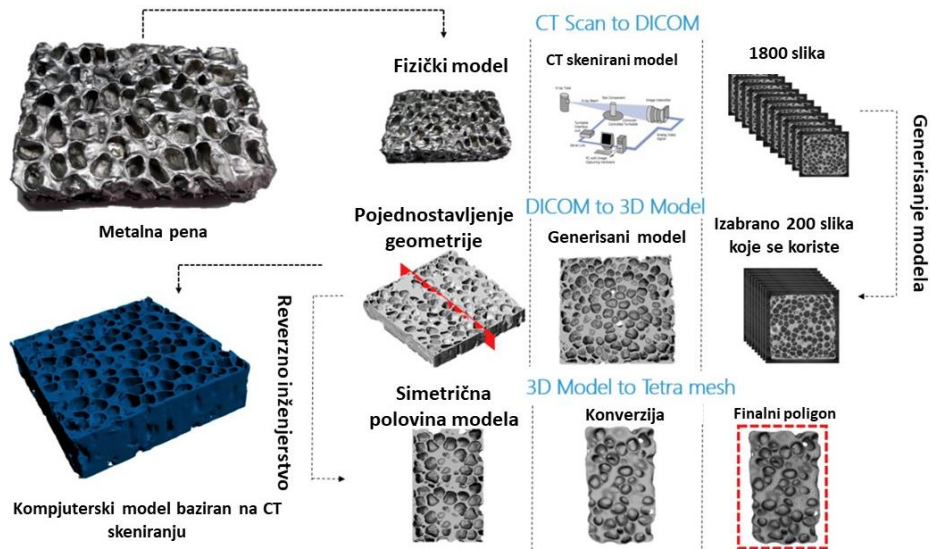
Raznovrsnosti u materijalnom načinu ponašanja takođe mogu uzrokovati da oblici pora variraju na prirodno vidljivom nivou zbog obližnje lokalne deformacije i otkaza [113, 114]. Debljina i veličina pora mogu generalno da variraju između pora, što može dovesti do neefikasne apsorpcije energije [115]. Brzina deformacije dodatno utiče na komponente izobličenja koje se odnose na deformacijsko očvršćavanje [116, 117]. Bez obzira na to, brzina deformacije je manje kritična kada se upoređi sa debljinom ćelijskog delioca. Obradena kompjuterska tomografija (CT) je dominantna strategija za prikazivanje originalnih 3D dizajna i može da daje troslojne slike velike rezolucije sa sitnim detaljima na nano i minijaturnom nivou. FEA i veza između infinitezimalnih osnovnih svojstava (anizotropije ćelije i geometrije podupirača) i jasno vidljivog načina ponašanja dodatno su razmatrani numeričkim modelima zasnovanim na slikama CT skeniranja [118-122]. U svakom slučaju, još uvek je fokus istraživanja na najboljim metodama za unapređenje tehnike reprezentativnog odabira slika i stepena specificiranja detalja vezanih za izradu mreže. Potrebno je identifikovati najbolji način pristupa koji štedi računarsko vreme i resurse dok se koriste takvi pristupi. Mreže koje se dobijaju mogu sadržati veliki broj čvorova – elemenata i dodatno usložiti proračun metodom konačnih elemenata. Babcsan i dr. [129], sugerišu da se za precizno određivanje veličine i rasporeda pora, pore koje se nalaze na površini ne treba uzimati u obzir i da se defekti u ćelijskom zidu kao što su diskontinuiteti moraju eliminisati. Ovi diskontinuiteti zajedno sa parametrima transformacije imaju značajan uticaj na krive distribucije. Istraživači [154] su takođe koristili granulometriju kao posebnu morfološko



obeležje sa 3D analizom da bi dobili distribuciju veličine pora kada su u pitanju ćelije otvorene struture. Rendgenska tomografija sa veličinom piksela od 30 mikrometara predstavlja nedestruktivnu metodu kojom se može utvrditi mikrostruktura, veličina pora pene i dimenzije zidova. Pokazalo se da pritiskivanje pene utiče na strukturu pora tako što dovodi do male veličine pora i homogenije raspodele čvrste faze. Efekat sporog i brzog hlađenja metalne pene dovodi do povećanja gustine na spoljašnjem zidu pore. Ovaj fenomen se javlja zato što se očvršćavanje prvo dešava na površini pre nego što drenaža može da smanji unutrašnju tečnu frakciju. Čak i manja veličina pore na površini može smanjiti drenažu tečnosti [155].

Koristeći in situ CT snimanje na makroskopskoj skali, Ghazi i dr. [156] su sprovedli test kvazistatičkog pritiskivanja ALCORAS pene. Poređenjem eksperimentalnih i numeričkih rezultata, numeričke simulacije su pokazale da je samo 10% makroskopske deformacije određeno na polukvantitativan način. Pokazalo se da su deformacije na mikrostrukturnom nivou (formiranje plastične trake i lom ćelijskog zida) kvalitativno usklađene i da makroskopska deformacija počinje blizu spoljne granice pora. Pore velikih dimenzija i pore sa tankim zidovima su bile usklađene sa smerom opterećenja i utvrđeno je da se ranije deformišu.

U ovom radu korišćene su tehnike CT skeniranja za razvoj zapreminskog modela. Detaljni koraci su predstavljeni od početka do simulacionog modela. Postoje brojne prednosti korišćenja metoda CT skeniranja, a jedna je visoka tačnost. Takođe je potreban snažan računar za obradu velikih DICOM slika. Kreirano je i preuzeto oko 1800 slika iz fizičkog uzorka. Koristeći tehnike razdvajanja i spajanja, samo 200 slika je korišćeno za kreiranje zapreminskog modela kao što je prikazano na donjoj slici 10. Nakon razvoja modela, izvršen je broj permutacija i kombinacija da bi se dobila konačna geometrija bez grešaka.



*Slika 10. Detaljni koraci koji su izvedeni za razvoj aluminijumske pene sa zatvorenim porama korišćenjem CT Scan tehnike*

### 3.4. NUMERIČKO MODELIRANJE

U ovom poglavlju opisano je numeričko modeliranje i eksperimentalni testovi. U ovom odeljku razmatra se pojedinačni deo numeričkog istraživanja i postupak rešavanja ponašanja pene otvorenih pora korišćenjem numeričkog rešenja. Formulisanje problema u terminima matematičkih jednačina, ili pisanje glavnih jednačina uzimajući u obzir definiciju problema, je prvi korak. Nakon što se formiraju matematičke jednačine, glavne jednačine se moraju matematički rešiti. Kao poslednji korak, primenjena je numerička metoda za rešavanje velikih jednačina, što će nam omogućiti da aproksimiramo odgovor. Numeričke metode prave aproksimacije našeg rešenja problema.

FEM je korišćen za numeričko modeliranje deformacionog procesa. Geometrije metalne pene su veoma haotične prirode i zahtevaju opsežne CAD pripreme i diskretizaciju geometrije. Koristeći diskretizaciju, ili mreže (čvorovi i elementi), metoda konačnih elemenata smanjuje stepene slobode sa beskonačnih na konačne. Svaki proračun se pravi na ograničenom broju tačaka poznatih kao čvorovi. Čvor koji se povezuje sa drugim čvorom da bi formirao određeni oblik kao što je četvorougao ili trougao naziva se element. Pored toga, interpolaciona funkcija (određena oblikom elementa) se koristi za dobijanje vrednosti promenljive (recimo pomeranja) u bilo kojoj tački između tačaka izračunavanja. U ovom radu, primenjen je FEMAP Nastran, komercijalnog vlasničkog softvera zasnovanog na FEM-u. Za korišćenje bilo kog komercijalnog softvera postoje 3 koraka.

- Prethodna obrada (pre-procesiranje) ili koraci unosa (input) – ovaj deo troši najviše vremena od tri koraka. Sama prethodna obrada uključuje nekoliko koraka koje treba pratiti na sinhronizovan način. Da bi bilo lakše, komercijalni softver obično deli celu FEM proceduru na određene module. Prvi i najvažniji korak je uvoz geometrije iz CAD softvera ili njeno kreiranje u okviru FEM alata. Kada je model uspešno uvezen, izvršeno je kreiranje mreže na celom uzorku (diskretizacija da se konvertuje beskonačni DOF u konačan), a zatim se definišu granični uslovi u vidu ograničenja i opterećenja na specifičnoj površini radi kontrole kretanja. Nakon završetka prethodne obrade, odnosno definisanja CAD modela, mreže i graničnih uslova, softver interno formira matematičke jednačine u obliku  $[F] = [K] [U]$ , gde je  $f$  sila, a  $K$  i  $U$  su matrice krutosti i pomeraja.
- Rešavač (solver) ili rešenje: - Tokom pre-procesiranja se podešava model, solver interno formira matrice, inverziju, množenje i rešenje za nepoznato, npr. pomeranje i pronalazi deformaciju i umrežavanje za statičku analizu.
- Naknadna obrada (post-procesing) ili output/ishodi: - Omogućava pregled rezultata, verifikacije, zaključke i analizu daljih za poboljšanje dizajna. U daljem tekstu se detaljno raspravlja o koracima realizovanim tokom modeliranja i simulacije pene otvorenih i zatvorenih pora.

#### 3.4.1 ANALIZA PENE SA OTVORENIM PORAMA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

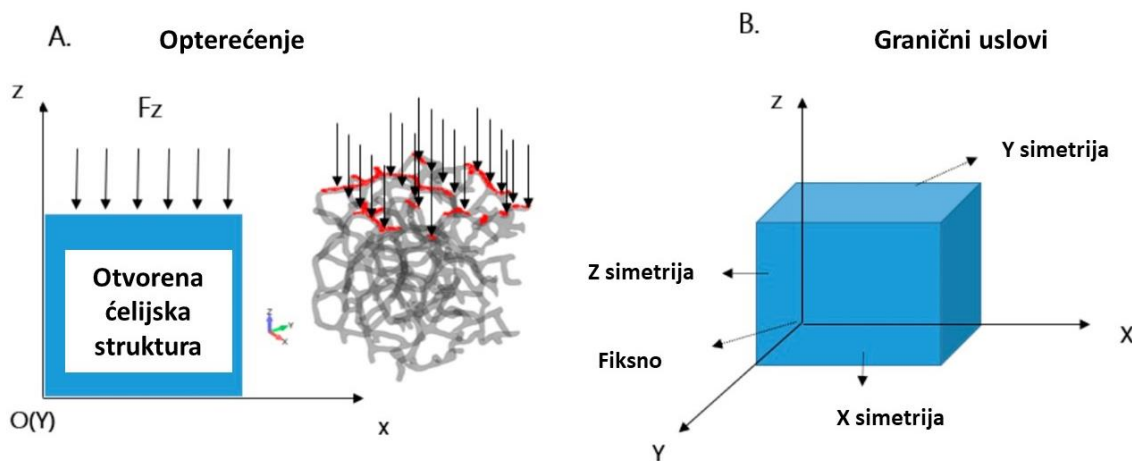
Porozna struktura sa otvorenim porama je nepravilne prirode. Zbog toga su modeliranje različite veličine mreže i u skladu sa tim je sprovedena studija mreže pre nego što se dođe do konačnog diskretizovanog modela. Zbog složenih fenomena polja napona dodeljena je veličina mreže od 0,02 mm sa Jakobijanskom veličinom od 0,6. Koristeći istu grupu početnih uslova mreže, pripremljena su tri različita modela u 3D formatu. U svim modelima definisano

je više od 100.000 elemenata tetraedarskih elemenata sa 10 čvorova. Prvobitno dobijena mreža je filtrirana da bi se uklonile greške [59]. Neadekvatna geometrija void nestabilnom proračunu i problemima sa konvergencijom. Korišćen je Dekartov koordinatni sistem. U tabeli 4 prikazani su materijalni parametri za elasto-plastičnu analizu.

**Tabela 4.** Karakteristike materijala kod FEA modela

Gustina (tona/mm <sup>3</sup> )	Modul elastičnosti (MPa)	Granica tečenja	Poasonov koeficijent
$2.7 \times 10^{-9}$	68200	55 MPa	0.3

U analizi su korišćena materijalna svojstva aluminijuma pri definisanju materijalnog modela [44]. Gornja površina konstrukcije je ravnomerno opterećena silom od 20 N jednoosno duž pravca z-ose. Detaljan šematski prikaz opterećenja i graničnih uslova prikazan je na slici 11.



**Slika 11.** Pravac opterećenja i granični uslovi na simetričnom modelu

Prema deformaciji je određeno pritiskujuće opterećenje na gornjoj površini geometrije. Opterećenje od 20 N zadato je u simulaciji prema vrednostima zadatim u eksperimentu. Nivo opterećenja je zadat prema literaturi [74,79,80] i takođe da bi se izbegle velike deformacije kao u referencama [72,81]. U simulacijama je zadata funkcija opterećenja u zavisnosti od vremena korišćenjem FEMAP-a. Softver je imao zadatu granicu deformacije do koje je dozvoljen porast opterećenja. Cilj je bio da celokupna simulacija ostane o granicama malih deformacija, manjih od 10%. Na ovaj način je vršena numerička simulacija sve dok softver ne dostigne dozvoljeni napon. Napon nije prelazio preko granice tečenja za materijal, odnosno korišćen je samo linearni pristup-analiza. Simulacijom su dobijeni Von Mizesovi naponi, maksimalni naponi, smičući naponi i srednji naponi u pravcima x, y, z kao i u xy, yz, zx (ravni smicanja) za različite uzorke sa 30%, 60% i 80% poroznosti. Simulirane vrednosti koje su navedene date su u zavisnosti od deformacije. Da bi analiza bila realna, jedan čvor je fiksiran da ograniči kretanje modela u prostoru. U dodeljivanju materijala izabran je elastično-plastični materijal na osnovu Von Mizesovog kriterijuma tečenja. Zbog duktilne prirode aluminijuma, korišćen je kriterijum tečenja zasnovan na Von Mizes kriterijumima. Model se zasniva na jednostavnom Von Mizesovom kriterijumu u kome će se materijal ponašati



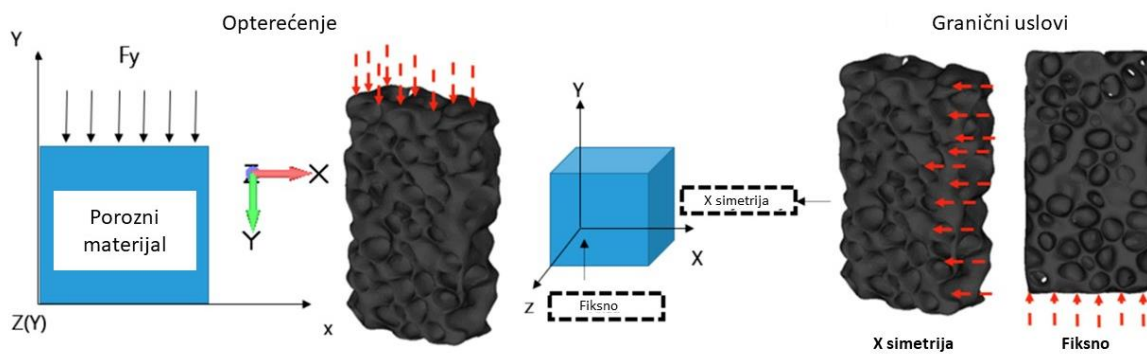
elastično linearno sve dok se ne prekorači napon tečenja. Za rešavanje velikih parcijalnih diferencijalnih jednačina primenjena je puna Njutn Rafsonova metoda. U svim različitim modelima definisani su različiti skupovi elemenata s obzirom na debljinu ligamenta i orijentaciju i nivo poroznosti. Tabela 5 prikazuje broj elemenata.

**Tabela 5.** Broj elemenata u simulacijama za tri različite poroznosti

Poroznost	Broj Tetra elemenata sa 10 čvorova
30%	152364
60%	177484
80%	128673

### 3.4.2. ANALIZA PENE SA ZATVORENIM PORAMA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Geometrija zatvorenih pora razlikuje se u odnosu na geometriju otvorenih pora u smislu veličine pora i orijentacije. Kao što je objašnjeno u literaturi, otvorene pore se sastoje od ligamenta i strukture koji na kraju deluju kao osnova. S druge strane, zatvorena poroznost uključuje samo pore različitog prečnika. Pore su povezane sa drugim porama preko unutrašnjeg ili spoljašnjeg zida pora. Stoga, projektovanje zatvorene ćelije ne zahteva mnogo specijalizovanih algoritama. U našem radu, kao što je ranije rečeno, korišćena je metoda CT skeniranja za generisanje 3D modela. Jednom kada je model razvijen korišćenjem DICOM slika, kreira se mreža konačnih elemenata i zadaju granični uslovi. U našem modelu (slika 12), geometrija je diskretizovana korišćenjem 135843 paraboličkih tetra elemenata sa 10 čvorova. Materijalne karakteristike za aluminijum zadate su prema tabeli 4. Vrednost Poasonovog odnosa je zadržana na 0,3 s obzirom na činjenicu da Poasonov odnos opada sa gustinom pene [112].



**Slika 12.** Pramac opterećenja na poroznu strukturu (a); Granični uslovi na simetričnom modelu (b)

Slično kao u slučaju otvorene ćelije, komercijalni softver FEMAP sa NKS Nastranom se koristio za pre-procesiranje, post-procesiranje kao i za rešavanje. Osim toga, za meširanje je korišćen softver otvorenog koda MeshLab (verzija 2016.12) sa bazom u Computing Lab-u iz Pize, Italija. Podešavanje modela je urađeno prema DIN 50134 [157] i duktilnoj prirodi aluminijuma. Pri zadavanju materijalnih karakteristika primenjen je Von Misesov kriterijum

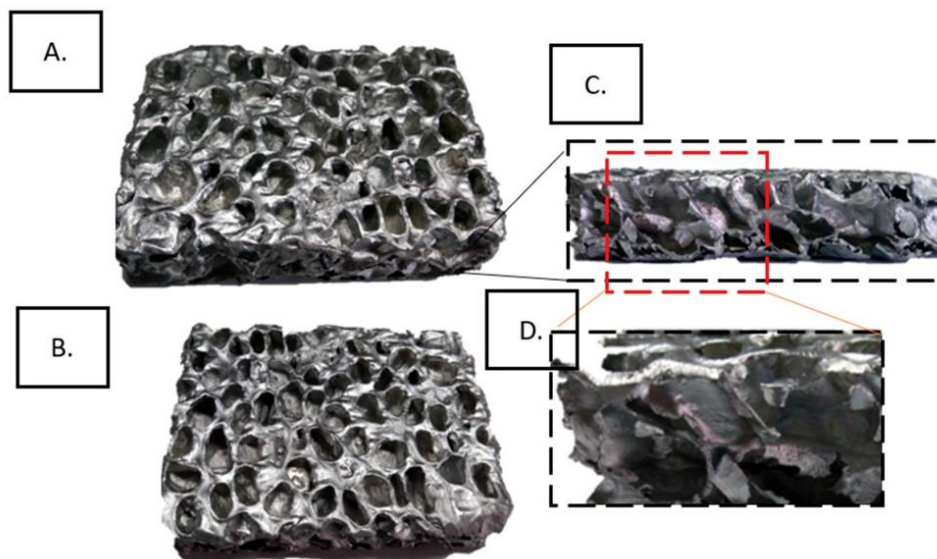
---

tečenja, koji kaže da materijal ostaje u elastičnom stanju sve dok ne dostigne granicu tečenja [149]. Pored toga, opterećenje jednoosnim pritiskivanjem je primenjeno samo na gornju površinu modela kao što je prikazano na slici 12. Opterećenje je zadato na samim čvorovima umesto korišćenjem apsolutno krutih pritisnih ploča. U simulaciji su korišćene vrednosti jednoosnog opterećenja od 50 kN iz eksperimenata a pri zadavanju graničnih uslova korišćene su prednosti simetrija radi pojednostavljivanja kako je prikazano na slici 12.

## 4. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

### 4.1 PROIZVODNJA POROZNIH ALUMINIJUMSKIH PENA

Komercijalne metalne pene su danas dostupne, ali se najviše u industriji koriste metalne pene na bazi aluminijuma kao što su Alporas, Thixofoam, Alulight, Formgrip, Gasar. Alantum je glavna kompanija koja proizvodi metalne pene sa otvorenom strukturom na bazi nikla, gvožđa i bakra [123]. Alporas uglavnom proizvodi metalne pene sa zatvorenom strukturom i prvenstveno koristi  $TiH_2$  čestice prilikom uduvavanja u topitelj. Gasar metalne pene se proizvode metodom čvrstog gasnog eutektičkog očvršćavanja, dok je Thixofoam vrsta metalne pene u tečnom stanju. Metalne pene na bazi nikla se najviše koriste za prigušivače i elektrode u baterijama električnih vozila [124]. Sendvič paneli se odlikuju visokom krutošću, malom masom i boljim prigušenjem što ih čini pogodnim za primenu u vazduhoplovstvu, sportu i hemijskom inženjerstvu [125,126]. Ultra-lake metalne pene se karakterišu akustičnim svojstvima, zaštite od zračenja i toplotne izolacije [127]. Ove karakteristike čine metalne pene visoko efikasnim materijalom za upotrebu u automobilskoj i vazduhoplovnoj industriji. Različita istraživanja su vršena da bi se objasnio proces proizvodnje metalnih pena [128]. Utvrđeno je da se među raspoloživim metodama za proizvodnju metalne pene iz rastopa najčešće koristi metoda ubrizgavanja gasa. Ova metoda takođe nije pogodna za legure koje lako oksidiraju [123]. Kalup kojim su dizajnirane metalne pene ovom metodom, može definisati složeni oblik metalnoj peni [129]. ALPORAS [130] aluminijumska pena sa zatvorenom ćelijskom strukturom je proizvedena serijskim livenjem u kome se Al zgušnjava uz pomoć Ca i uduvavanjem  $TiH_2$ . Gustina ove pene je  $0.18 \pm 0.24 \text{ g/cm}^3$ , a srednji prečnik ćelije 4.5 mm. Odlikuje se visokim procentom apsorpcije zvuka i udara, te se iz tih razloga može primeniti kao apsorber zvuka. Na osnovu dosadašnjih istraživanja, u Aluiventu, Mađarska, za proizvodnju metalnih pena na bazi aluminijuma sa zatvorenom poroznom strukturom korišćena je metoda uduvavanja gasa (Aluhab pena) (slika 13).



*Slika 13. Aluminijumska pena sa zatvorenom poroznom strukturom proizvedena korišćenjem ALUHAB tehnologije - pogled spreda*

„Aluhab“ je aluminijumska pena proizvedena kombinacijom izuzetnog penušavog aluminijuma i ultra finih čestica safira [83,152]. Proces počinje uduvavanjem gasa u rastvorljivu tečnost, kroz mali otvor, a moguće je kontrolisati veličinu mehura koji se uduvava. Veličina mehurića gasa zavisi od veličine i udaljenosti mlaznice, tj. prečnik mehurića gasa je oko 1 mm, isto kao i rastojanje mlaznice. Uzorci aluminijumske pene zatvorenih pora seku se iz ogromnih blokova Aluhab pene pomoću trakaste testere. Najmanje ćelije mogu biti 0.5 mm, a najveće i do 5.0 mm. Finalna gustina poroznog materijala je bila  $0.6 \text{ g/cm}^3$ . Uzorak nije naknadno obrađivan pre probnog testiranja. Uzorak proizveden korišćenjem metode uduvavanja medija (gasa) prikazan je na slici 13.

## 4.2 ISPITIVANJE JEDNOOSNIM PRITISKIVANJEM

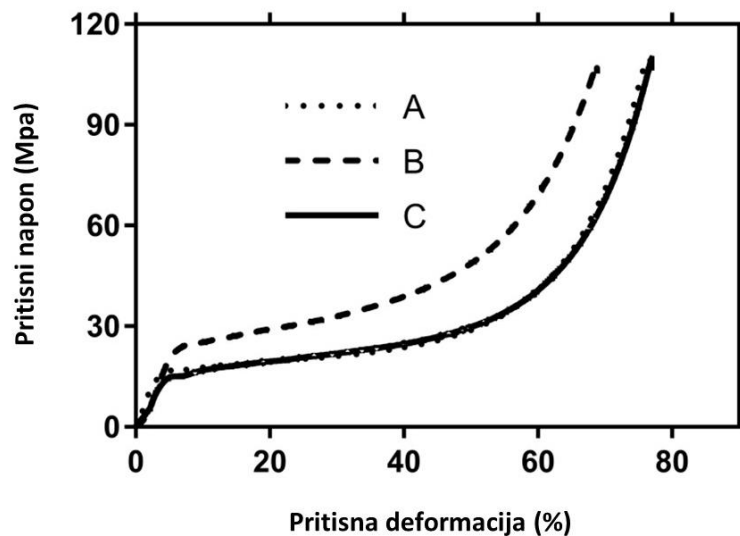
Aluminijumske pene se najčešće ispituju jednoosnim pritiskivanjem. Proučavanjem krivih napon-deformacija, zaključuje se da određeni delovi istih pokazuju promenu u odnosu na poroznost, sastav legure aluminijuma i strukturnih defekata. Ove promene utiču na definisanje kvalitativnih svojstava metalnih pena [143]. Mnogi istraživači su posmatrali karakter deformacije metalne pene i detaljno su opisali određena karakteristična zapažanja. U svom istraživanju [144] pokazali su da pri smanjenju sile pritiskivanja dolazi do smanjenja gustine, što je posledica stvaranja pora tokom testa i vremena potrebnog za proizvodnju uzorka. Morfološki, ovo dovodi do toga da veličina i oblik pora imaju veći uticaj od gustine, a naprezanje pri kojem dolazi do zgušnjavanja opada sa povećanjem gustine pene. Banhart i Baumeister [145] su istakli važnost orijentacije zatvorenih spoljašnjih slojeva za mehaničko ponašanje metalnih pena pri jednoosnom pritiskivanju. Orijehtacija pritisnog opterećenja u smeru spoljašnjih slojeva daje bolje mehaničko ponašanje. Povezanost između orijentacije pritisnog opterećenja i pravca formiranja metalne pene je od manjeg značaja.

