

Modeliranje zamornog ponašanja sinteriranog čelika pri visokocikličkom zamoru uz razmatranje utjecaja mikrostrukture

Stuhne, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:769207>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dario Stuhne

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tomislav Lesičar

Student:

Dario Stuhne

Zagreb, 2020.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

Zagreb, studeni 2020.

Dario Stuhne

ZAHVALA

Prije svega zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Tomislavu Lesičaru na pomoći kod odabira teme, i na svim razgovorima i stručnim savjetima koji su pomogli u izradi ovog diplomskog rada. Također, hvala na svim ispravicima, sugestijama i komentarima koji su doprinijeli povećanju kvalitete ovog rada.

Isto tako, ovim putem se želim zahvaliti izv. prof. dr. sc. Tomislavu Jarku i prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću na svim diskusijama i savjetima vezanima uz problematiku ovog diplomskog rada. Prof. dr. sc. Zdenku Tonkoviću se ovim putem dodatno zahvaljujem na približavanju tematike zamora materijala, bez čijeg poznavanja ovaj rad ne bi bio moguć.

Posebna zahvala ide doktorandu Zoranu Tomiću, mag. ing. mech., na pruženim stručnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Također, zahvaljujem mu se na vremenu i uputama koje su mi pomogle lakšem savladavanju programskih paketa Abaqus i fe-safe.

Želim se zahvaliti kolegama Mateju Mlinariću i Božidaru Joliću na svim izmijenjenim informacijama i razgovorima.

Veliko hvala upućujem svom dugogodišnjem prijatelju i cimeru Zvonimiru, kao i svim prijateljima i kolegama sa smjera KIRP, koji su mi olakšali i uljepšali studiranje i ispunili ga smijehom i podrškom.

Svoju zahvalnost dugujem obitelji, majci Dubravki, ocu Darku i bratu Tihomiru, koji su me podržavali duhovno i materijalno tijekom cijelog obrazovanja. Hvala vam na svojoj pruženoj ljubavi, pomoći i odricanju. Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima koju su mi pomogli da postanem čovjek kakav jesam danas.

Na koncu, najposebnije hvala iskazujem mojoj voljenoj Dorotei, na svojoj pruženoj ljubavi, podršci, strpljivosti i razumijevanju. Hvala ti na radosti kojom si me svakodnevno ispunjavala u teškim i lijepim trenucima studija, kao i na snazi i hrabrosti koju si mi ulijevala da neprestano koračam prema naprijed.

Zagreb, studeni 2020.

Dario Stuhne



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dario Stubne**

Mat. br.: 0035203582

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje zamornog ponašanja sinteriranog čelika pri visokocikličkom zamoru uz razmatranje utjecaja mikrostrukture**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling of high cyclic fatigue behaviour of sinter steel by considering microstructural effects**

Opis zadatka:

Tehnologija metalurgije praha pokazuje znatne prednosti u usporedbi s klasičnom metalurgijom zbog nižih proizvodnih troškova, manjeg utjecaja na okoliš te visoke iskoristivosti materijala. Zbog prethodno navedenih prednosti proteklih godina došlo je ubrzanog rasta proizvodnje konstrukcijskih komponenta od sinteriranog čelika. Proizvodnja konstrukcijskih komponenta postupkom sinteriranja provodi se tlačenjem praškastog materijala u kalupu u konačni oblik, nakon čega slijedi toplinska obrada. Međutim, zbog specifičnog načina proizvodnje, u jezgri materijala dolazi do pojave poroznosti, čiji udio i oblik ovise o proizvodnim parametrima. Povezane pore koje uzrokuju lokalizaciju deformacija između čestica imaju znatan utjecaj na zamorno ponašanje sinteriranog čelika, kao i izolirane pore koje utječu na način deformiranja materijala. Da bi numeričke simulacije čim preciznije opisivale konstitutivno ponašanje sinteriranog čelika, potrebno je višerazinsko modeliranje materijala, koje omogućuje procjenu ponašanja materijala na makrorazini na temelju poznate geometrije i materijalnih svojstava mikrokonstituenta.

U ovom diplomskom radu razmatrat će se utjecaj mikrostrukture sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C gustoće $7,1g/cm^3$ na njegovo ponašanje u uvjetima visokocikličkog zamora. Potrebno je:

1. Proučiti potrebnu literaturu vezanu uz numeričko modeliranje zamornog ponašanja materijala i modeliranje heterogenih materijala.
2. Odrediti odgovarajuću veličinu i geometriju reprezentativnog volumenskog elementa (RVEa) za zadani materijal. Kod nametanja opterećenja na RVE primijeniti rubne uvjete periodičnosti ili rubne uvjete pomaka. Ukoliko je potrebno, za modeliranje mikrostrukture materijala i nametanje rubnih uvjeta primijeniti komercijalni programski paket Digimat.
3. Odrediti materijalne karakteristike linearno elastičnog i visokocikličkog zamornog ponašanja sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C.
4. Ako je moguće, validirati dobivene numeričke rezultate usporedbom s eksperimentom.

Za provedbu numeričkih simulacija primijeniti komercijalni programski paket Abaqus. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

24. rujna 2020.

26. studenoga 2020.

30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadan:

Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Tomislav Lesičar

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
1.1. Motivacija	3
2. TEORIJSKA POZADINA RADA	5
2.1. O metalurgiji praha	5
2.1.1. Proizvodnja praha	7
2.1.2. Miješanje prahova	8
2.1.3. Kompaktiranje praha	9
2.1.4. Sinteriranje	10
2.