Proučavana je deformacija na mezoskopskoj i mikroskopskoj skali [146] pri čemu su eksperimentalni rezultati pokazali da su značajne nehomogenosti u raspodeli gustine važan faktor u određivanju mehaničkog ponašanja metalnih pena. Al pena se sastoji od hemijskih komponenti koje određuju njeno makroskopsko ponašanje i mikrostrukturu. Prilikom uporednog ispitivanja debele i tanke aluminijumske pene utvrđeno je da sila kidanja i potrošnja energije rastu sa povećanjem gustine. Kod tankih i gušćih panela prisutno je veće rasipanje rezultata s aspekta mehaničkog ponašanja [147]. Duktilne metalne pene pokazuju kontinuiranu krivu grafika napona i deformacije umesto dezintegracije materijala. Kraj efektivne dužine deformacije kod duktilnih metalnih pena prilično je kraći nego kod krutih metalnih pena [143].

Prilikom eksperimentalnih ispitivanja kod Alulight pena primećeno je da kod ispitivanja zatezanjem dolazi do krtog loma, dok kod ispitivanja pritiskivanjem dolazi do pojave duktilnosti, što je u skladu sa literaturom [148]. Prilikom zatezanja i pritiskivanja napon tečenja i Jangov modul su jednaki, a nelinearno se povećavaju sa povećanjem gustine. Jaka i čvrsta metalna pena se dobija ako je udeo silicijuma nizak. Nivo poroznosti je direktno proporcionalan naponima pritiskivanja i zatezanja. Vidi se da porast poroznosti podstiče veće napone pritiskivanja i zatezanja [149]. To se može objasniti velikim smanjenjem uzorka pri pritiskivanju usled zgušnjavanja uzorka, što je naročito moguće kod većih nivoa poroznosti (npr. 80 %). Povećanje poroznosti uslovljava smanjenje čvrstoće pene, jer uzorci sa većom poroznošću imaju više nepopunjenih šupljina, i zbog toga imaju manju izlaznu površinu koja je dostupna za opterećenje za razliku od uzoraka sa manjim procentom poroznosti. Rezultati

numeričke simulacije lomljenja aluminijske pene pokazuju značajnu mogućnost apsorpcije energije, pri čemu je zanemarljiv uticaj trenja između pene i cevi na apsorpciju energije [150].

Jednoosno pritiskivanje je realizovano pri sobnoj temperaturi na uređaju Hegewald and Peschke (Meß-und Prüftechnik GmbH, Nossen, Germany), pri pomeranju od 0.001 mm/s, a prema DIN50134 standardu [157]. Izvršena su tri ispitivanja na tri test uzorka koji su isečeni iz većeg penastog bloka i prilikom ispitivanja su uočene elastična zona, zona ravnomernog napona i zona zgušnjavanja. Analizirano je opterećenje kao funkcija vremena i pomeranja, kao i napon pritiskivanja kao funkcija izduženja i deformacije. Na slici 14 je prikazana kriva napon-deformacija za tri različita test uzorka koji su proizvedeni ALUHAB tehnologijom.



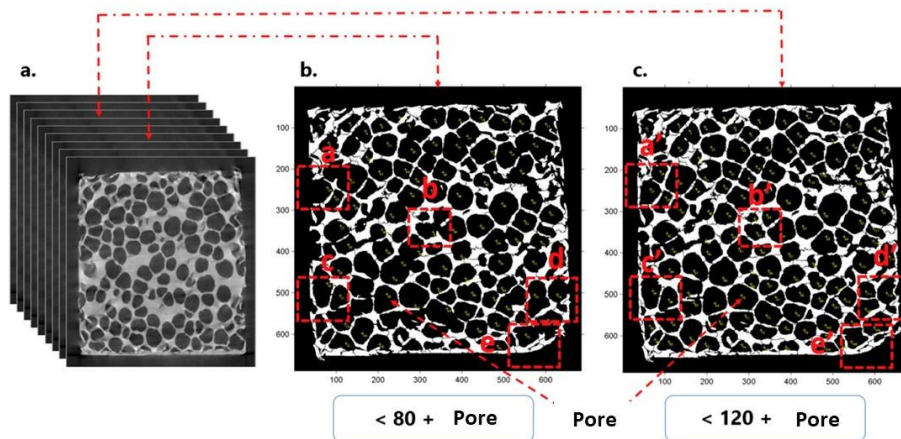
*Slika 14. Dijagram napon - deformacija aluminijske pene sa zatvorenim ćelijskom strukturom*

### 4.3 CT SLIKE ZASNOVANE NA TRODIMENZIONALNOM MODELU SA ZATVORENOM ĆELIJSKOM STRUKTUROM

Mikrotomografija ili kompjuterska tomografija je primenjena za skeniranje troslojne polimerne pene [151]. Prilikom skeniranja problem predstavlja nizak kontrast i slaba rezolucija usled čega se dešava manja apsorpcija rendgenskih zraka kod polimernih pena u odnosu na metalne pene. Zbog toga je osmišljena napredna metodologija koja koristi 3D obradu slike u okviru koje se karakteristike kao što su anizotropija, orijentacija, prečnik i sferičnost, mogu odrediti za svaku poru posebno, a debljina i dužina podupirača se mogu odrediti u željenoj rezoluciji. Takođe, ove informacije se mogu dalje koristiti za razumevanje ponašanja u testovima toplotne provodljivosti i otpornosti na sabijanje.

Karakterizacija uzoraka je izvršena korišćenjem mikro-CT, kao što je prikazano u [152]. Ovo ispitivanje je izvršeno korišćenjem Hamamatsu L8121-03 Microfocus X-beam source (Hamamatsu Photonics, Hamamatsu, Japan) sa veličinom centralne tačke od 50 m i najvećim naponom cevi od 150 kV. Slika 15 prikazuje 3D tomografske slike uzorka aluminijske pene sa zatvorenim ćelijskom strukturom.





*Slika 15. A). 2D presek slike dobijene CT skeniranjem B). Slike sa deformisanim porama V). Slike sa pravilnim rasporedom pora nakon podešavanja praga*

#### 4.4 TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA

Osnovni uzrok otkaza mašinskih sistema u industriji je habanje mašinskih elemenata koje između ostalog može biti povezano sa korozijom u zoni kontakta dve površine. Proces korozije je od najveće važnosti za biomedicinske implantate, posebno one napravljene od metala, poput titanijuma i njegovih legura kao i nerđajućeg čelika, jer kiselina prisutna u ljudskim tečnostima može pospešiti proces korozije. Ovi metali su dizajnirani tako da minimiziraju ili eliminišu koroziju i da ih odlikuju superiorna termička, mehaničke i fizičke karakteristike, što ih čini široko primenljivim u mnogim granama industrije. Međutim, kada se dve površine u kontaktu nađu u sredini koja pospešuje koroziju, dolazi do pojave korozije i habanja, pritom stvarajući složen proces koji se naziva tribokorozija. Tribokorozija je jednako važna i na mikro i nano nivou. Tribokorozija predstavlja vezu između mehanizama habanja i procesa korozije za dva materijala u kontaktu dok su u relativnom kretanju. Tribokorozija obuhvata složene interakcije između mnogih parametara, kao što su: materijali, površinski filmovi, mazivo/okruženje, površina kontakta, geometrija, napon, hrapavost površine, brzina klizanja, način klizanja, radni ciklus (kontinuirani kontakt, povremeni kontakt), temperatura, vlažnost, atmosfera (vazduh, vakuum, gasovi, itd.). Tribokorozija predstavlja važnu oblast istraživanja kako bi se razumelo ponašanje naprednih materijala. Zajednički efekti mehaničkog opterećenja i korozivnog okruženja mogu dovesti do drugačijeg obrasca ponašanja materijala [158].

Do habanja i korozije može doći iz zone kontakta zbog prisustva kontaminenata u kontaktnom okruženju. Tome doprinosi sam tribološki kontakt ili unošenje kontaminenata iz spoljašnje sredine u kontaktnu zonu. Promena površinskih slojeva može nastati od trećeg tela ili kontaminenata unutar kontaktne zone, čime se menja ceo koncept kontakta, čak i na mestima gde su nano ili mikro kontaminenti prisutni u kontaktnoj zoni. Postaje neizbežno stvaranje produkata habanja dok su elementi u kontaktu pri relativnom kretanju, tako da je pojava kontaminenata veoma značajan faktor koji do sada nije razmatran u istraživanju. Postoji nekoliko metoda koje se mogu koristiti u svrhu istraživanja tribokorozije:

- Sinergistički

- Mehanistički
- Treće telo
- Nano hemijsko habanje

#### 4.4.1 TRIBOKOROZIJA

Mehanizmi habanja se mogu kategorisati u nekoliko različitih tipova kao što su: athezivno habanje, abrazivno habanje, površinski zamor, fretting, eroziono habanje, habanje usled korozije i oksidacije [161-163]. Od svih oštećenja i otkaza nastalih usled habanja, abrazivno i athezivno habanje zauzima najveći udeo. Abrazivno habanje se karakteriše dubokim žlebovima i ogrebotinama, koje nastaju usled interakcije vrhova neravnina jedne površine na drugu koje su u kontaktu. Plastična deformacija nastaje kada tvrđi vrhovi neravnina klize preko mekše površine [161,162]. Athezivno habanje dovodi do procesa mikrozavarivanja vrhova neravnina koje dolaze u kontakt, posebno između vrsta materijala koji poseduju slične mehaničke karakteristike (tvrdoća, modul elastičnosti). Produkti habanja koji nastaju tokom kontakta mogu dovesti do habanja površina na različite načine: dodatno habanje, smearing (odvajanje i deponovanje materijala sa jedne na drugu površinu), stvaranje oksida i/ili tankog filma, hemijske reakcije sa okolinom, izbacivanje iz kontaktne zone, itd. Produkti habanja izazivaju veoma složene interakcije koje su od posebnog značaja na mikro i nano nivou. Tokom dužeg vremena može doći i do zamornog habanja koje je praćeno nastankom i razvojem pukotina i loma kako u površinskim tako i u dubljim slojevima, a može dovesti i do otkaza elementa. Proces habanja koji se javlja u zoni kontakta dva tela koja se oscilatorno kreću sa malim amplitudama-fretting rezultira mikro zavarivanjem neravnina, a takođe može rezultirati i lokalizovanim oštećenjem u obliku plitkih površinskih pukotina. Ležajevi su skloniji otkazu zbog habanja. Koroziono ili oksidaciono habanje nastaje kao posledica hemijske ili elektrohemijske reakcije metala sa okolinom [164-167]. Za razliku od posmatranja na makro nivou, kontakt dve ravne površine se uvek ostvaruje preko vrhova neravnina. Prema tome, stvarna kontaktna površina preko neravnina je relativno manja od ukupne površine; na njemu se zasnivaju svi procesi povezani sa habanjem i trenjem. Tokom kontakta može doći do velikog broja procesa, u zavisnosti od značajnih faktora tribo-mehaničkog sistema, kao što su plastična deformacija, sečenje, smicanje, odvajanje čestica ili većih površinskih slojeva, formiranje produkata habanja, hemijske reakcije, pukotine, itd. Jedan od problema može predstavljati sredina u kojoj se kontakt ostvaruje. Na primer, tečnosti ili gasovi koji sadrže kontaminente, mogu iste dovesti u zonu kontakta. Na taj način može doći do erozionog habanja, pod uticajem udara kontaminenata na površine tokom kretanja [163]. Na brzinu erozionog habanja utiču različiti faktori, koji su prvenstveno povezani sa svojstvima kontaminenata, kao što su oblik, tvrdoća, brzina udara i uglovi udara.

Pojave povezane sa habanjem mogu se istraživati na različitim skalama. Kontaktne interakcije na nano i mikro skali su veoma značajne jer obuhvataju tribohemijske interakcije. Korozivno habanje prevladuje kao istaknuti mehanizam na nano i mikro skali, ali se inače obično zanemaruje na makro nivou, zbog veoma malog doprinosa u poređenju sa abrazivnim ili adhezivnim habanjem. Metodološki pristupi za ispitivanje tribokorozije su još uvek u razvoju, dok je metodologija za ispitivanje habanja standardizovana. Dinamički koeficijent trenja je osnovni parametar sistema koji ukazuje na promene u svakom sistemu, koristeći konvencionalne tehnike merenja korišćenjem različitih geometrija kontakta na tribometrima, od makro skale do nano-skale (nanotribometra). Na nano skali, praćeni koeficijent trenja

---

pokazuje skoro sve promene u ponašanju sistema, što ukazuje na početak različitih pojava (npr. faza otkaza prevlake). Vrednost dinamičkog koeficijenta trenja dobijena je nanotribometrom.

#### 4.4.2 METODE PROCENE KOROZIJE

Najčešći tip korozije je ujednačena korozija kod koje se javlja ujednačena brzina korozije po površini u vremenu. Brzina korozije se kvantifikuje ili procenom gubitka mase, ili korišćenjem elektrohemijskih metoda. Tokom tribološkog kontakta češće dolazi do neujednačene korozije ili lokalizovanih dejstva, među kojima su češći oblici korozije u obliku jamica i pukotina. Mnogi drugi fenomeni su takođe povezani sa pojavom tribokorozije. ASTM standardne procedure i optička mikroskopija (procena pukotina i otkaza) se koriste kao standardne tehnike procene oštećenja usled korozije koja nastaje zbog zaostalih napona (SCC) ili oštećenja usled krtosti izazvane vodonikom (HIC). ASTM G61 uključuje određivanje potencijala korozije u obliku jamica i pukotina snimanjem krive anodne polarizacije u rastvoru hlorida, kao i kritične temperature pri kojoj se korozija odvija pod konstantnim potencijalom. Prema ASTM G48, testiranje potpunim uranjanjem je povezano sa merenjem maksimalne dubine korozione jame. Dejstvo korozije može se proučavati pri visokim temperaturama, čvrstoći na savijanje i mehanizmi habanja nakon izlaganja korozivnoj sredini na povišenim temperaturama. Za procenu otpornosti na koroziju mogu se koristiti mnogi pristupi. U slučaju materijala koji su u upotrebi duže (više od 20 godina), najbolja metoda je izlaganje ispitivanih elemenata u realnom okruženju. Međutim, duže vremensko trajanje (10 - 20 godina) smanjuje njegov stepen korisnosti zbog nemogućnosti kontrolisane promene uticajnih parametara. Zbog toga su napravljena ubrzana ispitivanja korozije i mnoga od njih su pogodna za ciljanu oblast primene ispitivanih materijala (npr. u automobilske industriji).

Jedna od tih metoda kojom se ubrzava proces degradacije je test slanog spreja, koji se odvija u slanom spreju ili komorama za maglu. Dobijeni rezultati za procenu korozije u takvom okruženju zavise od mnogih faktora, kao što su specifični uslovi unutar komore, vrsta uzoraka metala, metode za kontrolu varijabli pa čak i model komore za maglu. Standardna procedura ASTM B 117 obuhvata glavne korake procedure, od pripreme i čišćenja uzoraka za ispitivanje, izračunavanja prave količine soli, obezbeđivanja adekvatnog dovoda vazduha, do konstrukcije aparata i evaluacije rezultata. Komora za maglu, od materijala otpornog na koroziju, rezervoar za rastvor soli, cev sa komprimovanim vazduhom, jedna ili više mlaznica za tečnost, zajedno sa odgovarajućim sensorima i aktuatorima su prisutni u sistemu za stvaranje uslova za postizanje atmosfere magle. Standard ASTM B 117 predlaže odnos natrijum hlorida i vode u rastvoru soli 5:10 i pritisak u vrhu vazdušne cevi u opsegu od 83 - 124 kPa, u zavisnosti od temperature, kako bi se postigao odgovarajući nivo zasićenja. Temperatura unutar komore je 35°C, a relativna vlažnost između 95 i 98 %. Tokom testa potrebno je održavanje stalne atmosfere slane magle u komori sa uzorcima. Stopa korozije se obično izračunava nakon testa preko gubitka mase.

Konvencionalni elektrohemijski testovi se koriste za procenu brzine korozije, zbog dostupnosti i mogućnosti kontrolisanja različitih parametara. Međutim, kod novih materijala ovi testovi mogu pokazati određene probleme. Napravljeni su i brojni novi testovi, a uobičajeni se stalno unapređuju, posebno u vezi sa ispitivanjem korozije novih klasa



---

materijala, kao što su: tehnika skenirajuće vibracione elektrode, lokalizovana elektrohemijaska impedansna spektroskopija, skenirajući elektrohemijski mikroskop, skeniranje Kelvinove sonde i dr.

- Kvantifikacija habanja
- Kvantifikacija habanja je definisana kao promena zapremine; mase pohabanog materijala ili promena dimenzije. Količina habanja se takođe meri u smislu stope habanja koja se definiše kao brzina pohabanog materijala u jedinici vremena. Sledeći koraci se mogu preduzeti prilikom kvantifikacije habanja:
- Izbor testova habanja i trenja. Za dobre tribološke performanse, ispitivanje trenja i habanja se vrši u različitim fazama životnog ciklusa proizvoda.
- Izbor pristupa testiranju. Postoji nekoliko pristupa za procenu habanja i trenja koji u velikoj meri zavise od razmera i složenosti elemenata koji se testiraju. Tokom poslednje faze procene proizvoda da bi se steklo bolje razumevanje triboloških sistema može se obaviti laboratorijsko ispitivanje u kontrolisanim uslovima. Laboratorijsko ispitivanje se može koristiti iz dva razloga: prvi, u fazi razvoja proizvoda i drugi, kada je prisutna specifična primena u kojoj postoji potreba za definisanim uslovima za tribološki kontakt. Prvenstveno, odabir parametara se vrši za izradu validnog testa koji pomaže tribološku evaluaciju parametara procesa.
- Parametri ispitivanja. Na koeficijente habanja i trenja u velikoj meri utiču kontrolni parametri i uslovi tribološkog kontakta. Ovi parametri uključuju normalnu silu, brzinu klizanja, materijale tribo-elemenata, temperaturu [170], kontaktnu geometriju i okruženje [168,169], a definisani su korišćenjem specifičnih kontrolnih metoda ili korišćenjem istih sistema ispitivanja za ceo proces.

Interakcija sa drugim mehanizmima habanja. Na brzinu habanja utiču i hemijske reakcije i zamor. Tribo-elementi koji su izloženi vodenom okruženju mogu biti podvrgnuti pozitivnoj ili negativnoj sinergiji koja povećava ili smanjuje stopu habanja. Slično, temperatura [169] i drugi naponi kao što je zamor pri kotrljajućim kontaktima takođe mogu uticati na mehanizam habanja.

Planiranje eksperimenta i prezentacija rezultata. Planiranje tribološkog ispitivanja uključuje definisanje kontrolnih uslova ispitivanja i parametara ispitivanja. Tehnike mapiranja se takođe mogu koristiti gde se dva ili više faktora menjaju na kontrolisan način i rezultati se iscrtavaju kao pojedinačne tačke ili konture. Ova tehnika mapiranja je efikasan način određivanja ukupnog ponašanja koji pruža detaljno znanje o habanju i trenju.

Za standardne metalne materijale, tribološki parametri ispitivanja i ispitivanje pod makro opterećenjima su odgovarajuće definisani. Porozne strukture koje su se pojavile poslednjih godina ispoljavaju različite probleme prilikom triboloških ispitivanja. Najveći problem se javlja kada je jedna površina porozna, pa je teško obezbediti kontinuirani kontakt između površina u relativnom kretanju, što dovodi do prekidanja kontakta tokom triboloških testova unutar zona pora. Da bi se prevazišao ovaj problem, potrebna su dodatna istraživanja.

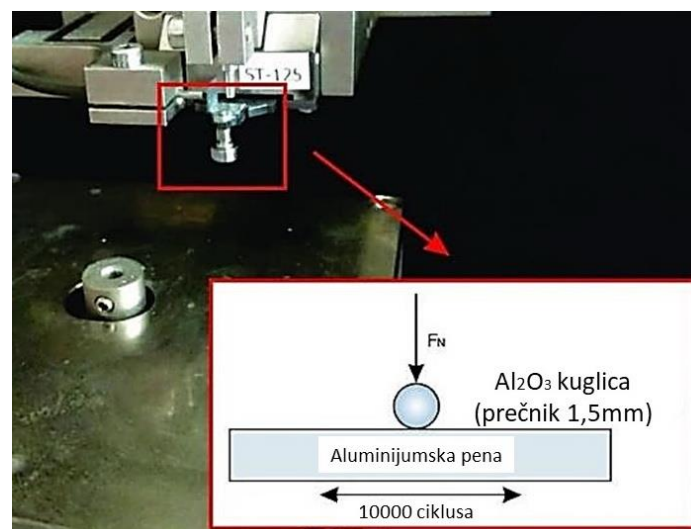
Primena metalnih pena je zastupljena u vazduhoplovnoj, automobilskoj i biomedicinskoj industriji. Većinu istraživanja u ovoj oblasti čine eksperimentalne i numeričke studije deformacije, loma, plastičnosti, dinamičkog odgovora i apsorpcije energije ćelijskih pena [171]. Na kriogenoj temperaturi, aluminijumska pena sa otvorenom ćelijskom strukturom je korišćena za poboljšanje prenosa toplote i takođe je testirana za kriogeno skladištenje energije

sa promenom faze azota [172]. Osobine pene na bazi Al zavise od strukture pora, veličine pora, raspodele pora i nivoa poroznosti [173]. Kinetička energija aluminijuma je modifikovana da bi se povećala poroznost geopolimera u odsustvu dodatnog sredstva za penjenje; kako bi se istražio uticaj na razvoj poroznosti i karakteristike vezivnog skeleta. Brzina oksidacije aluminijumskog praha može se pratiti podešavanjem odnosa alkalnih aktivatora, što dalje utiče na stepen pene [174].

U ovom radu, porozne legure aluminijuma (Al) su istraživane u vezi sa primenom novih strukturnih oblika kao što su pene sa otvorenim ili poluzatvorenim ćelijskim strukturama u različitim oblastima, zbog njihovih svojstava kao što su mala težina i duktilnost. Pene na bazi Al imaju praktičnu primenu kao strukturni materijal u mnogim oblastima (automobilska industrija, sistemi za prenos toplote, sistemi protiv vibracija i građevinska industrija). Legure na bazi Al pokazuju dobru otpornost na koroziju, zbog formiranja zaštitnog sloja koji sprečava dalju oksidaciju. Međutim, i dalje postoje različita pitanja vezana za uticaj porozne strukture, promenljive temperature i uticaja korozivne sredine, posebno na tribološko i mehaničko ponašanje. Porozne strukture imaju značajan uticaj na mehaničke karakteristike i dalje na njihovo tribokorozivno ponašanje, u poređenju sa čvrstim materijalima. Tribološko ponašanje pena na bazi Al nije u velikoj meri istraženo. Određivanje mehanizama habanja i njegovog razvoja, kao i ponašanja koeficijenta trenja će dovesti do unapređenja dizajna ovih naprednih materijala. Iz tog razloga u ovom radu su istraživana tribološka svojstva porozne aluminijumske pene sa zatvorenom poroznom strukturom.

#### 4.4.3 TRIBOLOŠKA ISPITIVANJA PENE OD ALUMINIJUMA

Tribološka ispitivanja pene od aluminijuma realizovana su pod različitim opterećenjima: 10 mN, 25 mN, 50 mN, 75 mN, 100 mN. Ispitivanja su obavljena na CSM nanotribometru, sa linearnim naizmeničnim kretanjem. Svrha korišćenja linearnog kretanja je zbog pojave istog kretanja u realnim tribo-mehaničkim sistemima. Omogućava izračunavanje koeficijenta trenja pri kretanju. Korišćena je kontaktna geometrija kuglica - po – površini (slika 16). Tokom kontakta aluminijumske kuglice i aluminijumske pene određen je dinamički koeficijent trenja, kao što je prikazano u delu prikaza rezultata u ovom radu.



Slika 16. Eksperimentalna postavka nanotribometra

Porozni uzorci legura na bazi Al pripremljeni su sečenjem iz prvobitno pripremljene pene na bazi Al. Nakon toga uzorci su temeljno očišćeni strujanjem suvog vazduha. Zatim su uzorci postavljeni unutar dvokomponentnog epoksija, kako bi se obezbedila odgovarajuća ravna površina za nanotribološki kontakt. Odgovarajuće pozicioniranje je bilo važno kako bi se omogućila stabilnost kontaktne sile tokom klizanja. U tabeli 3 prikazani su uslovi korišćeni tokom ispitivanja.

**Tabela 3.** *Uslovi triboloških ispitivanja*

Način kretanja	Linearno naizmjenično kretanje
1/2 amplitude	0.25 mm
Maksimalna linearna brzina	2.00 mm/s
Broj ciklusa	10000 cycles
Frekvencija	20.0 Hz

---

## 5. IZBOR MATERIJALA KORIŠĆENJEM ALATA ZA ODLUČIVANJE (MCDM)

Do sada je razvijen veliki broj inženjerskih materijala sa poboljšanim karakteristikama. To je postignuto usled brzog razvoja, povećanoj potražnji za boljim karakteristikama i tehničkoj dostupnosti materijala. Međutim, izbor pravog materijala za odgovarajuću primenu je kompleksan zadatak. Izbor materijala je kritičan proces koji zahteva da se određenim relacijama definiše niz koraka u zavisnosti od uslova eksploatacije. Kompjuterski podržan dizajn (CAD), reverzni inženjering, modeliranje metodom konačnih elemenata, ili metodom konačnih zapremina, nude brojne mogućnosti da se materijal istražuje u svim uslovima primene. U principu, mehaničke karakteristike materijala su prioritet, bez obzira da li se razmatra elastična, plastična ili elastoplastična oblast primene materijala. U slučaju duktilnog materijala za karakterizaciju mehaničkih osobina materijali se ispituju na zatezanje i pritiskivanje a kao dominantan parametar uzima se napon tečenja. I slučaju krutih materijala ispituje se žilavost loma i pojava prslina. Pored navedenih jako je važno utvrditi i gustinu, površinu mase, težina je važna sa fundamentalne tačke gledišta optimizacije. Kako su materijali osetljivi i na temperature neophodno je uraditi potpunu termo-mehaničku karakterizaciju. Takođe faktori kao što su temperatura, koeficijenti ekspanzije, provodljivost, difuzivnost i drugo. Električne, magnetne i optičke karakteristike, zatim održivosti i hemijska svojstva, uključujući toksičnost neophodno je analizirati u zavisnosti od primene [175-176]. Pored ovih opštih faktora odgovornih za izbor materijala, potrebno je analizirati i ekonomske aspekte i održivost.

Primena određenog materijala podrazumeva ekonomsku isplativost uz postizanje odgovarajućeg željenog kvaliteta finalnog proizvoda. Odabir adekvatnog materijala prema uslovima primene predstavlja složen i dugotrajan proces. Primena pojedinog materijala je uvek uslovljena finalnom funkcijom elementa u sistemu. Izbor materijala je poseban termin koji obuhvata nekoliko podkoraka za pravilnu implementaciju [177-179]. Izbor materijala zahteva temeljno razumevanje, detaljnu analizu i sistematski pristup i postoji više razvijenih analitičkih metoda i pristupa. Osnovni cilj je izbor najboljeg materijala sa liste materijala koji ispunjava standardne uslove i uslovne kriterijume, prema rangiranju najboljih materijala. Formulisanje zahteva i rangiranje materijala prema minimalnim ili maksimalnim vrednostima, matematički se može izraziti kao:

$$E_i > E_i - \text{Gornji granični uslovi}$$

$$E_i < E_i - \text{Donji granični uslov karakteristike } i$$

Obično se razlikuju na osnovu upotrebe, proizvodnje i dostupnosti. Nakon uspešne implementacije takvog procesa rangiranja, optimizacija se koristi za proveru svih karakteristika [180].

Kriterijumi u izboru materijala zasnivaju se uglavnom na specifičnim karakteristikama i ekonomskoj analizi. Vrsta karakteristike se određuje prema oblasti primene, bilo da se koriste za opštu primenu ili za specifične krajnje zahteve. Na primer, u opštim slučajevima svojstva

koja su uglavnom bitna uključuju način primene proizvod i cenu. Kod inženjerskih materijala, uglavnom su najvažnije mehaničke karakteristike, kao što su: modul elastičnosti, granicu tečenja, zatezanje i pritiskivanje, žilavost loma, duktilnost, zatim termičke karakteristike (tačka topljenja, provodljivost, specifična toplota), električne karakteristike (električna otpornost, dielektrična konstanta, potencijal proboja), optičke karakteristike (indeks prelamanja), ekološki aspekti. Na slici 1 je prikazan jedan način izbora materijala prema zonama određenih karakteristika (gustina, čvrstoća).

Pored gore navedenih metoda za odabir materijala, drugi najčešće korišćeni metod je kvantitativni metod odabira materijala. Dostupnost velikog broja materijala i proizvodnih procesa čini proceduru izbora pravog materijala još komplikovanijom. Usvajanje sistematskog postupka odabira može pomoći u obezbeđivanju pravog materijala za datu komponentu. Proces odabira za primenu dobrog sistematskog postupka može se olakšati uz pomoć kvantitativnih postupaka odabira, koji takođe mogu biti kompjuterski zasnovani [175, 189]. Holistički pristup donošenja odluka u konkurentnom inženjeringu se često koristi u razvoju proizvoda, jer uzima u obzir napredak razvoja proizvoda od početnih faza do konačnog detaljnog procesa razvoja. Tri glavne faze uključene u izbor proizvoda mogu se detaljno razmotriti kao u nastavku.

### 1. Inicijalni pregled materijala

Ova faza uključuje specifikaciju performansi i zahteva procesa različitih delova uključenih u dizajn, što može pomoći u početnom pregledu i eliminaciji materijala. Analiza zahteva za performanse materijala, koja se dalje može podeliti prema [175]:

- a. Funkcionalni zahtevi koji su direktno povezani sa traženim karakteristikama proizvoda ili dela. Ako je ova situacija malo verovatna, onda se evaluacija vrši na osnovu predviđanja simuliranih testova ili na osnovu najbližih fizičkih i mehaničkih svojstava.
- b. Zahtevi za obradivost se bave sposobnošću materijala da se obradi i oblikuje u gotov proizvod, kao što su sposobnost livenja, zavarljivost itd. Oni su takođe veoma blisko povezani sa funkcionalnim zahtevima.
- c. Cena se kao faktor ne može zanemariti jer često pokreće ceo proces. Cena obrade je obično veća od cene materijala i ponekad može dovesti do razvoja jeftinog proizvoda. Zbog toga je važno razmotriti sve aspekte pre izbora materijala.
- d. Pouzdanost je zahtev koji se odnosi na performanse predviđene funkcije tokom očekivanog životnog veka bez otkaza. Pouzdanost materijala zavisi od istorije njegove obrade i proizvodnje, što otežava njegovu merljivost. Tehnike analize kvarova se često koriste kao sistematska tehnika za određivanje pouzdanosti.
- e. Otpornost na uslove rada – Uslovi okoline sa većom korozijom i temperaturnim varijacijama mogu promeniti karakteristike materijala. Zbog toga je važno uzeti u obzir kompatibilnost materijala sa takvim okruženjima kao važan kriterijum za izbor materijala.

### 2. Kvantitativne metode za početni pregled

Sledeći korak preporučuje divergentno razmišljanje, traženje alternativa koje se mogu koristiti kao bolji izbor. Uz razmatranje svih dostupnih opcija, sada je važno primeniti inicijalne metode skrininga koje mogu pomoći da se suzi izbor materijala koji su na raspolaganju.

- a. Ograničenja svojstava materijala – Ova metoda koristi klasifikaciju svojstava materijala u dve glavne kategorije: krute i meke. Kruta svojstva su ona koja su

neophodna i moraju se uvek uzeti u obzir kao što su sklonost koroziji, provodljivost itd. dok su meka svojstva ona koja su uglavnom kompromisna i mere se relativno kao što su specifična težina, cena itd. [175].

b. Metoda cene po jedinici – Ovaj metod se može podrazumevati kada je jedna jedinica potrebna kao najkritičniji zahtev za uslugu. Ovde se obično smatraju poželjnijim materijali sa niskom cenom po jedinici.

c. Ešbijeve metoda - U ovoj metodi grafikoni između čvrstoće i gustine se mogu koristiti za vizuelizaciju materijala, čak se mogu koristiti i dijagrami elastičnosti u odnosu na gustinu da bi se utvrdila prikladnost materijala [178,179, 183 i 184].

d. Dargijev metod – Kompjuterski zasnovan sistem za odabir materijala ili procesa se koristi u ovoj metodi uz pomoć MAPS [189] kodiranja. Za preliminarni odabir koriste se matrica podobnosti i matrica kompatibilnosti.

### 3. Upoređivanje alternativnih rešenja

Nakon početnog skrininga, sledeći korak je upoređivanje dobijenih izbora sa dobrom kombinacijom mekih zahteva. Ove metode mogu se posmatrati na sledeći način. Metoda ponderisanih svojstava se koristi za dodeljivanje određene težine svojstvima materijala u zavisnosti od njihove važnosti za performanse dela u upotrebi. Tako se dobija indeks performansi, a materijali sa većim indeksom performansi se obično smatraju pogodnijim. Ukoliko su svojstva materijala brojna i kada im je teško dodeliti težinski koeficijent, koristi se digitalna logička metoda [175]. U ovoj metodi se istovremeno razmatraju dve osobine i istražuju se sve moguće kombinacije svojstava. Indeks performansi osobina takođe se može izračunati kako bi se otklonio nedostatak poređenja za razliku od jedinica kao što su hemijske, fizičke i mehaničke. U tom slučaju se vrši skaliranje svojstava pri čemu se najbolja vrednost u listi za ocenjivanje daje najpoželjnijem materijalu, dok se ostali skaliraju proporcionalno. U slučaju da se radi o velikim i dugotrajnim proračunima, ovaj protokol odabira se može sprovesti pravljenjem kompjuterskih programa koji mogu pomoći da se olakša rad na sistematski način.

Na osnovu indeksa performansi, detaljni dizajni mogu biti napravljeni za materijale kandidate sa najboljom vrednošću, imajući na umu prednosti i slabosti, faktore troškova koji se mogu izneti sa specifičnim procesima proizvodnje materijala [190].

Zamena materijala se može izvesti u kasnijim fazama zbog velikog broja razloga ili faktora koji su u skladu sa promenama u ceni, prednostima novih materijala, poboljšanju usluga ili ispunjavanju novih zakonskih kriterijuma. Takve odluke o zameni zahtevaju dosta razumevanja potencijala novog materijala što se može uraditi korišćenjem kvantitativnih metoda.

Pugh metoda je primenljiva tokom početnih faza skrininga, koristi matricu odlučivanja u kojoj se svako svojstvo novog materijala upoređuje sa onim koji se trenutno koristi i ocenjivanje se vrši od najpovoljnijeg do najmanje povoljnog (+, -,0). Konačna odluka se donosi na osnovu ukupnog broja ocena povoljnosti za bilo koju od alternativa [192].

Analiza troškova i prihoda pruža detaljnu analizu, pa je pogodnija za donošenje konačne odluke za zamenu materijala. To u osnovi podrazumeva ideju da zamena materijala treba da bude ekonomski izvodljiva, odnosno da ekonomska dobit treba da bude veća od troškova. Za detaljniju analizu, podela troškova se vrši u tri kategorije. Razlike u troškovima direktnog



materijala i rada moraju se uzeti u obzir kada zamena materijala može dovesti do promene tehnika obrade [175]. Troškovi dizajna i testiranja se obično uzimaju u obzir za kritične komponente, što ponekad predstavlja dodatni trošak. Na cenu alata i procesa završne obrade takođe se može uticati i stoga se moraju uzeti u obzir prilikom izračunavanja zahteva za obračun troškova.

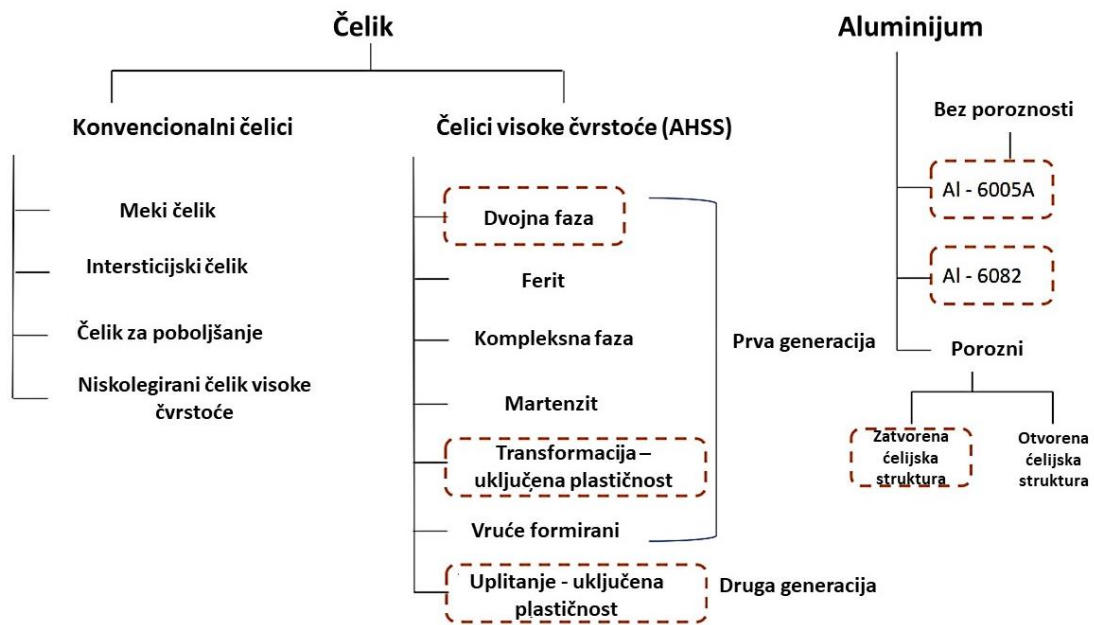
Za prikupljanje karakterističnih materijala, dostupan je veliki broj baza podataka kao što je ASM International koji je skladište više od 500 izvora podataka, kako specifičnih tako i centara podataka [192]. Računarski podržan izbor materijala može se obaviti korišćenjem interaktivnih baza podataka kao što je ASM Metal selector, gde korisnik može da prilagodi kriterijume selekcije kako bi ispunio zahteve za pretragu. Operacije pretrage se mogu olakšati korišćenjem različitih kriterijuma kao što su oblici, klasa materijala i nivo obradivosti, sastav i oznake [192]. Logičke operacije „I“, „ILI“ takođe mogu pomoći u preciziranju pretrage. Broj materijala nakon skrininga je direktno proporcionalan nametnutim ograničenjima i težini pretrage koja se može menjati kako bi se dobio dovoljan broj materijala.

Takvi sistemi, na primer, računarski aplikativni i referentni sistem (CARS), sistem dizajna aluminijuma (ADS) [192] dostupni su za analizu dizajna. Takođe, na raspolaganju su i ekspertske sistemi, koji simuliraju odluke eksperta u datoj oblasti. Sastoji se od tri glavne komponente: baza sa podacima i pravila ekspertskeg nivoa, mehanizam zaključivanja koji uključuje organizovanu proceduru pregleda baze znanja primenom pravila i treća komponenta je korisnički interfejs [192]. Ovi sistemi se mogu koristiti kao pomoć pri zameni materijala, kao i za rešavanje problema, a pored toga mogu da olakšaju saradu između korisnika.

## **5.1 IZBOR MATERIJALA: PRAKTIČNA STUDIJA IZBORA LAKIH MATERIJALA ZA PRIMENU KOD ŽELEZNIČKIH VAGONA**

Pored aluminijuma koji se široko koristi, trenutna istraživanja analiziraju primenu naprednog čelika visoke čvrstoće (AHSS) kao materijala za železničke vagona manje težine. Zahtev za vagonima manje težine postaje imperativ zbog njihove bolje efikasnosti i manje potrošnje goriva. Intenzivno se primenjuju prva i druga generacija AHSS. Detaljna kategorizacija čelika od niske do visoke čvrstoće i naprednog čelika visoke čvrstoće prikazana je na slici 17. Njihov razvoj je započeo 70-ih godina, kada je metalurška industrija tražila čelik visoke čvrstoće i duktilnosti pa su dvofazni čelici (DP) predstavljali značajan napredak [188-189]. Njihova mikrostruktura se sastoji od feritne faze (omogućava nizak inicijalni napon tečenja) i martenzitne faze (koja omogućava visoku zateznu čvrstoću).

Dizajn ovih naprednih čelika se može kontrolisati promenama na mikroskopskom nivou, odnosno varijacijama različitih parametara kao što su zapreminski udeo faza, njihova morfologija, veličina, odnos širine i visine, povezanost faza i drugo [189]. Dvofazni čelici omogućavaju ojačanje pri deformaciji i homogeno plastično tečenje [190]. Na slici 17, označeni su materijali koji su analizirani u praktičnoj studiji izbora materijala u ovom radu.



*Slika 17. Izbor inženjerskog materijala za lake vagone*

Dalje poboljšanje čelika dovelo je do dizajna TRIP čelika: transformacijom izazvana plastičnost (transformation induced plasticity steel - TRIP). Poznati su po kombinaciji čvrstoće i duktilnosti. Njihova mikrostruktura se sastoji od austenita sa dovoljno termodinamičke nestabilnosti. Sadrži veće vrednosti ugljenika, silicijuma i aluminijuma. TRIP čelici mogu da imaju velika ravnomerna izduženja, visoku otpornost na lom i čvrstoću. Finalne karakteristike TRIP čelika su suštinski određene martenzitnom transformacijom iz FCC  $\gamma$  austenit faze u BCC  $\alpha'$  martenzit fazu, što se dešava usled deformacije materijala. Shodno tome, na finalne karakteristike materijala utiče primenjeni napon, istorija deformacija, brzine deformacije, temperatura, i drugo [191-192]. Dalja poboljšanja ovih čelika dovela su do razvoja TWIP (twinning-induced plasticity) čelika takođe poznatih kao čelik druge generacije. Oni spadaju u kategoriju austenitnih čelika koji se mogu deformisati kako klizanjem slojeva tako i mehaničkim uvijanjem [193]. Hemijski sastav DP 600, TRIP 700 i TWIP čelika je prikazan u tabeli 6. Oni su poznati po svojim izuzetnim mehaničkim karakteristikama kao što su visoka zatezna čvrstoća i duktilnost. Imaju visoku otpornost na koroziju i habanje, visoku apsorpciju energije i otpornost na pojavu prsline pri udaru [194].

U Tabeli 7 date su karakteristike materijala koji su rangirani u okviru višekriterijumske optimizacije i odlučivanja (MCDM) u ovoj doktorskoj tezi. Aluminijum 6005 i 6082 su široko primenjeni u železničkoj industriji. Uglavnom se dobijaju procesom ekstrudiranja i valjanja i dizajnirani su za visoku čvrstoću [195]. Hemijski sastav aluminijuma 6005 - T6 i 6082 - T6 prikazan je u tabeli 8. Pored AHSS čelika i aluminijuma, u poređenju materijala je dodat i porozni strukturalni aluminijum, optimalnih mehaničkih i fizičkih svojstava [196-197].



**Tabela 6.** Hemijski sastav DP 600, TRIP 700 i TWIP čelika [189-209]

	Max. C (%)	Max. Si (%)	Max. Mn (%)	Max. P (%)	Max. S (%)	Al (%)	Max. Cu (%)	Max. B (%)	Max. Ti + Nb (%)	Max. Cr + Mo (%)
DP 600	0.15	0.8	2.5	0.05	0.01	0.010	0.2	0.005	0.15	-
TRIP 700	0.24	2.0	2.2	0.05	0.01	0.015	0.2	0.005	0.2	0.6
TWIP-steel	0.60	0.60	25.0	0.03	0.005	2.50	0.20	-	0.20	2.50

**Tabela 7.** Karakteristike inženjerskih materijala za MCDM analizu [189-209]

	Gustina (kg/m <sup>3</sup> )	Napon tečenja (Y.S), MPa	Zatezna čvrstoća (T.S), MPa	Y.S/T/S odnos	Jangov modul elastičnosti (GPa)	Cena US \$ / kg	Otpornost na koroziju
Dual Phase, DP 600	8050	410	700	0.58	200	0.55	1
Transformation Induced Plasticity, TRIP 700	8050	520	800	0.5	200	0.55	1
Twinning Induced Plasticity, TWIP	8050	750	1000	0.75	200	1.5	1
Aluminijum, Al 6005 – T6	2700	240	260	0.9	69	1.9	3
Aluminijum, Al 6082 – T6	2700	250	310	0.88	70	1.9	3
Porozna struktura, (Al – zatvorene pore)	1000	20	30	0.66	12	46	3

**Tabela 8.** Hemijski sastav 6005 - T6 i 6082 - T6 [208-209]

Elementi komponenti	6005 – T6 (metrički)	6082 – T6 (metrički)
Aluminijum, Al	97.5 - 99 %	95.2 - 98.3 %
Hrom, Cr	<= 0.10 %	<= 0.25 %
Bakar, Cu	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Gvožđe, Fe	<= 0.35 %	<= 0.50 %
Magnezijum, Mg	0.40 - 0.60 %	0.60 - 1.2 %
Mangan, Mn	<= 0.10 %	0.40 - 1.0 %
Ostalo, pojedinačno	<= 0.05 %	<= 0.05 %
Ostalo, ukupno	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicijum, Si	0.60 - 0.90 %	0.70 - 1.3 %
Titanijum, Ti	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Cink, Zn	<= 0.10 %	<= 0.20 %

## 5.2 METODE VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE

### 5.2.1 VIKOR METODA

Algoritam VIKOR metode sadrži sledeće korake:

Korak 1: - Prvi korak je naći najbolju  $f_i^*$  i najgoru  $f_i^-$  vrednost svih normi, odnosno ocena stanja osnove, ocena stanja nadgradnje i drugi kriterijumi,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Ako  $i^{\text{th}}$  norma predstavlja korist (što veća to bolja) tada je  $f_i^* = \max_j f_{ij}$  i  $f_i^- = \min_j f_{ij}$ ; Ako  $i^{\text{th}}$  norma predstavlja trošak (što manji to bolji) tada je

$$f_i^* = \min_j f_{ij} \text{ and } f_i^- = \max_j f_{ij}; \quad (1)$$

Korak 2: - Određivanje vrednosti  $S_j$  i  $R_j$  pomoću relacija:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-) \quad (2)$$

$$R_j = \max_i [w_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)] \quad (3)$$

Gde  $S_j$  i  $R_j$  predstavlja meru korisnosti i meru beskorisnosti, respektivno i  $w_i$  je težinski koeficijent  $i^{\text{th}}$  kriterijuma. Dobijeno rešenje  $\min_j R_j$  je najmanje loša opcija [177].

Korak 3: - Izračunavanje VIKOR indeksa  $Q_j$ :

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1-v) \frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (4)$$

Gde je  $S^* = \min_j S_j$ ,  $S^- = \max_j S_j$ ,  $R^* = \min_j R_j$ ,  $R^- = \max_j R_j$ ,  $S_j$  i  $R_j$  su izračunati u koraku 2 i  $v$  se uvodi kao strategija težine „većine kriterijuma“ (ili „maksimalne korisnosti grupe“)  $v = 0.5$ .

Korak 4: - Rangiranje redosleda preferencije prema vrednosti  $Q$ .

Najmanja vrednost dobijena iz VIKOR vrednosti se smatra najboljom vrednošću. Odabira se rešenje blizu idealne tačke, na osnovu najpovoljnije vrednosti  $Q$  (minimum).

### 5.2.2 TOPSIS METODA (TECHNIQUES FOR ORDER OF PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTIONS)

Korak 1: Definiše se matrica odlučivanja kao  $[f_{mp}]_{M \times P}$  (5)

Korak 2: Računanje agregacije vrednosti postupkom prosečne vrednosti.

Korak 3: Normalizovana matrica odlučivanja  $[r_{mp}]_{M \times P}$  se dobija postupkom linearne normalizacije:  $r_{mp} = \frac{f_{mp}}{\sum_1^M f_{mp}}$  (6)

Korak 4: Pronalaženje pozitivnog idealnog rešenja (PIS),  $d_{mp}^+$  i negativnog idealnog rešenja (NIS),  $d_{mp}^-$ :

For max:  $d_{mp}^+ = value \ \& \ d_{mp}^- = value$  (7)

For min:  $d_{mp}^+ = value \ \& \ d_{mp}^- = value$  (8)

Korak 5: Mere odvajanja od pozitivnog idealnog rešenja (PIS),  $d_{mp}^+$  i negativnog idealnog rešenja (NIS),  $d_{mp}^-$ :

$$d_M^+ = \sum_1^M W_p \cdot |d_{mp}^+ - r_{mp}| \quad (9)$$

$$d_M^- = \sum_1^M W_p \cdot |d_{mp}^- - r_{mp}| \quad (10)$$

Korak 6: izračunavanje rezultata.

Korak 7: U poslednjem koraku, TOPSIS rangiranje se određuje prema vrednosti rezultata [210-211].

### 5.2.3 METODA PROMETHEE

Koraci procedure PROMETHEE metode su [212]:

Korak 1: Napraviti matricu odlučivanja

Korak 2: Izračunavanje matrice odluke o normalizaciji koristeći korisne i beskorisne jednačine:

$$R_{ij} = \frac{[x_{ij} - (x_{ij})]}{[(x_{ij}) - (x_{ij})]} \quad (i= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

Gde je  $x_{ij}$  mera performansi  $i^{\text{th}}$  alternative u pogledu  $j^{\text{th}}$  kriterijuma i  $R_{ij}$  je normalizovana vrednost  $x_{ij}$ .

Za normalizaciju kriterijuma, prethodna jednačina se može napisati kao:

$$R_{ij} = \frac{[\max(x_{ij}) - x_{ij}]}{[(x_{ij}) - (x_{ij})]} \quad (12)$$

gde je  $n$ , broj kriterijuma za evaluaciju,  $(x_{ij})$  i  $(x_{ij})$  su minimalne i maksimalne vrednosti veličine  $(x_{ij})$ . Procedura normalizacije ne neophodna da bi se uveli bezdimenzioni kriterijumi koji su uporedivi. Posle normalizacije, sve vrednosti kriterijuma su između 0 i 1. U nekim slučajevima, može se usvojiti i delimična normalizacija [206-208].

Korak 2: izračunati procenu razlika i alternative u odnosu na druge alternative. Ovaj korak uključuje izračunavanje razlika u vrednostima kriterijuma između različitih alternativa u paru.

Korak 3: Izračunati funkcije preferencije,  $P_j(a, b)$  iako postoji šest tipova generalizovanih funkcija preferencija [216]. One su često zahtevale definisanje nekih parametara, kao što su indiferentnost i pragovi preferencija. Međutim, u aplikacijama u realnom vremenu, donosiocu odluka može biti teško da precizira koji oblik funkcije preferencije je pogodan za svaki kriterijum, kao i da odredi vrednosti uključenih parametara. Da bi se izbegao ovaj problem, ovde je usvojena pojednostavljena funkcija preferencije:

$$P_j(a, b) = 0 \text{ if } R_{aj} \leq R_{bj} \quad (13)$$

$$P_j(a, b) = (R_{aj} - R_{bj}) \text{ if } R_{aj} \geq R_{bj} \quad (14)$$

Korak 4: izračunati zbirnu funkciju preferencije uzimajući u obzir težinske kriterijume.

Funkcija zbirnih preferencija,  $\pi(a, b)$

$$= \left[ \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b) \right] / \sum_{j=1}^n w_j \quad (15)$$

Korak 5: Odrediti izlazne i ulazne tokove na sledeći način:

Ostavljanje (pozitivnog) toka za  $a$  alternativu,  $\varphi^+(a)$

$$= \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^n \pi(a, b) \quad (a \neq b) \quad (16)$$

Ostavljanje (negativnog) toka za alternativu,  $\varphi^-(a)$

$$= \frac{1}{m-1} \sum_{b=1}^n \pi(b, a) \quad (a \neq b) \quad (17)$$

Korak 6: Izračunati neto tok prestizanja za svaku alternativu.

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (18)$$

gde je  $\varphi(a)$  e neto vrednost toka nadmašivanja za alternativu  $a$ .

Korak 7: Rangiranje svih razmatranih alternativa u zavisnosti od vrednosti  $\varphi(a)$ , i određivanje najboljeg rešenja. Najbolja alternativa je ona koja ima najvišu vrednost  $\varphi(a)$ .

#### 5.2.4 WASPAS (WEIGHTED AGGREGATED SUM PRODUCT ASSESSMENT) METODA

1. Napraviti matricu odlučivanja

2. Izračunavanje matrice odlučivanja o normalizaciji koristeći poželjne i nepoželjne kriterijume:  $Nepoželjni = \frac{[(x_{ij})]}{[(x_{ij})]}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ )

(19)

Gde je  $x_{ij}$  je mera učinka  $i$ -te alternative u odnosu na  $j$ -ti kriterijum.

Za željene kriterijume, jednačina se može pisati na sledeći način:

$$Poželjni = \frac{[(x_{ij})]}{[(x_{ij})]} \quad (20)$$

Ova procedura normalizacije je neophodna da bi vrednosti kriterijuma bile bezdimenzionalne i uporedive. Nakon normalizacije, sve vrednosti kriterijuma treba da budu između 0 i 1. U nekim slučajevima može se primeniti i postupak delimične normalizacije [26].

3. Određivanje rezultata učinka prema:

$$A_i^{WSM} = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (21)$$

---

$w_j$ , težinski koeficijent svakog kriterijuma i  $x_{ij}$ , vrednost performanse

Metoda proizvoda težinskih koeficijenata je takođe zasnovana na težini svakog kriterijuma i vrednosti performansi

$$A_i^{WPM} = \prod_{j=1}^n x_{ij}^{w_j} \quad (22)$$

4. Računanje sabiranjem i množenjem.

5. Rangiranje materijala prema njihovoj oceni.

## 6. REZULTATI I DISKUSIJA

Deo 6.1 bavi se ispitivanjem pritiskivanjem Al pene sa zatvorenom poroznom strukturom. Ovakvo ispitivanje materijala ima za cilj određivanje mehaničkih karakteristika materijala kao što su napon i deformacija. Nakon toga izvršeno je numeričko modeliranje i simulacija pritisknog opterećenja aluminijske pene zatvorene strukture korišćenjem modela dobijenih putem kompjuterske tomografije (CT) [149, 153]. U poglavlju 6.2 prikazan je model zasnovan na CT skeniranju kako bi se sa velikom tačnošću od fizičkog modela digitalizacijom dobio 3D model koji će se koristiti u numeričkim simulacijama [121]. Za modeliranje otvorene porozne strukture odabran je Voronoi tessellation metod (VTM) jer je najpogodniji za generisanje strukture nepravilno raspoređenih otvorenih pora. Primenom ove metode mogu se analizirati različite varijante orijentacije praznine, debljine zida pora, nivoa poroznosti i debljine. Na kraju je ustanovljena korelacija između eksperimentalnih vrednosti i rezultata numeričke simulacije. U poglavlju 6.3, predstavljeni su rezultati dobijeni primenom nekoliko metoda višekriterijumske analize: TOPSIS, PROMETHEE, WASPAS i VIKOR (Višekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Rešenje) za odabir najboljeg materijala koji bi se primenio u kod izrade vagona.

### 6.1 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

#### 6.1.1 Ispitivanje ALUHAB pene jednoosnim pritiskivanjem

Uzorci ALUHAB metalne pene (slike 10, 13), (A, B, C) su isečeni iz istog bloka pene i podvrgnuti ispitivanju na jednoosno pritiskivanje. Eksperimentalno dobijeni rezultati daju vezu između opterećenja pritiskom-napona i deformacije [160]. Ispunjen uzorak (B) poseduje drugačije mehaničke karakteristike u odnosu na više porozne uzorke (uzorci A i C). Različiti uzorci A, B i C su isečeni iz istog bloka pene, ali raspodela pora, veličina pora i prečnik pora u strukturi pene nije isti za uzorke A, B, C zbog sečenja različitih delova masivnog uzorka aluminijske pene. Shodno tome, javlja se i različito mehaničko ponašanje. Za kasniju numeričku analizu korišćene su srednje vrednosti napona i deformacija. Opterećenje od 90 kN izazvalo je potpuni lom uzorka pri eksperimentalnom ispitivanju. U Tabeli 9 su prikazani različiti nivoi napona pri jednoosnom pritiskivanju. Tokom pritiskivanja primećeni su elastična zona, zona platoa, i zona zgušnjavanja. Utvrđeno je da je napon tečenja (početka velike deformacije) bio oko 20 MPa. Na 23 MPa kod svih uzoraka započinje zona platoa (stabilnog) napona uz stalno blago povećanje deformacije koja izaziva promenu napona, a početak zone zgušnjavanja uzorka počinje pri vrednostima napona od 35 MPa. Zona zgušnjavanja i značajno povećanje napona počinje na oko 52% deformacije uzorka, što odgovara rezultatima iz literature [85,95,122].

**Tabela 9.** Naponi u različitim zonama i raspored deformacija pri ispitivanju pritiskivanjem ALUHAB pene

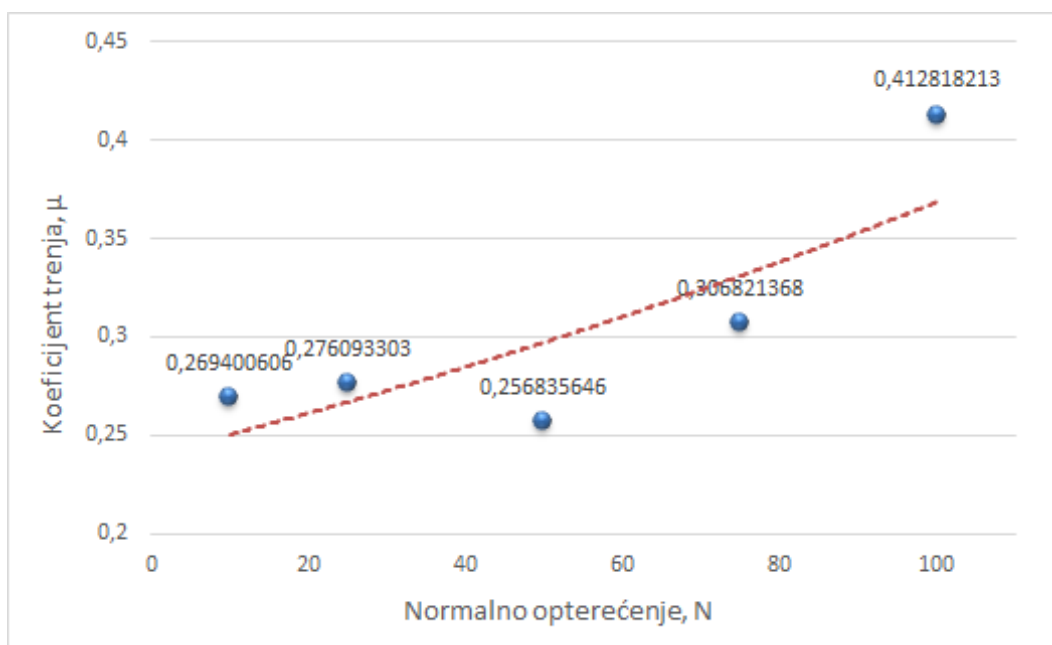
	Elastična zona	Zona platoa	Zona zgušnjavanja	Deformacija zgušnjavanja uzorka
Uzorak A	0–17 MPa	17–31 MPa	31–104 MPa	55%
Uzorak B	0–23 MPa	23–37 MPa	37–105 MPa	50%
Uzorak C	0–14 MPa	14–32 MPa	32–107 MPa	56%

### 6.1.2 Tribološka ispitivanja

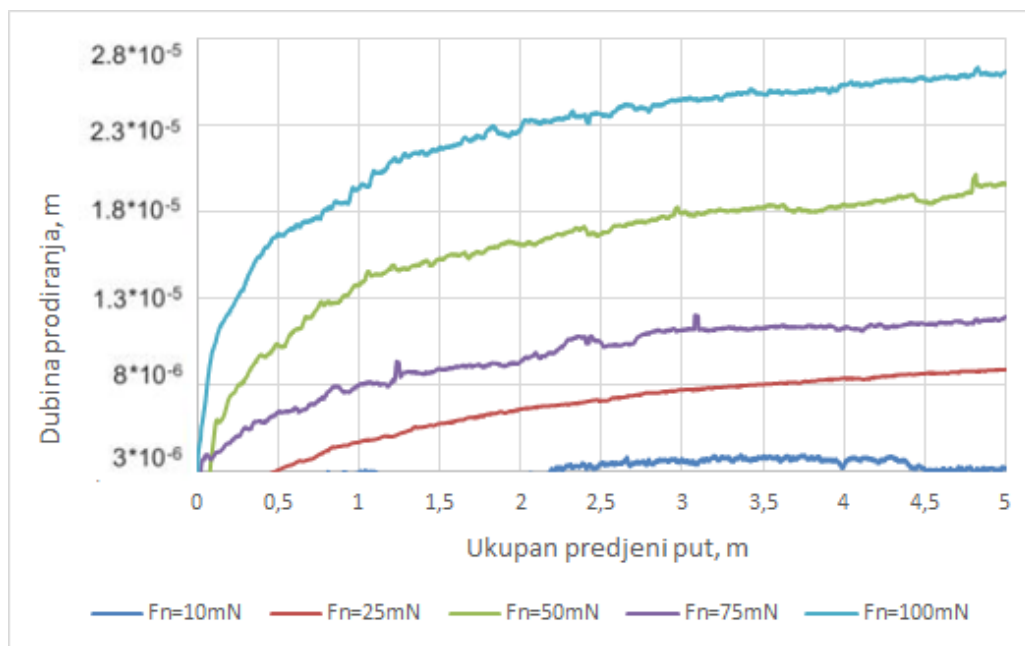
Za merenje sile trenja, najčešće korišćene metode se zasnivaju na senzorima merenja sile koji su dalje povezani sa elastičnim elementima koji mogu da zabeleže otklon kada se sila primeni [161]. Statički koeficijent trenja predstavlja trenje koje se suprotstavlja početku relativnog kretanja. Dinamički koeficijent trenja predstavlja trenje koje se suprotstavlja nastavku relativnog kretanja kada to kretanje započne. Eksperimentalni rezultati u ovoj doktorskoj tezi su pokazali da porozna struktura ima velika odstupanja koeficijenta trenja, odnosno malu ponovljivost rezultata kod testova na nanotribometru. Koeficijent trenja je pokazao velike varijacije u vrednostima pri različitim opterećenjima, od umerenog koeficijenta trenja (0,2 pri opterećenju od 100 mN) do veoma visokih vrednosti (1,4 pri opterećenju od 25 mN).

Pri veoma malim opterećenjima (10 mN) bilo je teško dobiti ponovljivost zbog uticaja poroznosti, a vrednosti koeficijenta trenja u ovom domenu zahtevaju dalja istraživanja pošto su u nekim ponovljenim ispitivanjima, pod istim opterećenjima dobijene izuzetno visoke vrednosti koeficijenta trenja. Može se reći (slika 18), da sa porastom normalne sile kuglice na površinu uzorka, povećava i koeficijent trenja. Za vrednosti normalne sile od 100mN, primećeno je veliko povećanje koeficijenta trenja. Ovo je uzrokovano visokom hrapavošću površine aluminijske pene, odnosno postojanjem pora.

Slika 19 prikazuje dubinu prodiranja u odnosu na put trenja kuglice tokom različitih uslova opterećenja. Na osnovu slike 19 može se zaključiti da je sa povećanjem normalne sile dubina prodiranja počela da raste. Može se primetiti da je u slučaju opterećenja od 75 mN dubina prodiranja manja nego za opterećenje od 50 mN. Ova pojava je verovatno nastala usled nehomogenosti površine poroznog materijala.



*Slika 18. Koeficijent trenja u odnosu na različita normalna opterećenja*



*Slika 19. Dubina prodiranja u zavisnosti od broja ciklusa tokom različitih uslova opterećenja*

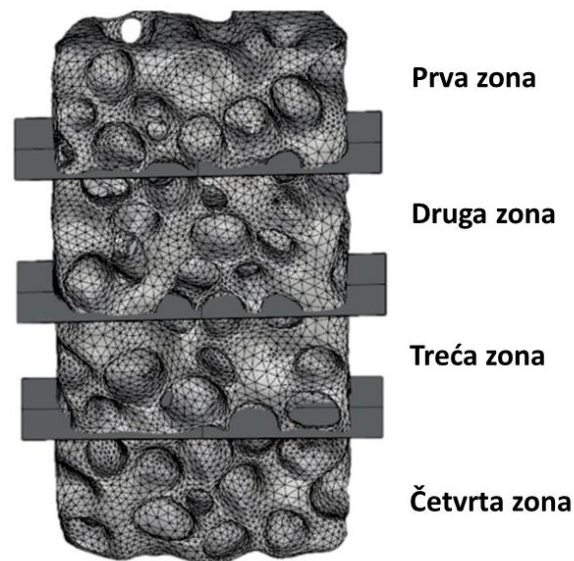
Ova varijacija u rezultatima je posledica uticaja geometrije strukture i razlike u kontaktu uzrokovanih razlikama svojstava porozne strukture (velika promena hrapavosti površine). Topološka nehomogenost ima značajan uticaj na rezultate.

## 6.2 REZULTATI NUMERIČKOG MODELIRANJA

### 6.2.1 Struktura zatvorenih pora

Za analizu metodom konačnih elemenata korišćen je 3D model generisan iz CT skeniranih slika [160]. Na uzorak su primenjeni granični uslovi za ispitivanje deformacije uzorka pritiskivanjem. Radi boljeg razumevanja, na slici 20 je prikazan deo uzorka korišćenog za numeričku analizu podeljenog ravnima upravno na osu opterećenja. Slika 21 predstavlja konturu nelinearnog normalnog naprezanja u pravcu opterećenja po y osi. Slika 22 pokazuje da se javljaju i pritiska i zatezna deformacija, iz čega se može zaključiti da smicanje ima uticaj. U poređenju sa zonama sa većim porama u uzorku, pokazano je da zone sa većim porama imaju manju otpornost na pritisno opterećenje što je u skladu sa očekivanjem. Tokom dužeg vremenskog perioda, zone sa većim porama su pokazale veću izdržljivost na pritisno opterećenje bez potpunog popuštanja i zgušnjavanja. Za zone sa većim porama karakteristični su pritisni naponi, dok su kod zona sa malim i tankim zidovima prisutni zatezni naponi.

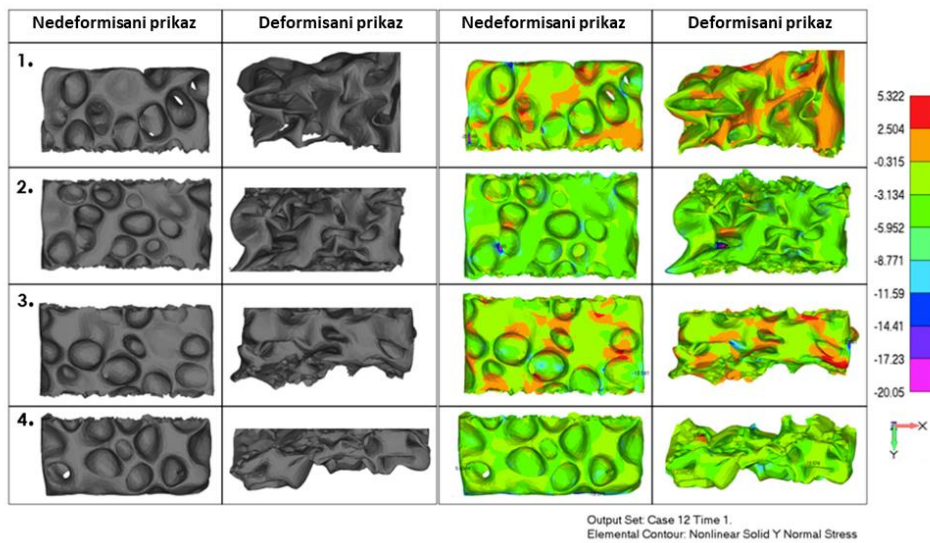




*Slika 20. Podela modela numeričkog uzorka zatvorene porozne strukture u četiri zone za analizu napona u zapreminskom modelu*

Tokom numeričke simulacije pojavila se neravnomerna raspodela napona. Pregled literature takođe sugeriše da je teško postići ujednačenu raspodelu veličina pora, što se dešava zbog načina proizvodnje. Naime, velike pore, tokom proizvodnje, imaju tendenciju da se skupljaju oko centralnih zona. U slučaju ALUHAB uzorka dobijeni su kontradiktorni rezultati podacima iz literature jer je uočena konstantna ujednačenost raspodele šupljina po kompletnoj strukturi. Za bolje razumevanje ponašanja deformacija struktura se deli na dve celine, jednu koja uključuje samo geometrijski deo i drugu koji se odnosi na konturu napona kao što je prikazano na slici 21. Ovo se takođe može potvrditi eksperimentalnim krivama napon-deformacija u eksperimentalnom preseku, gde se može izvesti mala razlika u ponašanju samo jednog uzorka (A).

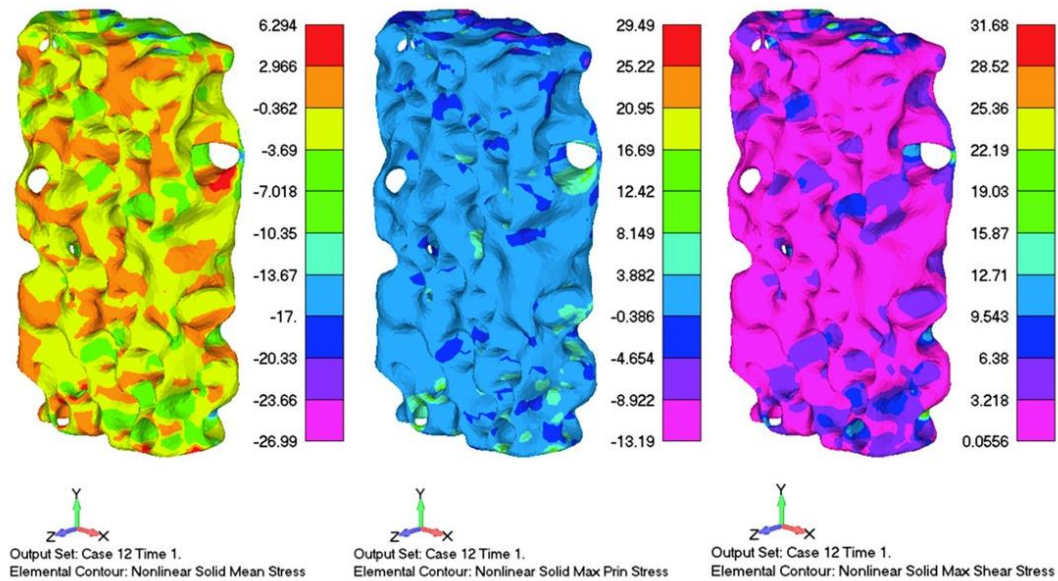
Na slici 22. (Krajnja desna kolona), tanki zidovi pora i debeli ligamenti pora predstavljeni su kao istaknuta mesta koncentracije zateznih i pritisnih napona. To dalje implicira da pri pojavi tečenja i smicanja govorimo o topološkoj heterogenosti kao glavnom uzročniku, što je u skladu sa literaturom [121]. Linul i dr. [214], su pokazali da je ponašanje pene sa zatvorenim porama pod pritisnim opterećenjem regulisano anizotropijom. Poznato je da anizotropija pene utiče na tačku popuštanja, kraj platoa i početak zone zgušnjavanja [214]. U eksperimentalnim testovima u ovom radu, u uslovima pritisnog opterećenja, konture napona uzorka numeričkog modela, kao što je prikazano na slici 23, predstavljaju primer kompleksnih polja napona unutar uzorka.



**Slika 21.** Nedeformisani uzorak i deformisani uzorak sa zatvorenom poroznom strukturom primenom FEA. Leva strana prikazuje geometrijski model numeričkog uzorka dok desna strana prikazuje konturu napona u pravcu opterećenja (y-osa)

Kod debelih zidova gotovo da nema smicanja, dok kod tankih zidova postoji visok nivo smicajnog napona. U slučaju da su šupljine bile pozicionirane blizu površine, u zidovima dolazi do istovremenog složenog naprezanja pritiskivanjem i zatezanjem. Ravnomerno raspoređene zone čvrstog materijala sa manjim šupljinama daju prihvatljive vrednosti napona u odnosu na karakteristike materijala. Prema Edvin Raj et al. [117] pokazalo se da su tanki ćelijski zidovi skloniji pucanju, dok deblji ćelijski zidovi gube oblik i bivaju deformisani savijanjem, pod opterećenjem. Von Mises-ovi naponi u pravcima x, y, z i duž ravni smicanja (xy, yz, zx), kao i maksimalni glavni napon, maksimalni smičući napon i maksimalni srednji napon, kao funkcija deformacije, dati su na slici 23.

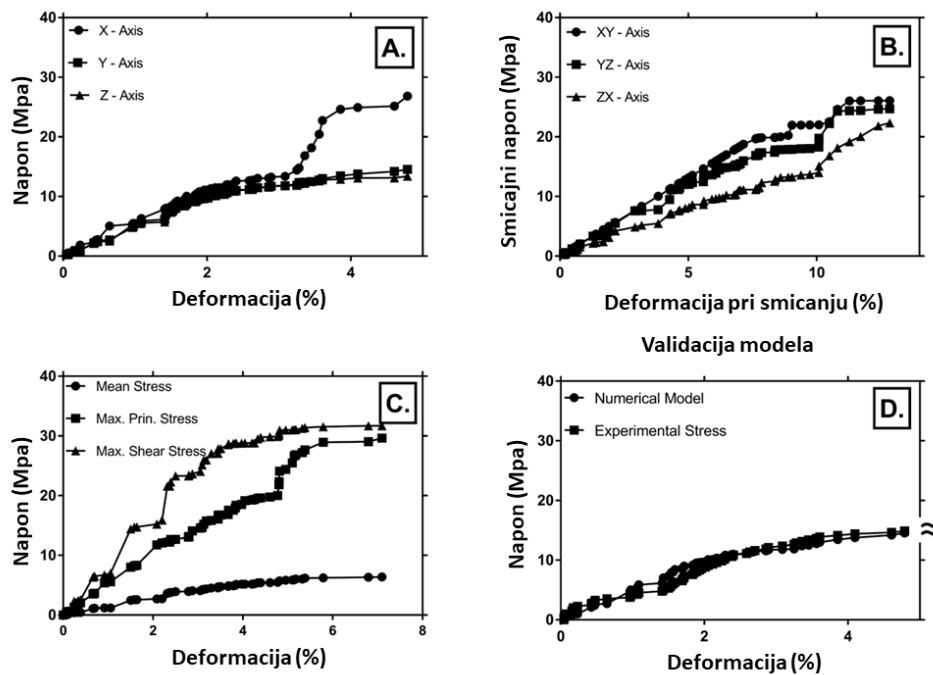
Poređenja između rezultata eksperimentalnog istraživanja i rezultata numeričkog modeliranja prikazana su na slici 23 (D). Sa slike 23 (C), na osnovu eksperimentalnih rezultata predstavljenih u eksperimentalnom delu, došlo je do napona tečenja za vrednost deformacije od 5 %, dok oblast platoa započinje na približno 7 % deformacije. kako se pri simulaciji koriste oblasti malih deformacija (< 10%) u numeričkom modelu uzorak nije postigao potpunu deformaciju. Za modeliranje oblasti zgušnjavanja bio bi potreban drugačiji model, kao što su pokazali drugi autori [95].



*Slika 22. Konture napona numeričkog modela opterećenog pritiskivanjem: Nelinearni čvrsti srednji napon (levo); nelinearni čvrsti maksimalni smičući napon (centar); i nelinearni čvrsti maksimalni glavni napon (desno)*

Sa slike 23 (A) i (B), smicanje pokazuje značajnu ulogu pri deformaciji uzorka i pokazuje pomeranje duž ravni  $xy$  i  $yz$ . Uzdužni napon u pravcu  $x$ -ose pokazuje brzo povećanje vrednosti napona za 3,5%–5% deformacije, u poređenju sa naponom na  $y$  i  $z$  osi (Sl. 23 (A)) Kako je povećan broj šupljina i tankih struktura (zidova) u  $x$ -smeru, došlo je do brzog popuštanja pod opterećenjem. Dobijeni rezultati odgovaraju rezultatima prikazanim u [95,117], koji su pokazali da urušavanje i napon platoa imaju međusobnu zavisnost u odnosu na brzinu deformacije. Tanki zidovi i veći broj šupljina umanjuju ukupnu čvrstoću uzorka što dalje izaziva lokalizovano drobljenje i urušavanje pora. Krive napon-deformacija na slici 23 (C) imaju oscilirajuće vrednosti napona, što ukazuje na lomove ćelijskih zidova gde napon raste i opada, pa se uočavaju napon smicanja i maksimalni glavni napon.

Prema literaturi [215], kod pritisknih testova uzoraka sa visokom poroznosti dobijaju se oscilirajuće vrednosti krive napon–deformacija sa lokalizovanim vrhovima, usled oslobađanja napona nakon lokalizovanog preloma zidova pora, dok su aluminijumske pene niske poroznosti definisane glatkim krivama. Takođe je pokazano da je povećanje poroznosti dovelo do smanjenja granice tečenja [215]. Ovako izvedena validacija modela ilustruje prihvatljivo slaganje između eksperimentalnih i numeričkih rezultata kao što je prikazano na slici 23 (D), unutar linearne elastične zone.

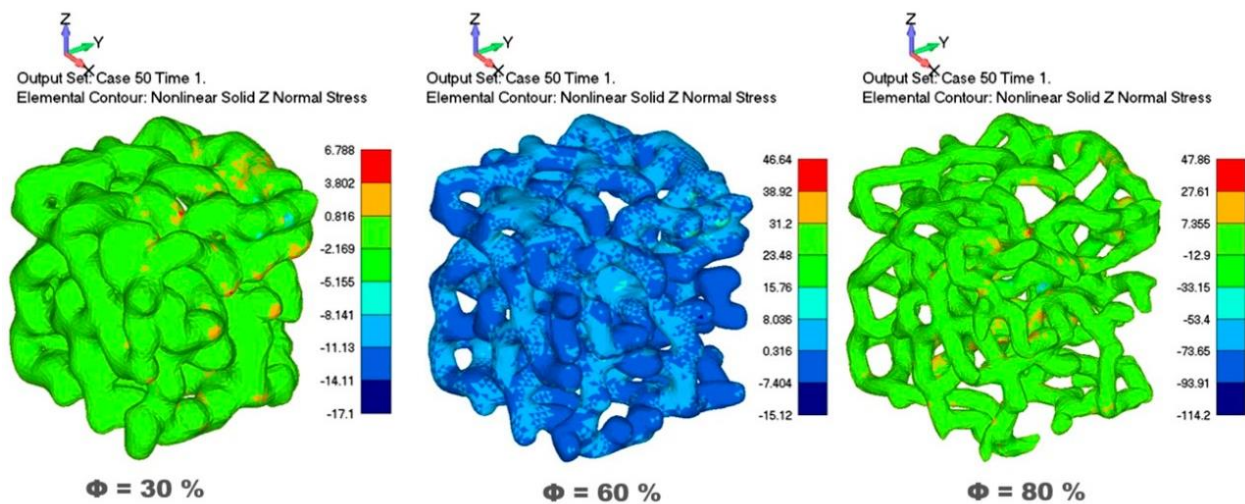


*Slika 23. Krive napon–deformacija za numerički model: (A) naponi u pravcima x-, y- i z-ose kao funkcija deformacije; (B) naponi smicanja u pravcima xy, yz i zx kao funkcija deformacije; (C) maksimalni glavni napon, maksimalni smičući napon i maksimalni srednji napon, kao funkcija deformacije; (D) poređenje krive napon–deformacija u slučaju eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja*

## 6.2.2 Otvorena porozna struktura

Za razvoj numeričkog modela aluminijske pene otvorene poroznosti korišćen je Voronoi algoritam. Simulacija je izvršena korišćenjem istih graničnih uslova kao u eksperimentima a kao materijalni model primenjen je elasto-plastični model. Proučavan je efekat uticaja različitih stepena poroznosti tokom ispitivanja pritiskivanjem. Pri simulaciji korišćen je uslov zadatih pomeranja/deformacije kako bi se omogućilo simuliranje u oblasti malih deformacija, ograničeno na manje od 10%, dok je primenjeno opterećenje bilo 20 N u svim numeričkim procenama. Von Mises-ov napon se javlja duž osa i u smicajnim ravnima. Takođe, srednji napon, napon smicanja i maksimalni napon određeni su za tri različite poroznosti (30%, 60%, 80%), u funkciji deformacije. Veza između vrednosti napona i poroznosti pokazuje da modeli veće poroznosti pokazuju suštinski veće napone u normalnim smerovima, kao što je prikazano na slici 24. Kako modeli veće poroznosti poseduju veće šupljine dolazi do većeg skraćivanja uzorka i pomeranja zidova pora pod sličnim pritisnim opterećenjem. Sabijanjem uzorka, uzorak je u velikoj meri skraćen, što je uticalo na pomeranje, savijanje i istežanje zidova, kao što je bio slučaj kod uzorka sa 80% poroznosti. Kriva Von Mises-ovog napona na slici 24 pokazuje koncentraciju napona u nekim zonama.

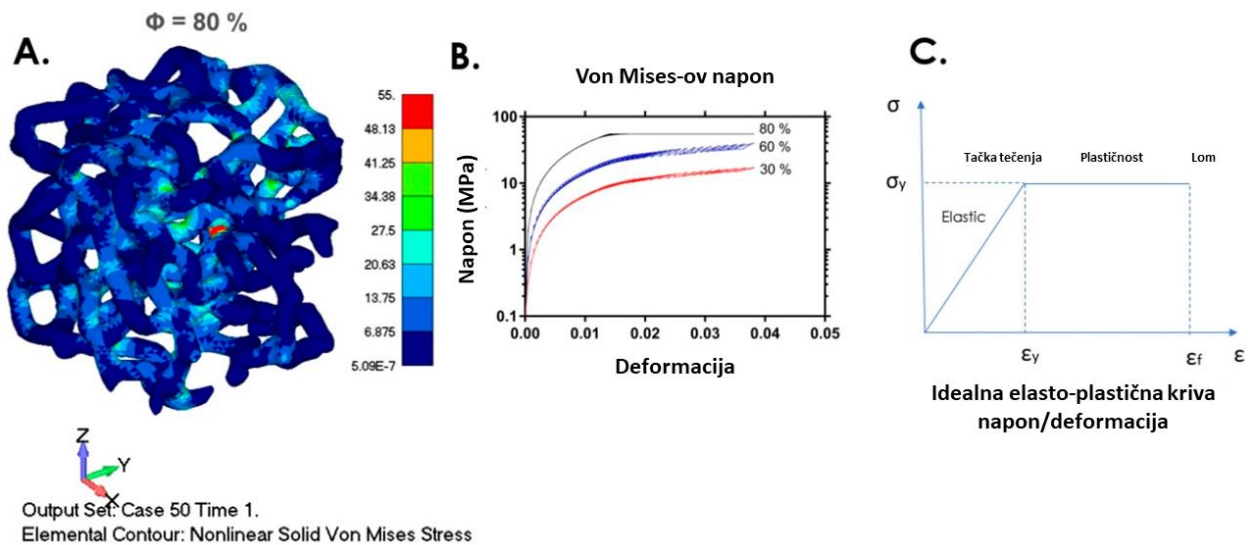




**Slika 24.** Konture Von Mises-ovog napona u smeru ispitivanja za tri različite poroznosti pod jednoosnim ravnomerno primenjenim opterećenjem

Rezultati simulacije su pokazali da je smanjenje čvrstoće pene uzrokovano povećanjem poroznosti, što je u skladu sa [49,72,79,80]. Numeričke simulacije rađene su sa zadatim silama. Pored toga, poroznost može biti u korelaciji sa brojem šupljina, što znači da su porozniji uzorci imali manju ukupnu površinu podvrgnutu opterećenju. Povećanjem poroznosti smanjuje se kontaktna površina, što dovodi do bržeg porasta napona, dostizanja napona tečenja i krajnjeg napona usled smanjene čvrstoće pene. Veća poroznost stvara veći napon u kontaktu, dok manja poroznost stvara veći napon u uzorku. Koristeći pene na bazi alkali, Zhou et al. [79] je pokazao da glavni mehanizmi deformacije nastaju plastičnim savijanjem zidova, što je u skladu sa eksperimentalnim i numeričkim analizama u ovoj doktorskoj disertaciji. Slika 26. prikazuje Von Mises-ovu naponsku konturu zida pore, sa vidljivim područjima napona, posebno u slučaju poroznosti od 80%, što ukazuje na velike plastične deformacije, kao što je prikazano na slici 24. što je u skladu sa rezultatima drugih autora [79].

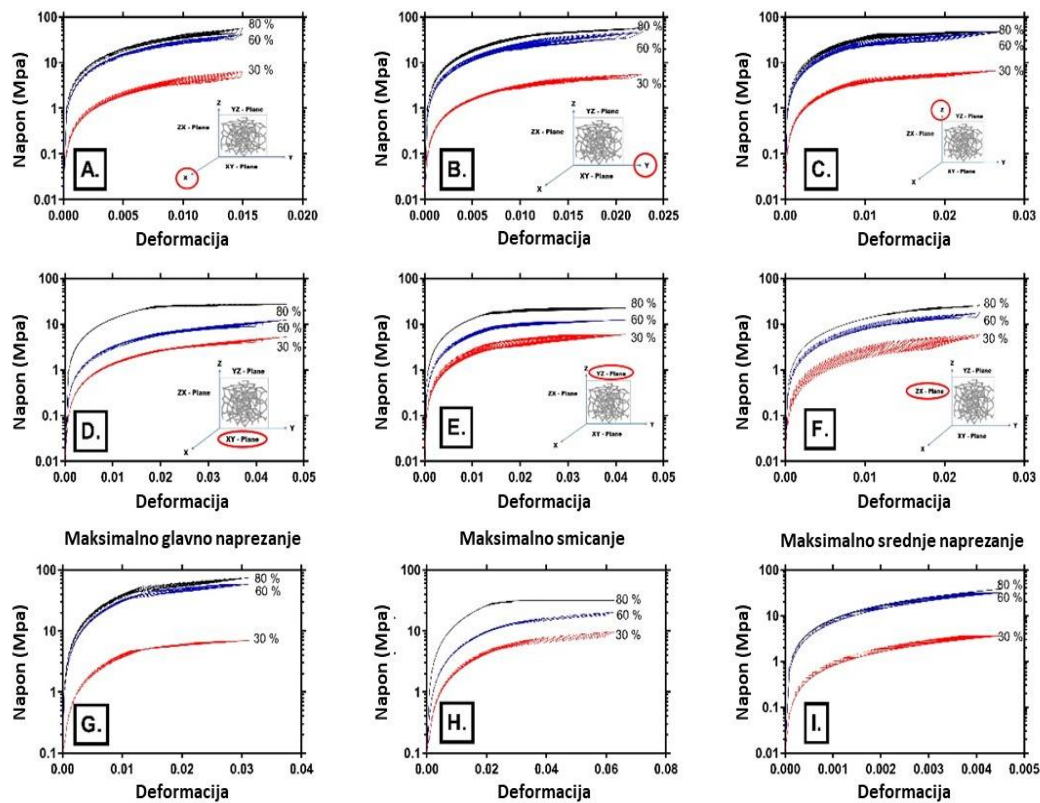
Složeno polje napona se vidi u nekim zonama zidova zbog istovremenog prisustva zateznog napona. Shunmugasami i Mansoor [80] su takođe sugerisali da se pojedinačni zidovi mogu savijati, zatezati i smicati usled plastične deformacije. U tim istraživanjima, kod velikih deformacija, analiza mehaničkog odziva aluminijumske pene na različite brzine deformacija pokazala je zavisnost od veličine opterećenja: linearna elastična deformacija pri niskim nivoima opterećenja i plastično popuštanje i veliki nivoi napona pri visokim nivoima opterećenja. Utvrđeno je da deformacija izaziva otvrdnjavanje. U drugom radu [74] su posmatrali interakcije među zidovima pora koje su počele od oko 10% deformacije. U ovoj doktorskoj tezi su posmatrane male deformacije, pa bi one predstavljale dopunu ovim istraživanjima kod velikih deformacija. Stoga je struktura materijala modelirana kao plastični materijal bez ojačavanja, na osnovu fon Von Mises-ovog napona. Na slici 25, prikazani su Von Misesovi naponi kod strukture sa 80% poroznosti i odgovarajuće krive napona i deformacija.



**Slika 25.** Kontura Von Mises-ovog napona, uzorak sa 80% poroznosti; (B) kriva napon–deformacija, log oblik; (C) idealna kriva elasto-plastični napon-deformacija

Složeno polje napona kom zidovi podležu kada se podvrgnu pritiskivanju rezultira naponom koje je rezultat istovremenog delovanja normalnog napona i smicajnog napona. Prema rezultatima u ovoj tezi, na mehanizam loma zidova uticao je smicajni napon. Zidovi kod strukture sa 80% i 60% poroznosti bile su izložene složenim spregnutim efektima opterećenja na pritisak i zatezanje koji su delovali unutar različitih regiona zidova. Kao što je prikazano na slici 26., Von Mises-ovi naponi u tri različita smera (x, y, z), duž ravni smicanja (xy, yz, xz), kao i maksimalni, smičući i srednji naponi su izvedeni za tri različite poroznosti (30%, 60%, 80%). Poroznost od 30% bila je povezana sa značajno nižim nivoom napona u uzorcima. Kako se poroznost povećavala (30%, 60%, 80%), napon platoa se povećavao. Rezultati koje su pokazali Shunmugasami i Mansoor [80] bili su slični našim, pokazujući da povećanje poroznosti (7%, 9% i 42%) izaziva napon platoa.

Korišćenjem Alulight pene pod velikim naprezanjem i Duocel pene u obliku tetrakaidekaedra, Deshpande i Fleck nisu pokazali značajne razlike u dinamičkim rezultatima u poređenju sa njihovim kvazistatičkim rezultatima, kao što se očekivalo. Njihovi testovi su pokazali da na napon platoa ne utiče brzina deformacije ispod brzine deformacije od  $5000 \text{ s}^{-1}$ . Kao što je prikazano na slici 26., isključili smo ojačanje u našim simulacijama, a rezultujuće krive napon–deformacija bile su u skladu sa eksperimentalnim rezultatima [49,79–81] pod dva različita uslova: linearno-elastičnim i platoon. Na slici 26. postoje skoro ravni platoi napona, što ukazuje kod ovog modela nije došlo do ojačanja. Eksperimentalni rezultati poput onih prikazanih u [80] ukazuju da je naš model validan u kvazistatičkim uslovima; međutim, da bi se uzelo u obzir realistično dinamičko ponašanje izvan ograničenja ovog modela, potrebna su dodatna prilagođavanja, kao što je modeliranje na više nivoa.



**Slika 26.** Krive napon–deformacija za tri različite poroznosti (30, 60, 80%): (A–C) naponi u pravcima  $x$ -,  $y$ - i  $z$ -ose kao funkcija deformacije, respektivno; (D–F) smicajni naponi u pravcima  $xy$ ,  $yz$  i  $xz$  kao funkcija deformacije; (G–I) maksimalno glavno naprezanje, maksimalno smicanje i maksimalno srednje naprezanje, kao funkcija deformacije, respektivno

U određenoj meri, plato nominalnog napona je bio osetljiv na promene u poroznosti u našem modelu. Na slici 26 (A) može se videti da su za aksijalna naprezanja sa opterećenjem u pravcu  $z$ -ose platoi napona skoro identični za 60% i 80%. Kada se poroznost modela poveća, defekti u njegovoj mikrostrukturi i lokalno popuštanje će najverovatnije biti brzo izazvani. Dodatni dokazi za ovo mogu se dobiti na slici 26. Ovi rezultati pokazuju mehanizam deformacije visoko poroznih struktura (60% i 80% poroznosti). U takvom slučaju, podupirači bi se savijali ili smicali kao rezultat deformacije, kao što je objašnjeno u [80]. Deshpande i Fleck [81] su takođe predložili da na plateau napona ne utiče naprezanje ispod određene brzine deformacije.

Bilo je pokušaja da se naprave modeli metode konačnih elemenata poroznih struktura koristeći oblik tetrakaidekredra [216] ili izduženog tetrakaidekredra [217]. Kada je geometrija zida bila slična Kelvinovim porama, dobijeno je slaganje sa eksperimentalnim podacima [216, 221]. Analizom eksperimentalnih podataka, Jiang et al. [216] je razvio numeričke modele zasnovane na Kelvinovim porama na osnovu ispitivanja aluminijumske pene (relativne gustine od približno 8%). Naša simulacija krive naprezanje-deformacija u linearnom elastičnom području odgovarala je obliku onih u njihovim testovima. Na osnovu Kelvinovih pora korišćenih u njihovom modelu, njihov numerički model je takođe pokazao slaganje sa eksperimentalnim ispitivanjem na pritiskivanje, do određenog graničnog napona, a

takođe su analizirali ponašanje 3D numeričkog modela na pritisak. Kao deo teorijskog modela za anizotropno mehaničko ponašanje pene otvorene porozne strukture, Sullivan et al. [217] je ispitivao uticaj dodatnog parametra oblika (izduženi tetraikadekedar). Pored modeliranja na više skala, drugi autori predlažu uključivanje uticaja mikrostrukturnih heterogenosti pene kako bi se obezbedilo potpuno poklapanje eksperimentalnih i numeričkih analiza, što bi predstavljalo dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Zasnovano na Voronoi (VTM) metodi, naš numerički model, zasnovan na linearnoj elastičnoj oblasti (u zoni do 10% deformacije) i pokazao je dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Prednost Voronoi algoritma je u tome što je, kada se kod primeni, jednostavno je podesiti uticajne parametre (raspored šupljina, debljina zidova, nivo poroznosti, gustina) i videti kakvi su efekti na mehaničko ponašanje.

### **6.3 IZBOR MATERIJALA PRIMENOM VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE**

U ovom poglavlju, izbor materijala za lake vagone je izvršen korišćenjem metode procene PROMETHEE, TOPSIS, VIKOR i WASPAS. Oni su jednostavan i lako razumljiv alat u poređenju sa drugim popularnim MCDM tehnikama, kao što su Fuzzi AHP, ANP u pogledu složenosti modela, vremena pravljenja modela, vremena računanja, transparentnosti, itd. Za svaku pojedinačnu primenu, poželjno je odabrati optimalni materijal. Karakteristike kao što su visoka zatezna čvrstoća, niska cena, dobra otpornost na koroziju, visoka vrednost napona tečenja i zatezne čvrstoće, itd. su važna za razmatranje sa stanovišta materijala za železničke vagone. Problem koji se razmatra u tezi odnosi se na pronalaženje najboljeg materijala za lake vagone od nekoliko dostupnih materijala. Posmatrano je šest različitih kriterijuma: gustina, granica tečenja, zatezna čvrstoća, odnos granice tečenja/zatezne čvrstoće, modul elastičnosti, cena i otpornost na koroziju.

Da bi se izvršila detaljna analiza relativnih performansi razmatranih MCDM metodama u odnosu na različite karakteristike modela, koriste se različite skale subjektivnog prosuđivanja. Gustina materijala i cena se smatraju manje uticajnim faktorima, dok se granica tečenja, zatezna čvrstoća, I.S/T.S, otpornost na koroziju, Jangov modul smatraju faktorima sa višim uticajem. Neke karakteristike materijala imaju određene kvantitativne vrednosti (npr. granica tečenja), dok se kod drugih (npr. otpornost na koroziju) dodeljuju koeficijenti (1 – loše, 2 – prosečno, 3 – dobro), za procenu umesto kvalitativnih vrednosti performansi. Odgovarajuće karakteristike potencijalnog materijala za industriju lakih vagona date su u tabeli 10. Njima se dodeljuju oznake P1-P2-P3-P4-P5-P6-P7 za gustinu, napon tečenja, zateznu čvrstoću, odnosa I.S/T/S, Jangov modul, cenu, otpornost na koroziju. Dostupni inženjerski materijali koji će kroz analizu biti poređeni su tri vrste čelika: Dual Phase, DP 600, Transformation Induced Plasticity (TRIP 700), Twinning Induced Plasticity (TWIP), i tri vrste aluminijuma: aluminijum (Al 6005 – T6), aluminijum (Al 6082 – T6), porozna struktura (Al – zatvorena čelijska struktura) i oni su označeni su kao M1-M2-M3-M4-M5-M6, kao što je prikazano u tabeli 11. Većina vrednosti prikazanih u delu statističkog modeliranja prikupljene su od dobavljača čelika i iz literature. Hemijski sastav različitih AHSS čelika i aluminijuma prikazan je prethodno u delu statističkog modeliranja. Izbor pravog materijala koji ima



adekvatne osobine je prilično zahtevan zadatak. Kako je čvrstoća jedan od ključnih materijalnih karakteristika za primenu u šinskoj industriji, veća čvrstoća znači veću nosivost u različitim radnim uslovima. Zatezna čvrstoća obezbeđuje otpornost materijala na lom pod opterećenjem. Vrednosti zatezne čvrstoće treba da budu što je moguće veće. Granica tečenja je vrednost napona u kojoj počinje plastična deformacija. Jangov modul opisuje sposobnost materijala da izdrži promene dužine pod zatezanjem ili sabijanjem bez plastičnih deformacija. Često se naziva jednostavno modul elastičnosti i njegova vrednost treba da bude što veća. S druge strane, vagoni su izloženi okolnoj atmosferi, tako da bi materijal koji ima veću otpornost na koroziju bio bolji izbor. Još jedan važan kriterijum koji treba uzeti u obzir tokom procesa odabira materijala je ukupna cena, stoga cena materijala treba da bude što niža.

**Tabela 10.** Osobine materijala za lake vagone

Osobine materijala	Oznaka
Gustina ( $\text{kg/m}^3$ )	P <sub>1</sub>
Napon tečenja (Y.S), MPa	P <sub>2</sub>
Zatezna čvrstoća (T.S), MPa	P <sub>3</sub>
Y.S/T.S odnos	P <sub>4</sub>
Jangov modul elastičnosti (Y.M), (GPa)	P <sub>5</sub>
Cena US \$ / kg	P <sub>6</sub>
Otpornost na koroziju (C.R.)	P <sub>7</sub>

**Tabela 11.** Inženjerski materijali koji su u primeni za izradu elemenata železničkih vagona

Inženjerski materijali	Oznaka
Dual Phase, DP 600	M <sub>1</sub>
Transformation Induced Plasticity, TRIP 700	M <sub>2</sub>
Twinning Induced Plasticity, TWIP	M <sub>3</sub>
Aluminijum, Al 6005 – T6	M <sub>4</sub>
Aluminijum, Al 6082 – T6	M <sub>5</sub>
porozna struktura (Al – zatvorena ćelijska struktura)	M <sub>6</sub>

### 6.3.1 VIKOR metoda

Prve pretpostavke koje se razmatraju tokom VIKOR algoritamskih koraka bile su slične TOPSIS-u. Oni se određuju na osnovu kriterijuma koji nisu korisni (poželjna je niža vrednost) i korisnih kriterijuma (poželjna je veća vrednost). Dalji koraci se sastoje od pronalaženja najbolje i najgore vrednosti za svaki kriterijum. Za željene kriterijume, maksimalna vrednost je najbolja, a minimalna vrednost je najgora. Za kriterijume koji su nepoželjni, minimalna vrednost je najbolja, a maksimalna vrednost je najgora. Oni su dodeljeni i izračunati na osnovu jednačina datih u prethodnom poglavlju. Dobijena matrica odlučivanja predstavljena je u tabeli 12.  $S_j$ ,  $R_j$  i  $Q_j$  predstavljaju uticajne parametre i VIKOR indeks, a prema jednačinama (2), (3) i (4) i prikazane su u tabeli 13. Rezultati VIKOR analize pokazuju da se materijal M4 (Aluminijum (Al 6005 – T6)) može smatrati prvim izborom od svih ostalih ovde posmatranih materijala.

**Tabela 12.** Normalizacija matrice vrednovanja (Matrica izbora)

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	0.200	0.047	0.015	0.160	0.000	0.000	0.3000
M <sub>2</sub>	0.200	0.032	0.010	0.200	0.000	0.000	0.3000
M <sub>3</sub>	0.200	0.000	0.000	0.075	0.000	0.001	0.3000
M <sub>4</sub>	0.048	0.070	0.038	0.000	0.070	0.001	0.0000
M <sub>5</sub>	0.048	0.068	0.036	0.010	0.069	0.001	0.0000
M <sub>6</sub>	0.000	0.100	0.050	0.120	0.100	0.050	0.000

**Tabela 13.** Vrednosti S<sub>j</sub>, R<sub>j</sub> and Q<sub>j</sub> (mera korisnosti, meru beskorisnosti i VIKOR indeks)

	S <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>	Q <sub>i</sub>	Ranking
M <sub>1</sub>	0.7220	0.3000	0.9808	5
M <sub>2</sub>	0.7418	0.3000	1.0000	6
M <sub>3</sub>	0.5760	0.3000	0.8389	4
M <sub>4</sub>	0.2274	0.0699	0.0015	1
M <sub>5</sub>	0.2329	0.0691	0.0054	2
M <sub>6</sub>	0.4200	0.1200	0.2973	3

### 6.3.2 TOPSIS metoda

Ovaj metod se zasniva na konceptu da najbolja alternativa treba da ima najkraću udaljenost (Euklidsko rastojanje od idealnih rešenja). Matrica odlučivanja i normalizovana matrica odluke dobijaju se korišćenjem jednačine [5] i [6]. Dobijena normalizovana vrednost matrice odlučivanja korišćenjem procedure linearne normalizacije prikazana je u tabeli 14. Ponderisana normalizovana matrica sa pozitivnim idealnim rešenjem i negativnim idealnim rešenjima prikazana je u tabeli 15. Izračunate su na osnovu nepoželjnih kriterijuma (poželjna je niža vrednost) i korisnih kriterijuma (poželjna je veća vrednost) kao što je prikazano u jednačini [7] i [8]. Cena i gustina se smatraju manje korisnim, dok su granica tečenja, zatezna čvrstoća, odnos granica tečenja/zatezne čvrstoće, Jangov modul i otpornost na koroziju korišćeni kao korisni kriterijumi. Euklidsko rastojanje od pozitivnog idealnog rešenja (PIS),  $d_{mp}^+$  i negativnog idealnog rešenja (NIS),  $d_{mp}^-$  računa se pomoću jednačina [9] i [10]. Dobijene vrednosti iz proračuna euklidskog rastojanja prikazane su u tabeli 16. Nakon toga, rezultat je procenjen korišćenjem Euklidske udaljenosti od negativnog rešenja podeljenog zbirom pozitivnog idealnog rešenja (PIS),  $d_{mp}^+$  i negativnog idealnog rešenja (NIS),  $d_{mp}^-$ .

Konačna ocena rangiranja TOPSIS metodom predstavljena je u tabeli 17. Viša ocena učinka smatra se boljom vrednošću u tabeli za rangiranje, dok je niža ocena označavala manje kompetentan materijal među svim dostupnim materijalima. TOPSIS rangiranje na osnovu rezultata učinka pokazuje nam M1-M2-M3-M4-M5-M6 u 6-5-4-2-1-3 formatu. To znači da se aluminijum, AL 6082-T6 označen kao M5, pokazao kao najbolji materijal među svim dostupnim materijalima. To je postignuto zahvaljujući pristupačnoj ceni i boljoj otpornosti na koroziju u odnosu na ostale dostupne materijale.

**Tabela 14.** Normalizacija matrice odlučivanja

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	64802500	168100	490000	0.34	40000	0.30	1
M <sub>2</sub>	64802500	270400	640000	0.25	40000	0.30	1
M <sub>3</sub>	64802500	562500	1000000	1	40000	2	1
M <sub>4</sub>	7290000	57600	67600	1	4761	4	9
M <sub>5</sub>	7290000	62500	96100	1	4900	4	9
M <sub>6</sub>	1000000	400	900	0.44	144	2116	9
Total	14490.95	1059.01	1514.79	1.78	360.28	46.11	5.48

**Tabela 15.** Izračunavanje ponderisane normalizovane matrice odluke (sa idealnom najboljom/najgorom vrednošću)

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	0.11	0.04	0.02	0.07	0.06	0.00	0.05
M <sub>2</sub>	0.11	0.05	0.03	0.06	0.06	0.00	0.05
M <sub>3</sub>	0.11	0.07	0.03	0.08	0.06	0.00	0.05
M <sub>4</sub>	0.04	0.02	0.01	0.10	0.02	0.00	0.16
M <sub>5</sub>	0.04	0.02	0.01	0.10	0.02	0.00	0.16
M <sub>6</sub>	0.01	0.00	0.00	0.07	0.00	0.05	0.16
Ideal Best	0.0138	0.0708	0.0330	0.1011	0.0555	0.0006	0.1643
Ideal worst	0.1111	0.0019	0.0010	0.0562	0.0033	0.0499	0.0548

**Tabela 16.** Euklidska udaljenost od idealne najbolje (pozitivne) i najgore (negativne) vrednosti

	Idealno najbolje	Idealno najgore	Zbir
M <sub>1</sub>	0.1546	0.0841	0.2387
M <sub>2</sub>	0.1549	0.0896	0.2445
M <sub>3</sub>	0.1475	0.1078	0.2553
M <sub>4</sub>	0.0692	0.1500	0.2192
M <sub>5</sub>	0.0679	0.1496	0.2175
M <sub>6</sub>	0.1080	0.1476	0.2556

**Tabela 17.** Konačno rangiranje materijala prema rezultatu kalkulacije

	Performansa	Rangiranje
M <sub>1</sub>	0.3525	6
M <sub>2</sub>	0.3664	5
M <sub>3</sub>	0.4222	4
M <sub>4</sub>	0.6843	2
M <sub>5</sub>	0.6879	1
M <sub>6</sub>	0.5776	3

### 6.3.3 PROMETHEE metoda

PROMETHEE metoda je dizajnirana uglavnom za kvantitativne kao i za kvalitativne kriterijume [p]. PROMETHEE II olakšava dobijanje konačnog rangiranja alternativnog materijala u poređenju sa PROMETHEE I. Početni koraci se sastoje od normalizacije matrice evaluacije prikazane u Tabeli 18 korišćenjem jednačine (11) i (12) prema željenim (direktnim) i neželjenim (indirektnim) kriterijumima. Nakon toga, razlike u  $i$ -om alternativnom rešenju u odnosu na druge alternative izvedene kao što je prikazano u Tabeli 19. Procena funkcija preferencije  $P_j$  (a, b) i agregiranih funkcija preferencije izračunate kao što je prikazano u Tabeli 20 i 21 koristeći jednačine (19), (20) i (21). Zatim su dobijene vrednosti zbirnog odabira prikazane u tabelama 21-23. Rangiranje materijala prema toku izlaza, ulaza i razlike dato je u Tabeli 24 korišćenjem jednačine (16), (17) i (18). Vrednosti toka razlika su: -0,2824, -0,3062, -0,1072, 0,3111, 0,3045, 0,0801 za M1-M2-M3-M4-M5-M6 respektivno. Time je dobijeno da je M4 najbolji materijal među ostalim alternativama.

**Tabela 18.** Normalizacija matrice vrednovanja (Matrica izbora)

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	0	0.53	0.69	0.2	1	1	0
M <sub>2</sub>	0	0.68	0.79	0	1	1	0
M <sub>3</sub>	0	1	1	0.63	1	0.98	0
M <sub>4</sub>	0.76	0.30	0.24	1	0.30	0.97	1
M <sub>5</sub>	0.76	0.32	0.29	0.95	0.31	0.97	1
M <sub>6</sub>	1	0	0	0.4	0	0	1

**Tabela 19.** Izračunavanje evaluacionih razlika  $i$ -te alternative u odnosu na druge alternative

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
D <sub>M1-M2</sub>	0	-0.15	-0.1	0.2	0	0	0
D <sub>M1-M3</sub>	0	-0.47	-0.31	-0.425	0	0.02	0
D <sub>M1-M4</sub>	-0.76	0.23	0.45	-0.8	0.7	0.03	-1
D <sub>M1-M5</sub>	-0.76	0.21	0.4	-0.75	0.69	0.03	-1
D <sub>M1-M6</sub>	-1	0.53	0.69	-0.2	1	1	-1
D <sub>M2-M1</sub>	0	0.15	0.1	-0.2	0	1	0
D <sub>M2-M3</sub>	0	-0.32	-0.21	-0.625	0	0.02	0
D <sub>M2-M4</sub>	-0.76	0.38	0.55	-1	0.7	0.03	-1
D <sub>M2-M5</sub>	-0.76	0.36	0.5	-0.95	0.69	0.03	-1
D <sub>M2-M6</sub>	-1	0.68	0.79	-0.4	1	1	-1
D <sub>M3-M1</sub>	0	0.47	0.31	0.425	0	-0.02	0
D <sub>M3-M2</sub>	0	0.32	0.21	0.625	0	-0.02	0
D <sub>M3-M4</sub>	-0.76	0.7	0.76	-0.375	0.7	0.01	-1
D <sub>M3-M5</sub>	-0.76	0.68	0.71	-0.325	0.69	0.01	-1
D <sub>M3-M6</sub>	-1	1	1	0.225	1	0.98	-1
D <sub>M4-M1</sub>	0.76	-0.23	-0.45	0.8	-0.7	-0.03	1
D <sub>M4-M2</sub>	0.76	-0.38	-0.55	1	-0.7	-0.03	1
D <sub>M4-M3</sub>	0.76	-0.7	-0.76	0.375	-0.7	-0.01	1
D <sub>M4-M5</sub>	0	-0.02	-0.05	0.05	-0.01	0	0
D <sub>M4-M6</sub>	-0.24	0.3	0.24	0.6	0.3	0.97	0

$D_{M5-M1}$	0.76	-0.21	-0.4	0.75	-0.69	-0.03	1
$D_{M5-M2}$	0.76	-0.36	-0.5	0.95	-0.69	-0.03	1
$D_{M5-M3}$	0.76	-0.68	-0.71	0.325	-0.69	-0.01	1
$D_{M5-M4}$	0	0.02	0.05	-0.05	0.01	0	0
$D_{M5-M6}$	-0.24	0.32	0.29	0.55	0.31	0.97	0
$D_{M6-M1}$	1	-0.53	-0.69	0.2	-1	-1	1
$D_{M6-M2}$	1	-0.68	-0.79	0.4	-1	-1	1
$D_{M6-M3}$	1	-1	-1	-0.225	-1	-0.98	1
$D_{M6-M4}$	0.24	-0.30	-0.24	-0.6	-0.30	-0.97	0
$D_{M6-M5}$	0.24	-0.32	-0.29	-0.55	-0.31	-0.97	0

**Table 20.** Računanje funkcija preferencija  $P_j$  ( $a, b$ )

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
$D_{M1-M2}$	0	0	0	0.2	0	0	0
$D_{M1-M3}$	0	0	0	0	0	0.02	0
$D_{M1-M4}$	0	0.23	0.45	0	0.7	0.03	0
$D_{M1-M5}$	0	0.21	0.4	0	0.69	0.03	0
$D_{M1-M6}$	0	0.53	0.69	0	1	1	0
$D_{M2-M1}$	0	0.15	0.1	0	0	1	0
$D_{M2-M3}$	0	0	0	0	0	0.02	0
$D_{M2-M4}$	0	0.38	0.55	0	0.7	0.03	0
$D_{M2-M5}$	0	0.36	0.5	0	0.69	0.03	0
$D_{M2-M6}$	0	0.68	0.79	0	1	1	0
$D_{M3-M1}$	0	0.47	0.31	0.42	0	0	0
$D_{M3-M2}$	0	0.32	0.21	0.625	0	0	0
$D_{M3-M4}$	0	0.7	0.76	0	0.7	0.01	0
$D_{M3-M5}$	0	0.68	0.71	0	0.69	0.01	0
$D_{M3-M6}$	0	1	1	0.225	1	0.98	0
$D_{M4-M1}$	0.76	0	0	0.8	0	0	1
$D_{M4-M2}$	0.76	0	0	1	0	0	1
$D_{M4-M3}$	0.76	0	0	0.375	0	0	1
$D_{M4-M5}$	0	0	0	0.05	0	0	0
$D_{M4-M6}$	0	0.3	0.24	0.6	0.3	0.97	0
$D_{M5-M1}$	0.76	0	0	0.75	0	0	1
$D_{M5-M2}$	0.76	0	0	0.95	0	0	1
$D_{M5-M3}$	0.76	0	0	0.325	0	0	1
$D_{M5-M4}$	0	0.02	0.05	0	0.01	0	0
$D_{M5-M6}$	0	0.32	0.29	0.55	0.31	0.97	0
$D_{M6-M1}$	1	0	0	0.2	0	0	1
$D_{M6-M2}$	1	0	0	0.4	0	0	1
$D_{M6-M3}$	1	0	0	0	0	0	1
$D_{M6-M4}$	0.24	0	0	0	0	0	0
$D_{M6-M5}$	0.24	0	0	0	0	0	0

**Tabela 21.** Dobile vrednosti zbirne preferencije

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

D <sub>M1-M2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
D <sub>M1-M3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D <sub>M1-M4</sub>	0.00	0.02	0.02	0.00	0.07	0.00	0.00
D <sub>M1-M5</sub>	0.00	0.02	0.02	0.00	0.07	0.00	0.00
D <sub>M1-M6</sub>	0.00	0.05	0.03	0.00	0.10	0.05	0.00
D <sub>M2-M1</sub>	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
D <sub>M2-M3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D <sub>M2-M4</sub>	0.00	0.04	0.03	0.00	0.07	0.00	0.00
D <sub>M2-M5</sub>	0.00	0.04	0.03	0.00	0.07	0.00	0.00
D <sub>M2-M6</sub>	0.00	0.07	0.04	0.00	0.10	0.05	0.00
D <sub>M3-M1</sub>	0.00	0.05	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00
D <sub>M3-M2</sub>	0.00	0.03	0.01	0.13	0.00	0.00	0.00
D <sub>M3-M4</sub>	0.00	0.07	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00
D <sub>M3-M5</sub>	0.00	0.07	0.04	0.00	0.07	0.00	0.00
D <sub>M3-M6</sub>	0.00	0.10	0.05	0.05	0.10	0.05	0.00
D <sub>M4-M1</sub>	0.15	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.30
D <sub>M4-M2</sub>	0.15	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.30
D <sub>M4-M3</sub>	0.15	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.30
D <sub>M4-M5</sub>	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
D <sub>M4-M6</sub>	0.00	0.03	0.01	0.12	0.03	0.05	0.00
D <sub>M5-M1</sub>	0.15	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.30
D <sub>M5-M2</sub>	0.15	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.30
D <sub>M5-M3</sub>	0.15	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.30
D <sub>M5-M4</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D <sub>M5-M6</sub>	0.00	0.03	0.01	0.11	0.03	0.05	0.00
D <sub>M6-M1</sub>	0.20	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.30
D <sub>M6-M2</sub>	0.20	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.30
D <sub>M6-M3</sub>	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
D <sub>M6-M4</sub>	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D <sub>M6-M5</sub>	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabela 22.** Zbirna preferencija za različite materijale

Zbirna preferencija	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>
M <sub>1</sub>	0.000	0.040	0.001	0.117	0.113	0.238
M <sub>2</sub>	0.020	0	0.001	0.137	0.133	0.258
M <sub>3</sub>	0.147	0.167	0	0.178	0.174	0.344
M <sub>4</sub>	0.612	0.652	0.527	0	0.010	0.241
M <sub>5</sub>	0.602	0.642	0.517	0.004	0	0.235
M <sub>6</sub>	0.540	0.580	0.500	0.048	0.048	0

**Tabela 23.** Zbirna preferencija za različiti materijal za proračun izlaznog toka

Zbirna preferencija	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	Tok izlaza
M <sub>1</sub>	0.000	0.040	0.001	0.117	0.113	0.238	0.1018
M <sub>2</sub>	0.020	0	0.001	0.137	0.133	0.258	0.1099

M <sub>3</sub>	0.147	0.167	0	0.178	0.174	0.344	0.2019
M <sub>4</sub>	0.612	0.652	0.527	0	0.010	0.241	0.4082
M <sub>5</sub>	0.602	0.642	0.517	0.004	0	0.235	0.4000
M <sub>6</sub>	0.540	0.580	0.500	0.048	0.048	0	0.3433
Tok ulaza	0.3842	0.4161	0.3091	0.0971	0.0955	0.2632	

**Tabela 24.** Rangiranje materijala prema toku izlaza, ulaza i razlike

	Izlaz	Ulaz	Razlika	Rangiranje
M <sub>1</sub>	0.1018	0.3842	-0.2824	5
M <sub>2</sub>	0.1099	0.4161	-0.3062	6
M <sub>3</sub>	0.2019	0.3091	-0.1072	4
M <sub>4</sub>	0.4082	0.0971	0.3111	1
M <sub>5</sub>	0.4000	0.0955	0.3045	2
M <sub>6</sub>	0.3433	0.2632	0.0801	3

### 6.3.4 WASPAS metoda

Kod ove metode normalizuje se matrica odlučivanja procenjena pomoću jednačine (19) i (20) na osnovu željenih i neželjenih kriterijuma kao i ranije. Dobijene vrednosti prikazane u Tabeli 25. su standardne kvantitativne normalizovane vrednosti. Jednačine (21) i (22) primenjene su za izračunavanje težine normalizovane matrice odlučivanja. Ponderisana normalizovana matrica odlučivanja u slučajevima metode težinske sume (WSM) i metode masenog proizvoda (WSP) predstavljene su u Tabeli 26 i Tabeli 27. Dalja evaluacija je urađena sumiranjem (u slučaju WSM) i množenjem (u slučaju WSP) pojedinačno u svakom redu za proračun rezultata učinka. Individualni rezultat učinka sa rangiranjem prikazan je u Tabeli 28. Obe metode pokazuju slične rezultate u pogledu rezultata učinka, rangiranja, matrice odlučivanja normalizovane prema težini. Redosled rangiranja postignut je korišćenjem WSM i WSP: za M1-M2-M3-M4-M5-M6 je 6-5-4-1-2-3 i M1-M2-M3-M4-M5-M6 je 5-4-3 -2-1-6 respektivno. Rezultati postignuti sa TOPSIS metodom, primenom WSM i WPM metode proračuna, daju M4 i M5, respektivno kao najbolji materijal.

**Tabela 25.** Normalizovane vrednosti matrice odlučivanja

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	0.124224	0.547	0.7	0.644	1	1	0.333
M <sub>2</sub>	0.124224	0.693	0.8	0.56	1	1	0.333
M <sub>3</sub>	0.124224	1	1	0.83	1	0.37	0.333
M <sub>4</sub>	0.370224	0.32	0.26	1	0.34	0.289	1
M <sub>5</sub>	0.37037	0.33	0.31	0.977	0.35	0.289	1
M <sub>6</sub>	1	0.027	0.03	0.733	0.06	0.011	1

**Tabela 26.** Vrednosti dobijene ponderisanom normalizovanom matricom odlučivanja korišćenjem metode zbira (WSM)

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	0.024845	0.0547	0.035	0.01289	0.1	0.05	0.1
M <sub>2</sub>	0.024845	0.0693	0.04	0.0111	0.1	0.05	0.1
M <sub>3</sub>	0.024845	0.1	0.05	0.1667	0.1	0.01833	0.1



M <sub>4</sub>	0.074074	0.032	0.013	0.2	0.0345	0.01447	0.3
M <sub>5</sub>	0.074074	0.0333	0.0155	0.1956	0.035	0.01447	0.3
M <sub>6</sub>	0.2	0.0027	0.0015	0.1467	0.006	0.00059	0.3

**Tabela 27.** Vrednosti dobijene ponderisanom normalizovanom matricom odlučivanja korišćenjem metode proizvoda (WSP)

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>
M <sub>1</sub>	0.6589	0.94139	0.98232	0.91588	1	1	0.71922
M <sub>2</sub>	0.6589	0.96404	0.98890	0.88909	1	1	0.71922
M <sub>3</sub>	0.6589	1	1	0.96419	1	0.95107	0.71922
M <sub>4</sub>	0.8198	0.89231	0.93486	1	0.89905	0.93989	1
M <sub>5</sub>	0.8198	0.89595	0.94312	0.99552	0.90034	0.93989	1
M <sub>6</sub>	1	0.69598	0.83918	0.93985	0.75477	0.80146	1

**Tabela 28.** Ocena učinka dobijena ponderisanom normalizovanom matricom odlučivanja korišćenjem obe metode zbira i proizvoda

	Performanse prema WSP	Performanse prema WSM	Rangiranje prema WSM	Rangiranje prema WPM
M <sub>1</sub>	0.40139	0.4934002	6	5
M <sub>2</sub>	0.40169	0.495289	5	4
M <sub>3</sub>	0.43459	0.559844	4	3
M <sub>4</sub>	0.57790	0.668047	1	2
M <sub>5</sub>	0.58360	0.667936	2	1
M <sub>6</sub>	0.33205	0.657431	3	6

### 6.3.5 Izbor optimalnog materijala poređenjem više metoda

Istraživačka studija je doprinela tako što je normalizovana matrica odlučivanja korišćena za rešavanje problema izbora materijala za izbor najboljih materijala za lake vagone. Višestruke MCDM tehnike kao što su PROMETHEE, TOPSIS, VIKOR i metoda procene proizvoda ponderisane agregirane sume se primenjuju da bi se pronašlo najbolje rešenje. Međutim, glavni izazov je pronaći optimalan odnos primarnih svojstava kao što su gustina, modul elastičnosti, čvrstoća i sekundarnih svojstava kao što su cena, otpornost na koroziju. Ove karakteristike su zatim optimizovana pomoću MCDM alata. Kvalitativni i kvantitativni kriterijumi odabira materijala i kriterijumi njihove težine se koriste da bi se pronašla najbolja rešenja u smislu rangiranja. Dobijeni rezultati metoda procene PROMETHEE, TOPSIS i metoda procene proizvoda ponderisane agregirane sume pokazuju da bi aluminijum mogao biti bolja opcija u poređenju sa čelikom. Sva četiri metoda pokazuju ujednačenost i analogno rangiranje jedan prema drugom. Aluminijum je najbolji izbor za lake vagone zbog svoje otpornosti na koroziju, velike čvrstoće i Jangovog modula. Utvrđeno je da se primenom legura aluminijuma postiže veća ušteda u odnosu na čelik [213]. Ukupno poređenje svih metoda prikazano je u tabeli 29. Istraživanjem se takođe došlo do zaključka da MCDM tehnika ima sposobnost da reši složen problem, pomogne istraživačima u donošenju efikasnih izbora u skladu sa situacijama. Ove metode se mogu inkorporirati u širok spektar inženjerskih aplikacija kako bi pomogle onima koji donose odluke.

*Tabela 29. Rangiranje materijala korišćenjem više MCDM alata*

	<b>TOPSIS</b>		<b>WSP</b>		<b>WSM</b>		<b>VIKOR</b>		<b>PROMETHEE</b>	
	Score	Rank	Score	rank	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
<b>M1</b>	0.3525	6	0.40139	5	0.4934002	6	0.9808	5	-0.2824	5
<b>M2</b>	0.3664	5	0.40169	4	0.495289	5	1.0000	6	-0.3062	6
<b>M3</b>	0.4222	4	0.43459	3	0.559844	4	0.8389	4	-0.1072	4
<b>M4</b>	0.6843	2	0.57790	2	0.668047	1	0.0015	1	0.3111	1
<b>M5</b>	0.6879	1	0.58360	1	0.667936	2	0.0054	2	0.3045	2
<b>M6</b>	0.5776	3	0.33205	6	0.657431	3	0.2973	3	0.0801	3

---

## 7. ZAKLJUČAK

U okviru doktorske disertacije istraživana je razvoj i karakterizacija aluminijske pene, otvorenih i zatvorenih pora. Istraživanje je urađeno korišćenjem različitih pristupa. Kako ne postoji potpuno pouzdan i jednostavan metod za potpuno kontrolisanu proizvodnju, prva faza u razvoju metalne pene je odabir proizvodne tehnologije zbog složenosti i heterogenosti porozne strukture, jer ne postoji jednostavan metod koji omogućava potpuno kontrolisanu proizvodnju u smislu uniformnosti, pa se za proizvodnju metalnih pena sa otvorenom strukturom mogu primeniti različite metode. ALCAN i ubrizgavanje rastopljenog gasa su metode koje su primenjene za razvoj metalnih pena sa zatvorenom ćelijskom strukturom. Neophodan je dalji razvoj ovih metoda sa aspekata definisanja oblika i veličine pora na mikro nivou.

Voronoi (VTM, Voronoi tessellation) metodom je numerički kreirana metalna pena sa nepravilnim rasporedom pora i otvorenom ćelijskom strukturom. Tako dobijena struktura je dalje ispitivana numeričkom simulacijom ravnomernog jednoosnog pritiskivanja. Uzorci različite poroznosti su eksperimentalno proizvedeni ALUHAB tehnologijom. Tri porozna uzorka (30%, 60% i 80% poroznosti) su izložena jednoosnom pritiskivanju silom od 20 N duž pravca z-ose. Sila je ravnomerno raspoređena preko gornje površine test uzorka. Ova ispitivanja vršena su sa ciljem određivanja zavisnosti maksimalne sile pritiska od poroznosti metalnih pena sa otvorenom strukturom. Za numeričke proračune korišćena je nelinearna elasto-plastična analiza. Opterećenje je zadato kao funkcija u zavisnosti od vremena u softveru FEMAP sa Nastran solverom. Vrednosti von Mises napona, maksimalnog glavnog napona i srednjih napona su dobijeni numeričkim proračunom. Za uporednu numeričku analizu normalnih napona korišćeni su takođe test uzorci sa 30%, 60% i 80% poroznosti. Pomoću CT skeniranja generisane su realne 3D slike eksperimentalnih uzoraka. Dobijeni numerički rezultati su pokazali da su uzorci sa većim procentom poroznosti imali značajno veće vrednosti normalnih napona pri istim uslovima ispitivanja. Sa porastom poroznosti rastu i vrednosti napona nastali usled pritiskivanja i zatezanja. Kako se procenat poroznosti povećavao (30%, 60%, 80%), vrednosti napona u zoni platoa su se povećavale. Dobijene vrednosti napona su bile identične za poroznosti od 60% i 80%. Model zasnovan na VTM metodi korišćen u ovoj studiji je primenljiv u određenim kvazistatičkim ispitivanjima i za ispitivanja u elastičnoj oblasti (vrednosti deformacije ispod 10%). Usled korišćenja režima malih deformacija nije bilo moguće utvrditi deformaciju zgušnjavanja pri numeričkim proračunima. Potrebna su dodatna prilagođavanja numeričkog modela da bi se simuliralo realno dinamičko ponašanje izvan definisanih granica. Takođe neophodno je dalje optimizovati i unaprediti mrežu konačnih elemenata radi dobijanja tačnijih rezultata.

Ispitivanje metalnih pena sa zatvorenom ćelijskom strukturom urađeno je eksperimentalno i numerički. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazali su da dolazi do kidanja test uzoraka pri opterećenju od 90 kN. Iz tog razloga je 50% umanjeno opterećenje pri numeričkim ispitivanjima. Do vrednosti od 17 MPa materijal je deformisan u zoni elastičnosti, nakon toga do 23 MPa je oblast platoa napona, dok zgušnjavanje počinje na oko 52% deformacije. Korišćeni eksperimentalni uzorak je imao visok procenat poroznosti, pore su bile ravnomerno raspoređene. Dobijeni rezultati su pokazali da su se visoke vrednosti napona nastalih zatezanjem pojavili u oblasti tankih zidova metalnih pena, a visoke vrednosti napona pri pritiskivanju su se pojavile u oblasti debelih zidova metalnih pena. Naprezanje pri pritisku

---

se javljalo prvenstveno na mestima sa debljim zidovima. Zbog toga se zaključuje da je test uzorak bio izložen složenim poljima napreznja, pri čemu značajan uticaj ima smicanje. Visoke vrednosti napona koji nastaju usled pritiskivanja i zatezanja istovremeno su imali veliki uticaj na velike pore unutar tankih zidova. Prilikom ispitivanja tanki zidovi pora su pokazali veliku osetljivost na napone smicanja, dok je kod debelih zidova to bili značajno manje. Pored toga, rezultati numeričkih analiza pokazuju pojavu naglog krtog loma zidova, usled topološke heterogenosti i ujedno usled prostornih fluktuacija između većih i bliže postavljenih pora. Numerički i eksperimentalni rezultati pokazuju da kritična vrednost napona odgovara stepenu deformacije od 5%, dok oblast platoa započinje na 7%. Unutar linearne elastične oblasti, uočava se odgovarajuće slaganje rezultata dobijenih eksperimentalnim i numeričkim ispitivanjima. U cilju simuliranja procesa zgušnjavanja potrebna su dalja istraživanja i primena novih numeričkih modela.

Najbolji optimalni materijali su određeni za izradu elemenata železničkih vagona, primenom nekoliko metoda odlučivanja višekriterijumskom (MCDM) analizom: 1) VIKOR (Više Kriterijumska Optimizacija i Kompromisno Rešenje), 2) TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution), 3) PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) i 4) WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) metodama. Analizirano je šest mogućih materijala: tri vrste naprednih AHSS čelika (dvofazni DP 600; TRIP 700 i TWIP čelici) i tri vrste aluminijuma (Aluminijum, Al 6005 – T6, Aluminijum, Al 6082 – T6, i porozna struktura aluminijuma sa zatvorenim porama). Kriterijumi za poređenje ovih materijala pri izboru prethodnim metodama su bili: gustina, granica tečenja, zatezna čvrstoća, njihov odnos, Jangov modul elastičnosti, cena i otpornost na koroziju. Rezultati ove statističke analize su pokazali da legure na bazi aluminijuma imaju veće mogućnosti primene najviše zbog manje težine i značajno bolje otpornosti na koroziju od AHSS čelika, ali i da porozni aluminijum još uvek nema dovoljnu čvrstoću za primenu kod strukturnih aplikacija.

---

## 8. LITERATURA

- [1] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998). Deformation characteristics of metal foams. *Journal of Materials Science*, 33(6), 1431–1440. <https://doi.org/10.1023/A:1004383222228>
- [2] Liu, P. S. (2010). Mechanical relation for porous metal foams under complex loads of triaxial tension and compression. *Materials & Design*, 31(4), 2264–2269. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.007>
- [3] Liu PS. (2014) Porous materials: processing and applications. 1st edition. Waltham, MA: Elsevier; ISBN 9780124077881
- [4] Herrington, R., & Hock, K. (Eds.). (1997). Flexible polyurethane foams. Dow Chemical.
- [5] Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- [6] Banhart, J. (2013). Light-Metal Foams-History of Innovation and Technological challenges. *Advanced Engineering Materials*, 15(3), 82–111. <https://doi.org/10.1002/adem.201200217>
- [7] Weaire, D. (2008). Kelvin's foam structure: A commentary. *Philosophical Magazine Letters*, 88(2), 91–102. <https://doi.org/10.1080/09500830701697498>
- [8] Uthaman, A., Thomas, S., Li, T., & Maria, H. (2022a). Advanced Functional Porous Materials: From Macro to Nano Scale Lengths.
- [9] Scheffler, M., & Colombo, P. (Eds.). (2005). *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/3527606696>
- [10] Liu, P. S., & Chen, G. F. (2014). General Introduction to Porous Materials. In *Porous Materials* (pp. 1–20). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407788-1.00001-0>
- [11] Aubert, J. H., Kraynik, A. M., & Rand, P. B. (1986). Aqueous foams. *Scientific American*, 254(5), 74-83.
- [12] Zhang, Y. L., & Li, C. D. (2000). Primary Introduction to Polymer Foams. Zhejiang Science and Technology Press, Hangzhou, China.
- [13] Wu, X.Y., & Xu, J.Y. (2002). Polymer Foams Formation. China Petrochemical Press, Beijing, China.
- [14] Myers, D. (1999). *Surfaces, interfaces, and colloids* (Vol. 415). New York: Wiley.
- [15] Banhart, J. (1999). Foam Metal: The Recipe. *Europhysics News*, 30(1), 17–20. <https://doi.org/10.1007/s00770-999-0017-8>
- [16] Degischer, H.-P., & Kriszt, B. (Eds.). (2002). *Handbook of cellular metals: Production, processing, applications*. Wiley-VCH.
- [17] Sun, Y. Q., & Gao, T. (2002). The optimum wetting angle for the stabilization of liquid-metal foams by ceramic particles: Experimental simulations. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(10), 3285–3292. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0315-y>.
- [18] Gibson, Lorna J. & Ashby, M. F. (1988). *Cellular solids : structure & properties*. Oxford [Oxfordshire] ; New York : Pergamon Press
- [19] Weaire, D. and Hutzler, S. (1999) *The Physics of Foam*. Clarendon Press, Oxford.

- 
- [20] Fendler, J. H. (1991). Surfaces, interfaces, and colloids?principles and applications. By D. Myers, VCH Publishers, New York 1991, 433 pp., bound, DM 84,-, ISBN 1-56081-033-5. *Advanced Materials*, 3(10), 515–515. <https://doi.org/10.1002/adma.19910031015>.
- [21] Ashby, M., Evans, T., & Fleck, N. A. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=316852>
- [22] Weaire, D. L., Weaire, D. L., & Hutzler, S. (2005). *The physics of foams* (Reprinted). Clarendon Press.
- [23] Shiomi, M., & Fukaya, T. (2014). Forming of Aluminum Foams by Using Rotating Mold. *Procedia Engineering*, 81, 664–669. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.057>
- [24] Mingjun, Z., Deping, H., & Ge, D. (2002). Additional force field in cooling process of cellular Al alloy. *Science in China Series B: Chemistry*, 45(6), 598–607. <https://doi.org/10.1007/BF03182531>
- [25] Babcsán, N., & Banhart, J. (2006). Metal Foams: Towards High-Temperature Colloid Chemistry. In B. P. Binks & T. S. Horozov (Eds.), *Colloidal Particles at Liquid Interfaces* (pp. 445–500). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511536670.012>
- [26] Fiedler, S. O., Johan, B., & Fiedler, W. S. (1960). Production of metal foam (United States Patent No. US2937938A). <https://patents.google.com/patent/US2937938A/en>
- [27] Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46, 559-632.
- [28] DeGroot, C. T., Straatman, A. G., & Betchen, L. J. (2009). Modeling Forced Convection in Finned Metal Foam Heat Sinks. *Journal of Electronic Packaging*, 131(2), 021001. <https://doi.org/10.1115/1.3103934>
- [29] Berry, C. B. (1972). Foamed metal. USA. US Patent 3671 221
- [30] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Proceedings*, 521, 121. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [31] Akiyama, S., Ueno, H., Imagawa, K., Kitahara, A., Morimoto, K., Nishikawa, T., & Itoh, M. (1987). US Pat.
- [32] Gergely, V., Degischer, H. P., & Clyne, T. W. (2000). Recycling of MMCs and production of metallic foams.
- [33] Michael Ashby, Tony Evans, NA Fleck, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, L. J. Gibson, *Metal Foams: A Design Guide—1st Edition*. 1st Edition - June 21, 2000, eBook ISBN: 9780080511467
- [34] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Proceedings*, 521, 121. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [35] Babcsan, N., Beke, S., Makk, P., Soki, P., Számel, G., Degischer, H. P., & Mokso, R. (2012). ALUHAB — The Superior Aluminium Foam. In H. Weiland, A. D. Rollett, & W. A. Cassada (Eds.), *ICAA13 Pittsburgh* (pp. 1005–1010). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48761-8\\_150](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48761-8_150)
- [36] Surace, R., & De Filippis, L. A. C. (2010). Investigation and Comparison of Aluminium Foams Manufactured by Different Techniques. In I. Fuerstner (Ed.), *Advanced Knowledge Application in Practice*. Sciyo. <https://doi.org/10.5772/10353>
- [37] Bauer, B., Kralj, S., & Bušić, M. (2013). Production and application of metal foams in casting technology. *Tehnicki Vjesnik*, 20, 1095–1102.
-



- 
- [38] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998). [No title found]. *Journal of Materials Science*, 33(6), 1431–1440. <https://doi.org/10.1023/A:1004383222228>
- [39] Shapovalov, V. I. (1998). Formation of Ordered Gas-Solid Structures VIA Solidification in Metal-Hydrogen Systems. *MRS Proceedings*, 521, 281. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-281>
- [40] Güner, A., Arıkan, M., & Nebioglu, M. (2015). New Approaches to Aluminum Integral Foam Production with Casting Methods. *Metals*, 5(3), 1553–1565. <https://doi.org/10.3390/met5031553>
- [41] Su, Y., Li, Z., Gong, X., Ouyang, Q., Guo, Q., Guo, C., Zhang, J., & Zhang, D. (2016). Structural modeling and mechanical behavior of Metal-Porous-Polymer-Composites (MPPCs) with different polymer volume fractions. *Composite Structures*, 153, 673–681. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.024>
- [42] Gladysz, G. M., & Chawla, K. K. (2021). Characteristics and properties of porous materials. In *Voids in Materials* (pp. 189–229). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819282-5.00009-0>
- [43] An, Y., Wen, C., Hodgson, P. D., & Yang, C. (2012). Investigation of cell shape effect on the mechanical behaviour of open-cell metal foams. *Computational Materials Science*, 55, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.11.030>
- [44] Rajak, D. K., Kumaraswamidhas, L. A., & Das, S. (2017). TECHNICAL OVERVIEW OF ALUMINUM ALLOY FOAM. *Reviews on advanced materials science*, 49(1).
- [45] Borovinšek, M., Taherishargh, M., Vesenjajk, M., Ren, Z., & Fiedler, T. (2016). Geometrical characterization of perlite-metal syntactic foam. *Materials Characterization*, 119, 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.07.024>
- [46] Taherishargh, M., Belova, I. V., Murch, G. E., & Fiedler, T. (2017). The effect of particle shape on mechanical properties of perlite/metal syntactic foam. *Journal of Alloys and Compounds*, 693, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.168>
- [47] Daoud, A. (2009). Effect of fly ash addition on the structure and compressive properties of 4032–fly ash particle composite foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 487(1–2), 618–625. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.08.026>
- [48] Solórzano, E., Reglero, J. A., Rodríguez-Pérez, M. A., Lehmus, D., Wichmann, M., & de Saja, J. A. (2008). An experimental study on the thermal conductivity of aluminium foams by using the transient plane source method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25–26), 6259–6267. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.062>
- [49] Hamidi Ghaleh Jigh, B., Hosseini Toudeshky, H., & Farsi, M. A. (2017). Experimental and multi-scale analyses of open-celled aluminum foam with hole under compressive quasi-static loading. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.129>
- [50] Linul, E., Marsavina, L., & Kováčik, J. (2017). Collapse mechanisms of metal foam matrix composites under static and dynamic loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, C(690), 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.009>
- [51] Fischer, S. F. (2016). Energy absorption efficiency of open-cell pure aluminum foams. *Materials Letters*, C(184), 208–210. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.061>
- [52] Kraynik, A. M. (2003). Foam Structure: From Soap Froth to Solid Foams. *MRS Bulletin*, 28(4), 275–278. <https://doi.org/10.1557/mrs2003.80>
-



- 
- [53] An, Y., Yang, S., Zhao, E., & Wang, Z. (2018). Fabrication and experimental investigation of metal grid structure-reinforced aluminum foams. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(5), 528–533. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364747>
- [54] Xiao, Z., Fang, J., Sun, G., & Li, Q. (2015). Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Advances in Engineering Software*, 85, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.03.005>
- [55] Schwingel, D., Seeliger, H.-W., Vecchionacci, C., Alwes, D., & Dittrich, J. (2007). Aluminium foam sandwich structures for space applications. *Acta Astronautica*, 61(1), 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.022>
- [56] Banhart, J. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37(2/3), 114. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2005.006640>
- [57] Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- [58] Duarte, I., Krstulović-Opara, L., & Vesenjak, M. (2015). Characterisation of aluminium alloy tubes filled with aluminium alloy integral-skin foam under axial compressive loads. *Composite Structures*, 121, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.003>
- [59] Zu, G., Song, B., Zhong, Z., Li, X., Mu, Y., & Yao, G. (2012). Static three-point bending behavior of aluminum foam sandwich. *Journal of Alloys and Compounds*, Complete(540), 275–278. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.06.079>
- [60] Hou, W., Zhu, F., Lu, G., & Fang, D.-N. (2010). Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. *International Journal of Impact Engineering*, 10(37), 1045–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006>
- [61] Gupta, N., & Rohatgi, P. K. (Eds.). (2014). *Metal matrix syntactic foams: Processing, microstructure, properties and applications*. DEStech Publications Inc.
- [62] Orbulov, I., & Szlancsik, A. (2018). On the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Syntactic Foams. *Advanced Engineering Materials*, 20, 1700980. <https://doi.org/10.1002/adem.201700980>
- [63] Duarte, I., Ventura, E., Olhero, S., & Ferreira, J. M. (2015). A novel approach to prepare aluminium-alloy foams reinforced by carbon-nanotubes. *Materials Letters*, 160, 162–166.
- [64] Du, Y., Li, A. B., Zhang, X. X., Tan, Z. B., Su, R. Z., Pu, F., & Geng, L. (2015). Enhancement of the mechanical strength of aluminum foams by SiC nanoparticles. *Materials Letters*, Complete(148), 79–81. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.02.066>
- [65] Szlancsik, A., Katona, B., Májlínger, K., & Orbulov, I. N. (2015). Compressive Behavior and Microstructural Characteristics of Iron Hollow Sphere Filled Aluminum Matrix Syntactic Foams. *Materials (Basel, Switzerland)*, 8(11), 7926–7937. <https://doi.org/10.3390/ma8115432>
- [66] Linul, E., Movahedi, N., & Marsavina, L. (2018). The temperature and anisotropy effect on compressive behavior of cylindrical closed-cell aluminum-alloy foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 1172–1179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.102>
-

- 
- [67] Omar, M. Y., Xiang, C., Gupta, N., Strbik, O. M., & Cho, K. (2015). Data characterizing flexural properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foam core metal matrix sandwich. *Data in Brief*, 5, 564–571. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.09.054>
- [68] Omar, M.; Xiang, C.; Gupta, N.; Strbik, O.; Cho, K. Syntactic foam core metal matrix sandwich composite under bending conditions. *Mater. Des.* 2015, 86, 536–544.
- [69] Andrews, E. W., Sanders, W., & Gibson, L. (1999). Compressive and tensile behaviour of aluminum foams. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00170-7)
- [70] Darvizeh, R., & Davey, K. (2015). Non-physical finite element modelling of high speed normal crushing of cellular materials. *International Journal of Impact Engineering*, 82, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.002>
- [71] Nair, A.; Mason, B.; Groven, L.; Son, S.; Strachan, A.; Cuitio, A. Micro-rve modeling of mechanistic response in porous intermetallics subject to weak and moderate impact loading. *Int. J. Plast.* 2013, 51, 1–32.
- [72] Ramirez, J., Cardona, M., Velez, J., Mariaka, I., Isaza, J., Emigdio, M., Betancourt, S., & Fernandez-Morales, P. (2014). Numerical Modeling and Simulation of Uniaxial Compression of Aluminum Foams Using FEM and 3D-CT Images. *Procedia Materials Science*, 4, 218–222. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.609>
- [73] Wejrzanowski, T., Skibinski, J., Szumbariski, J., & Kurzydłowski, K. J. (2013). Structure of foams modeled by Laguerre–Voronoi tessellations. *Computational Materials Science*, 67, 216–221. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.08.046>
- [74] Sotomayor, O.E.; Tippur, H.V. Role of cell regularity and relative density on elasto-plastic compression response of 3-D open-cell foam core sandwich structure generated using Voronoi diagrams. *Acta Mater.* 2014, 78, 301–313.
- [75] Schladitz, K., Redenbach, C., Sych, T., & Godehardt, M. (2012). Model Based Estimation of Geometric Characteristics of Open Foams. *Methodology and Computing in Applied Probability - METHODOL COMPUT APPL PROBAB*, 14. <https://doi.org/10.1007/s11009-010-9208-5>
- [76] Kraynik, A. M. (2006). The Structure of Random Foam. *Advanced Engineering Materials*, 8, 900–906. <https://doi.org/10.1002/adem.200600167>
- [77] Hitti, K.; Laure, P.; Coupez, T.; Silva, L.; Bernacki, M. Precise generation of complex statistical representative volume elements (rves) in a finite element context. *Comput. Mater. Sci.* 2012, 61, 224–238.
- [78] Ghosh, S., & Moorthy, S. (2004). Three dimensional Voronoi cell finite element model for microstructures with ellipsoidal heterogeneties. *Computational Mechanics*, 34, 510–531. <https://doi.org/10.1007/s00466-004-0598-5>
- [79] Zhou, J., Shrotriya, P., & Soboyejo, W. (2004). Mechanisms and mechanics of compressive deformation in open-cell Al foams. *Mechanics of Materials*, 36, 781–797. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2003.05.004>
- [80] Shunmugasamy, V. C., & Mansoor, B. (2018). Compressive behavior of a rolled open-cell aluminum foam. *Materials Science and Engineering A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 281–294.
- [81] Deshpande, V. S., & Fleck, N. A. (2000). High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams. *International Journal of Impact Engineering*, 24(3), 277–298. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00153-0)
- [82] Ashby, M., Evans, T., & Fleck, N. A. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=316852>
-

- 
- [83] García-Moreno, F. (2016). Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials*, 9(2), 85. <https://doi.org/10.3390/ma9020085>
- [84] Mukai, T., Kanahashi, H., Higashi, K., Yamada, Y., Shimojima, K., Mabuchi, M., ... & Nieh, T. G. (1999). Energy absorption of light-weight metallic foams under dynamic loading. In *MetFoam 99: International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures* (pp. 353-358).
- [85] Cheng, Y.; Li, Y.; Chen, X.; Zhou, X.; Wang, N. Compressive Properties and Energy Absorption of Aluminum Foams with a Wide Range of Relative Densities. *J. Mater. Eng. Perform.* 2018, 27, 4016–4024.
- [86] Evans, A., Hutchinson, J., & Ashby, M. (1998). Multifunctionality of cellular metal systems. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00004-8)
- [87] Yuan, W.; Li, Y.; Chen, X. Improving Sound Absorption of Aluminum Foams by Drilling Holes. *Chin. J. Nonferrous Met.* 2011, 21, 138–144.
- [88] Xu, Z., & Hao, H. (2014). Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity. *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.07.188>
- [89] Zhu, X., Ai, S., Lu, X., Ling, X., Zhu, L., & Liu, B. (2014). Thermal conductivity of closed-cell aluminum foam based on the 3D geometrical reconstruction. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2014.01.006>
- [90] Lu, G., & Yu, T. X. (2003). *Energy absorption of structures and materials*. CRC Press ; Woodhead Pub. <http://www.crcnetbase.com/isbn/9780203484128>
- [91] Ma, G. W., & Ye, Z. Q. (2007). Energy absorption of double-layer foam cladding for blast alleviation. *International Journal of Impact Engineering*, 34(2), 329–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.07.012>
- [92] Rajendran, R., Prem Sai, K., Chandrasekar, B., Gokhale, A., & Basu, S. (2009). Impact energy absorption of aluminium foam fitted AISI 304L stainless steel tube. *Materials & Design*, 30(5), 1777–1784. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.021>
- [93] Yun, N.-R., Shin, D.-H., Ji, S.-W., & Shim, C.-S. (2014). Experiments on blast protective systems using aluminum foam panels. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(7), 2153–2161. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0092-3>
- [94] Rajendran, R., Prem Sai, K., Chandrasekar, B., Gokhale, A., & Basu, S. (2008). Preliminary investigation of aluminium foam as an energy absorber for nuclear transportation cask. *Materials and Design*, 29(9), 1732–1739.
- [95] Jing, L., Su, X., Yang, F., Ma, H., & Zhao, L. (2018). Compressive strain rate dependence and constitutive modeling of closed-cell aluminum foams with various relative densities. *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2663-z>
- [96] Deqing, W., Weiwei, X., Xiangjun, M., & Ziyuan, S. (2005). Cell structure and compressive behavior of an aluminum foam. *Journal of materials science*, 40(13), 3475-3480.
- [97] Fan, Z., Zhang, B., Gao, Y., Guan, X., & Xu, P. (2018). Deformation mechanisms of spherical cell porous aluminum under quasi-static compression. *Scripta Materialia*, 142, 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.08.019>
- [98] Tianjian L. B. Z. G. L. (2011). Low strain rate compressive behavior of high porosity closed-cell aluminum foams. *力学学报*, 43(1), 122–135. <https://doi.org/10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2009-778>
-

- 
- [99] Fang, Q., Zhang, J., Zhang, Y., Wu, H., & Gong, Z. (2015). A 3D mesoscopic model for the closed-cell metallic foams subjected to static and dynamic loadings. *International Journal of Impact Engineering, Complete*(82), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.10.009>
- [100] Sun, Y., Zhang, X., Shao, Z., & Li, Q. M. (2017). Image-based correlation between the meso-scale structure and deformation of closed-cell foam. *Materials Science and Engineering A*, 688, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.092>
- [101] Talebi, S., Sadighi, M., & Aghdam, M. (2018). Numerical and experimental analysis of the closed-cell aluminium foam under low velocity impact using computerized tomography technique. *Acta Mechanica Sinica*, 35. <https://doi.org/10.1007/s10409-018-0795-7>
- [102] Saadatfar, M.; Mukherjee, M.; Madadi, M.; Schröder-Turk, G.E.; Garcia-Moreno, F.; Schaller, F.M.; Hutzler, S.; Sheppard, A.P.; Banhart, J.; Ramamurty, U. Structure and deformation correlation of closed-cell aluminium foam subject to uniaxial compression. *Acta Mater.* 2012, 60, 3604–3615.
- [103] Soni, B.; Biswas, S. Evaluation of mechanical properties under quasi-static compression of open cell foams of 6061-T6 Al alloy fabricated by pressurized salt infiltration casting method. *Mater. Charact.* 2007, 130, 198–203.
- [104] Barbier, C., Michaud, P.-M., Baillis, D., Randrianalisoa, J., & Combescure, A. (2014). New laws for the tension/compression properties of Voronoi closed-cell polymer foams in relation to their microstructure. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 45, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.12.001>
- [105] Duarte, I., Vesenjak, M., & Krstulović-Opara, L. (2016). Compressive behaviour of unconstrained and constrained integral-skin closed-cell aluminium foam. *Composite Structures*, C(154), 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.038>
- [106] Prados Martín, E. (2021). Microstructural parameters affecting the compressive response of closed-cell aluminum foams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1872747>
- [107] Chen, Y., Das, R., & Battley, M. (2015). Effects of cell size and cell wall thickness variations on the stiffness of closed-cell foams. *International Journal of Solids and Structures*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.09.022>
- [108] Zhang, X., Tang, L., Liu, Z., Liu, Y., & Wu, Y. (2016). Yield Properties of Closed-Cell Aluminum Foam under Triaxial Loadings by a 3D Voronoi Model. *Mechanics of Materials*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.10.007>
- [109] Wang, S., Ding, Y., Wang, C., Zheng, Z., & Yu, J. (2017). Dynamic material parameters of closed-cell foams under high-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, C(99), 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.09.013>
- [110] Fahlbusch, N.-C., Grenestedt, J. L., & Becker, W. (2016). Effective failure behavior of an analytical and a numerical model for closed-cell foams. *International Journal of Solids and Structures*, C(97–98), 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.07.007>
- [111] Zhu, W., Blal, N., Cunsolo, S., Baillis, D., & Michaud, P.-M. (2018). Effective Elastic Behavior of Irregular Closed-Cell Foams. *Materials*, 11(11), 2100. <https://doi.org/10.3390/ma11112100>
- [112] Kováčik, J., Marsavina, L., & Linul, E. (2018). Poisson's Ratio of Closed-Cell Aluminium Foams. *Materials*, 11, 1904. <https://doi.org/10.3390/ma11101904>
-

- 
- [113] Kadkhodapour, J., Raeisi, S., Kadkhodapour, J., & Raeisi, S. (2014). Micro–macro investigation of deformation and failure in closed-cell aluminum foams. *Computational Materials Science, Complete*(83), 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.10.017>
- [114] Jigh, B. H. G., Toudeshky, H. H., & Farsi, M. A. (2017). Experimental and multi-scale analyses of open-celled aluminum foam with hole under compressive quasi-static loading. *Journal of Alloys and Compounds, C*(695), 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.129>
- [115] Gradinger, R., & Rammerstorfer, F. G. (1998). On the influence of meso-inhomogeneities on the crush worthiness of metal foams. *Acta Materialia*, 47, 143–148. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00332-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00332-2)
- [116] Liu, Y. D., Yu, J. L., Zheng, Z. J., & Li, J. R. (2009). A numerical study on the rate sensitivity of cellular metals. *International Journal of Solids and Structures*, 22–23(46), 3988–3998. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.07.024>
- [117] Raj, E., Parameswaran, V., & Daniel, B. s. s. (2009). Comparison of quasi-static and dynamic compression behavior of closed-cell aluminum foam. *Materials Science and Engineering: A*, 526, 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.017>
- [118] Jung, A., Grammes, T., & Diebels, S. (2015). Micro-structural motivated phenomenological modelling of metal foams: Experiments and modelling. *Archive of Applied Mechanics*, 85(8), 1147–1160. <https://doi.org/10.1007/s00419-014-0942-y>
- [119] Kader, M. A., Islam, M. A., Saadatfar, M., Hazell, P. J., Brown, A. D., Ahmed, S., & Escobedo, J. P. (2017). Macro and micro collapse mechanisms of closed-cell aluminium foams during quasi-static compression. *Materials & Design, C*(118), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.011>
- [120] Koloushani, M., Hedayati, R., Sadighi, M., & Mohammadi-Aghdam, M. (2018). CT-Based Micro-Mechanical Approach to Predict Response of Closed-Cell Porous Biomaterials to Low-Velocity Impact. *Journal of Imaging*, 4(3), 49. <https://doi.org/10.3390/jimaging4030049>
- [121] Jang, W.-Y., & Kyriakides, S. (2009). On the crushing of aluminum open-cell foams: Part II analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 46(3), 635–650. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.10.016>
- [122] Fiedler, T., Sulong, M. A., Mathier, V., Belova, I., Younger, C., & Murch, G. (2014). Mechanical properties of aluminium foam derived from infiltration casting of salt dough. <https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2013.08.021>
- [123] Singh, S., & Bhatnagar, N. (2017). A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017). *Journal of Porous Materials*. <https://doi.org/10.1007/s10934-017-0467-1>
- [124] Yamada, Y., Wen, C., Shimojima, K., Mabuchi, M., Nakamura, M., Asahina, T., Aizawa, T., & Higashi, K. (2000). Effects of Cell Geometry on the Compressive Properties of Nickel Foams. *Materials Transactions, JIM*, 41(9), 1136–1138. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.41.1136>
- [125] Banhart, J. (2006). Metal Foams: Production and Stability. *Advanced Engineering Materials*, 8(9), 781–794. <https://doi.org/10.1002/adem.200600071>
- [126] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998a). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Proceedings*, 521, 121. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [127] Xu, S., Bourham, M., & Rabiei, A. (2010). A novel ultra-light structure for radiation shielding. *Materials & Design*, 31(4), 2140–2146. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.011>
-



- 
- [128] Stanev, L., Kolev, M., Drenchev, B., & Drenchev, L. (2017). Open-Cell Metallic Porous Materials Obtained Through Space Holders—Part II: Structure and Properties. A Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme*, 139, 050802.
- [129] Babcsán, N., Beke, S., Szamel, G., Börzsönyi, T., Szabó, B., Mokso, R., Kádár, C., & Kiss, J. B. (2014a). Characterisation of ALUHAB Aluminium Foams with Micro-CT. <https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2014.07.598>
- [130] Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., & Kitahara, A. (2000). ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2, 179-183.
- [131] Gergely, V., & Clyne, B. (2000). The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 175–178. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1527-2648\(200004\)2:4<175::AID-ADEM175>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<175::AID-ADEM175>3.0.CO;2-W)
- [132] Patel, P.R., Bhingole, P.P., & Makwana, D. (2018). Manufacturing, characterization and applications of lightweight metallic foams for structural applications: Review. *Materials Today: Proceedings*, 5, 20391-20402.
- [133] Güner, A., Arıkan, M., & Nebioglu, M. (2015). New Approaches to Aluminum Integral Foam Production with Casting Methods. *Metals*, 5(3), 1553–1565. <https://doi.org/10.3390/met5031553>
- [134] Duarte, I., Vesenjnak, M., & Vide, M. J. (2019). Automated Continuous Production Line of Parts Made of Metallic Foams. *Metals*, 9(5), 531. <https://doi.org/10.3390/met9050531>
- [135] Banhart, J., Baumeister, J., & Weber, M. (1995). Powder Metallurgical Technology for the Production of Metallic Foams. *European Conference on Advanced PM Materials (Euro PM'95)*.
- [136] Lefebvre, L.-P., Banhart, J., & Dunand, D. C. (2008). Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials*, 10(9), 775–787. <https://doi.org/10.1002/adem.200800241>
- [137] Liu, Z., & Searson, P. C. (2006). Single Nanoporous Gold Nanowire Sensors. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(9), 4318–4322. <https://doi.org/10.1021/jp056940t>
- [138] Kulshreshtha, A., & Dhakad, S.K. (2020). Preparation of metal foam by different methods: A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1784-1790.
- [139] Weissmüller, J., Viswanath, R. N., Kramer, D., Zimmer, P., Würschum, R., & Gleiter, H. (2003). Charge-Induced Reversible Strain in a Metal. *Science*, 300(5617), 312–315. <https://doi.org/10.1126/science.1081024>
- [140] Utsunomiya, H., & Matsumoto, R. (2014). Deformation Processes of Porous Metals and Metallic Foams (Review). *Procedia Materials Science*, 4, 245–249. <https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2014.07.614>
- [141] Tuchinskiy, L. (2008). Novel Manufacturing Process for Metal and Ceramic Microhoneycombs. *Advanced Engineering Materials*, 10(3), 219–222. <https://doi.org/10.1002/adem.200700268>
- [142] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998a). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Proceedings*, 521, 121. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [143] Florek, R., & Siman, F. (2010). COMPRESSION TEST EVALUATION METHOD FOR ALUMINIUM FOAM PARTS OF DIFFERENT ALLOYS AND DENSITIES. *Powder Metallurgy Progress*, 4, 6.
-

- 
- [144] Haag, F. C., Galio, A. F., & Schaeffer, L. (2002). Uniaxial compression tests of aluminium foams. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 216(4), 633–636. <https://doi.org/10.1243/0954405021520148>
- [145] Banhart, J., & Baumeister, J. (1998a). Production Methods for Metallic Foams. *MRS Proceedings*, 521, 121. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- [146] Kriszt, B., Foroughi, B., Faure, K., & degischer, H. P. (2000). Behaviour of aluminium foam under uniaxial compression. *Materials Science and Technology*, 16(7–8), 792–796. <https://doi.org/10.1179/026708300101508450>
- [147] Idris, M. I., Vodenitcharova, T., & Hoffman, M. (2009). Mechanical behaviour and energy absorption of closed-cell aluminium foam panels in uniaxial compression. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 517(1–2), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.067>
- [148] McCullough, K. Y. G., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (1999). Uniaxial stress-strain behaviour of aluminium alloy foams. *Acta Materialia*, 47, 2323–2330. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00128-7)
- [149] Sharma, V., Grujovic, N., Zivic, F., & Slavkovic, V. (2019a). Influence of Porosity on the Mechanical Behavior during Uniaxial Compressive Testing on Voronoi-Based Open-Cell Aluminium Foam. *Materials*, 12(7), 1041. <https://doi.org/10.3390/ma12071041>
- [150] Yan, W., Durif, E., Yamada, Y., & Wen, C. (2007). Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminium Tubes. *Materials Transactions - MATER TRANS*, 48, 1901–1906. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2007071>
- [151] Nacucchi, M., De Pascalis, F., Scatto, M., Capodieci, L., & Albertoni, R. (2016). Structural analysis of advanced polymeric foams by means of high resolution X-ray computed tomography. *AIP Conference Proceedings*, 1749(1), 020009. <https://doi.org/10.1063/1.4954492>
- [152] Babcsán, N., Beke, S., Szamel, G., Börzsönyi, T., Szabó, B., Mokso, R., Kádár, C., & Kiss, J. B. (2014a). Characterisation of ALUHAB Aluminium Foams with Micro-CT. <https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2014.07.598>
- [153] Sharma, V.; Zivic, F.\*; Grujovic, N.; Babcsan N, Babcsan J, (2019b). Numerical Modeling and Experimental Behavior of Closed-Cell Aluminum Foam Fabricated by the Gas Blowing Method under Compressive Loading, *Materials* 2019, 12, 1582; ISSN 1996-1944, <https://doi:10.3390/ma12101582>
- [154] Elmoutaouakkil, A., Salvo, L., Maire, É., & Peix, G. (2002). 2D and 3D Characterization of Metal Foams Using X-ray Tomography. *Advanced Engineering Materials*, 4(10), 803–807.
- [155] Saadatfar, M., Garcia-Moreno, F., Hutzler, S., Sheppard, A. P., Knackstedt, M. A., Banhart, J., & Weaire, D. (2009). Imaging of metallic foams using X-ray micro-CT. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 344(1–3), 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.01.008>
- [156] Ghazi, A., Berke, P., tiago, carlos, & Massart, T. (2020). Computed tomography based modelling of the behaviour of closed cell metallic foams using a shell approximation. *Materials & Design*, 108866. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108866>
- [157] DIN 50134:2008-10 TESTING OF METALLIC MATERIALS - COMPRESSION TES. (n.d.). Retrieved May 18, 2022, from
-



- [https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-50134-2008-10-393489\\_saig\\_din\\_din\\_892977/](https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/din-50134-2008-10-393489_saig_din_din_892977/)
- [158] ASTM International—ASTM G119-09—Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion | Engineering360. (n.d.). Retrieved May 18, 2022, from <https://standards.globalspec.com/std/3837188/ASTM%20G119-09>
- [159] Celis, J.-P., & Ponthiaux, P. (2006). Tribocorrosion. *Wear*, 261(9), 937–938. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03>
- [160] Yan, Y. (Ed.). (2013). *Bio-tribocorrosion in biomaterials and medical implants*. WP, Woodhead Publ.
- [161] Rabinowicz, E. (1995a). *Friction and wear of materials* (2. ed). Wiley.
- [162] ASM handbook. 18: *Friction, lubrication, and wear technology* (5. print). (2006). ASM International.
- [163] Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2005). *Engineering tribology*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [164] Mischler, S., Debaud, S., & Landolt, D. (1998). Wear-Accelerated Corrosion of Passive Metals in Tribocorrosion Systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 145(3), 750. <https://doi.org/10.1149/1.1838341>
- [165] Celis, J.-P., Ponthiaux, P., & Wenger, F. (2006). Tribo-corrosion of materials: Interplay between chemical, electrochemical, and mechanical reactivity of surfaces. *Wear*, 261, 939–946. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.027>
- [166] Landolt, D. (2006). Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 3121–3127. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/15/S01>
- [167] Landolt, D., & Mischler, S. (Eds.). (2011). *Tribocorrosion of passive metals and coatings*. WP, Woodhead Publ.
- [168] Hutchings, I. M., & Hutchings, I. M. (1992). *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. Edward Arnold.
- [169] Gee, M., Neale, M. (2001). *A Guide to Wear Problems and Testing for Industry*. United Kingdom: Elsevier Science.
- [170] *Tribology Data Handbook: An Excellent Friction, Lubrication, and Wear Resource*. (1997). United States: CRC Press.
- [171] Hu, Y., Fang, Q. Z., Sha, B. L., & Zhao, M. (2018). Effect of the large cells on the fatigue properties of closed-cell aluminum alloy foam. *Composite Structures*, 200, 59–68. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.05.087>
- [172] Chunhui, K.; Liubiao, C.; Xianlin, W.; Yuan, Z.; Junjie, W. Thermal Conductivity of Open Cell Aluminum Foam and Its Application as Advanced Thermal Storage Unit at Low Temperature. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47, 4.
- [173] Ma, Y., Yang, X., He, C., Yang, K., Xu, J., Sha, J., Shi, C., Li, J., & Zhao, N. (2018). Fabrication of in-situ grown carbon nanotubes reinforced aluminum alloy matrix composite foams based on powder metallurgy method. *Materials Letters*, 233, 351–354. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2018.09.051>
- [174] Hajimohammadi, A., Ngo, T., Mendis, P., & Sanjayan, J. (2017). Regulating the chemical foaming reaction to control the porosity of geopolymer foams. *Materials and Design*, 255–265.
- [175] Mardani, A., Jusoh, A., MD Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 28(1), 516–571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>

- 
- [176] Opricovic, S. (1998) Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 302 p.
- [177] Gao, Z., Liang, R. Y., & Xuan, T. (2019a). VIKOR method for ranking concrete bridge repair projects with target-based criteria. *Results in Engineering*, 3, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100018>
- [178] Kim, J. H., & Ahn, B. S. (2019). Extended VIKOR method using incomplete criteria weights. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 126(C), 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.02.019>
- [179] Narayanamoorthy, S., Geetha, S., Rakkiyappan, R., & Joo, Y. H. (2019). Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy entropy based VIKOR method for industrial robots selection. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 121(C), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.015>
- [180] Kiani, B., Liang, R.Y., & Gross, J. (2018). Material selection for repair of structural concrete using VIKOR method. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 489-497.
- [181] Do, J. , & Kim, D. (2012). AHP-Based Evaluation Model for Optimal Selection Process of Patching Materials for Concrete Repair: Focused on Quantitative Requirements. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6 (2). doi: 10.1007/s40069-012-0009-9
- [182] Rai, D., Jha, G. K., Chatterjee, P., & Chakraborty, S. (2013). Material Selection in Manufacturing Environment Using Compromise Ranking and Regret Theory-based Compromise Ranking Methods: A Comparative Study. <https://doi.org/10.13189/UJMS.2013.010210>
- [183] Zindani, D., & Kumar, K. (2018). Material Selection for Turbine Seal Strips using PROMETHEE-GAIA Method. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 17533–17539. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.069>
- [184] Gul, M., Celik, E., Gumus, A. T., & Guneri, A. F. (2018). A fuzzy logic based PROMETHEE method for material selection problems. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.07.002>
- [185] Brifcani, N., Day, R., Walker, D., Hughes, S., Ball, K., & Price, D. (2012). A Review of Cutting-edge Techniques for Material Selection. Undefined. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-of-Cutting-edge-Techniques-for-Material-Brifcani-Day/eb2471181bb9b520e86c4745a8bf0d72a0affc37>
- [186] Zhang, H., Peng, Y., Tian, G., Wang, D., & Xie, P. (2017). Green material selection for sustainability: A hybrid MCDM approach. *PLOS ONE*, 12(5), e0177578. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177578>
- [187] Kumar, R., & Singal, S. K. (2015). Penstock material selection in small hydropower plants using MADM methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 240–255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.018>
- [188] Chakraborti, P. C., & Mitra, M. K. (2007). Microstructure and tensile properties of high strength duplex ferrite–martensite (DFM) steels. *Materials Science and Engineering: A*, 466(1–2), 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.042>
- [189] Black, J. T., & Kohser, R. A. (2019). *DeGarmo’s materials and processes in manufacturing* (Thirteenth edition). Wiley.
- [190] Ramazani, A., Bruehl, S., Abbasi, M., Bleck, W., & Prahl, U. (2016). The Effect of Bake-Hardening Parameters on the Mechanical Properties of Dual-Phase
-

- Steels. *Steel Research International*, 87(11), 1559–1565.  
<https://doi.org/10.1002/srin.201600060>
- [191] ArcelorMittal TRIP 690 Very High Strength Cold Rolled Steel. (n.d.). Retrieved May 19, 2022, from <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3222278ca7794b12a7155a4a2b5cf528>
- [192] Stavehaug, F. (1990). Transformation toughening of  $[\gamma]'$ -strengthened metastable austenitic steels [Thesis, Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/103191>
- [193] Honeycombe, R., Bhadeshia, H. K. D. H., Bhadeshia, H. (2006). *Steels : microstructure and properties*. London: Elsevier Science.
- [194] Frommeyer, G., Brück, U., & Neumann, P. (2003). Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes. *ISIJ International*, 43(3), 438–446. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.438>
- [195] Sadegh, A. M., & Worek, W. M. (Eds.). (2018). *Marks' standard handbook for mechanical engineers* (Twelfth edition). McGraw-Hill Education.
- [196] Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- [197] Banhart, J., Baumeister, J.D., & Weber, M. (1995). *Powder Metallurgical Technology for the Production of Metallic Foams*.
- [198] Cobo, R., Hernandez, R., Benito, J., & Riera, D. (2011, June 5). Young's modulus variation during unloading for a wide range of AHSS steel sheets.
- [199] Doege, E., Kulp, S., & Sunderkötter, C. (2002). Properties and application of TRIP-steel in sheet metal forming. *Steel Research*, 73(6–7), 303–308. <https://doi.org/10.1002/srin.200200213>
- [200] Billur, E., Cetin, B., Uguz, R., Davut, K., & Arslan, E. (2016, May 11). *Advanced Material Characterization of TWIP Steels*.
- [201] Horvath, C. (2010). *Advanced steels for lightweight automotive structures*. <https://doi.org/10.1533/9781845697822.1.35>
- [202] Ashby, M. F. (2000). *Metal foams: A design guide*. Butterworth-Heinemann.
- [203] Park, I.-J., Kim, S.-T., Lee, I.-S., Park, Y.-S., & Moon, M. B. (2009). A Study on Corrosion Behavior of DP-Type and TRIP-Type Cold Rolled Steel Sheet. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 50(6), 1440–1447. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008252>
- [204] Kannan, M. B., Raman, R. K. S., Khoddam, S., & Liyanaarachchi, S. (2013). Corrosion behavior of twinning-induced plasticity (TWIP) steel: TWIP steel corrosion. *Materials and Corrosion*, 64(3), 231–235. <https://doi.org/10.1002/maco.201106356>
- [205] Meya, R., Kusche, C. F., Lötbe, C., Al-Samman, T., Korte-Kerzel, S., & Tekkaya, A. E. (2019). Global and High-Resolution Damage Quantification in Dual-Phase Steel Bending Samples with Varying Stress States. *Metals*, 9(3), 319. <https://doi.org/10.3390/met9030319>
- [206] ArcelorMittal TRIP 690 Very High Strength Cold Rolled Steel. (n.d.). Retrieved May 19, 2022, from <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3222278ca7794b12a7155a4a2b5cf528>

- 
- [207] TWIP steel. (n.d.). Thyssenkrupp. Retrieved May 19, 2022, from <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/precision-steel-strip/product-details/twip-and-trip-steel/>
- [208] TRIP steels. (n.d.). Retrieved May 19, 2022, from [https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first\\_gen\\_AHSS/TRIP](https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first_gen_AHSS/TRIP)
- [209] TWIP steel. (n.d.). Thyssenkrupp. Retrieved May 19, 2022, from <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/precision-steel-strip/product-details/twip-and-trip-steel/>
- [210] Li, N., Sheikh-Ahmad, J. Y., El-Sinawi, A., & Krishnaraj, V. (2019). Multi-objective optimization of the trimming operation of CFRPs using sensor-fused neural networks and TOPSIS. *Measurement*, 132, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.057>
- [211] Suneesh, E. (2019). Multi-response optimisation of micro-milling parameters through GRA, TOPSIS and Taguchi techniques to increase production rate while reducing energy consumption. *Measurement*, S0263224119304294. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.090>
- [212] Maity, S., & Chakraborty, S. (2015). Tool steel material selection using PROMETHEE II method. <https://doi.org/10.1007/S00170-014-6760-0>
- [213] Findik, F., & Turan, K. (2012). Materials selection for lighter wagon design with a weighted property index method. *Materials & Design*, 37, 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.016>
- [214] Linul, E., Movahedi, N., & Marsavina, L. (2018). The temperature and anisotropy effect on compressive behavior of cylindrical closed-cell aluminum-alloy foams. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 1172–1179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.102>
- [215] Yang, D., Wang, H., Guo, S., Chen, J., Xu, Y., Lei, D., Sun, J., Wang, L., Jiang, J., & Ma, A. (2019). Coupling Effect of Porosity and Cell Size on the Deformation Behavior of Al Alloy Foam under Quasi-Static Compression. *Materials*, 12(6), 951. <https://doi.org/10.3390/ma12060951>
- [216] Jang, W.-Y., Kyriakides, S., & Kraynik, A. M. (2010). On the compressive strength of open-cell metal foams with Kelvin and random cell structures. *International Journal of Solids and Structures*, 47(21), 2872–2883. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.06.014>
- [217] Sullivan, R. M., Ghosn, L. J., & Lerch, B. A. (2008). A general tetrakaidecahedron model for open-celled foams. *International Journal of Solids and Structures*, 45(6), 1754–1765. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.10.028>
-

---

## 9. BIOGRAFIJA

Varun Šarma je rođen 12.05.1989. godine u Chandigarh-u u Indiji. Srednjoškolsko obrazovanje završio je u Indiji 2006 godine. Završio je osnovne studije na Mašinskom fakultetu Punjab Technical University, Jalandhar (Indija) od 2006-2010. Tokom osnovnih studija bio je na obaveznoj praksi u industriji u kompaniji TATA Steel (bivši Bhushan Power and Steel Limited, Indija), u okviru odeljenja za toplo i hladno valjanje. Nakon završenih osnovnih studija, radio je kao inženjer mašinstva u Indijskoj službi vojne tehnike u okviru Nitasha Constructions u postrojenju za prečišćavanje vode.

2011. godine upisao je Master studije na Ernst Abe Univerzitetu primenjenih nauka (Ernst Abbe University of applied science aascientific Instrumentation), Jena, Nemačka. Tokom master studija proveo je šestomesečno istraživačko stažiranje u TATA Seel (Holandija) od jula 2013. do decembra 2013. Tema praktičnog master rada bila je "Rasprstranjenost veličine pore i efekta infiltracije vrućeg metala na varostalnu ciglu u visokoj peći" i realizovana je u okviru zajedničkog projekta između RHI AG i Univerziteta Leoben (Univrstity of Leoben), Austrija, od januara 2014. do juna 2014 godine. Primao je OEAD stipendiju tokom izrade master rada. Zadatak rada bio je eksperimentalno testiranje i FEM/FEA analiza kako bi se utvrdio uticaj oblika uzorka na ponašanje uzorka pod pritiskom prilikom ispitivanja na hladno. Master studije završio je u julu 2014. godine, sa prosečnom ocenom 2.2.

Od oktobra 2015. do oktobra 2018. godine radio je na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, kao istraživač u okviru SELECTA projekta, grant br. 642642 – SELECTA – H2020-MSCA-INT-2014, koji je finansiran od strane Evropske komisije iz programa Horizon 2020, fondacije Marie Sklodowska-Curie. Doktorske akademske studije je upisao 2015/2016. godine na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu i uspešno položio sve ispite predviđene planom i programom.

Trenutno je zapošljen kao konsultant u najvećoj indijskoj CAM/CAD/CAE organizaciji. Zaposlen je na poslovima pružanja sveobuhvatne tehničke podrške klijentima (fakulteti, proizvođači originalne opreme, industrija i istraživački centri) u severnom i istočnom delu Indije. Posao obavlja koristeći Simulia paket (ABAKUS, TOSCA, FE -SAFE, ISight). Klijentima pomaže u razvoju realističnih modela konačnih elemenata (FEM) u virtuelnom okruženju.

---

## 10. IZJAVA O AUTORSTVU

### *Образац 1*

#### ***ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ***

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

**РАЗВОЈ И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПОРОЗНИХ СТРУКТУРА ОД АЛУМИНИЈУМА**

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

*Овом Изјавом такође потврђујем:*

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 22. 08. 2022 године,

---

потпис аутора

Варун Шарма (Varun Sharma)

**Образац 2**

***ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ***

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:  
РАЗВОЈ И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПОРОЗНИХ СТРУКТУРА ОД АЛУМИНИЈУМА  
истоветне.

У Крагујевцу, 22. 08. 2022 године,

---

потпис аутора

Варун Шарма (Varun Sharma)



**Образац 3****ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Варун Шарма,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

**РАЗВОЈ И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПОРОЗНИХ СТРУКТУРА ОД АЛУМИНИЈУМА**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада**
- 4) Ауторство - некомерцијално

- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада

У Крагујевцу, 22. 08. 2022. године,

---

потпис аутора

Варун Шарма (Varun Sharma)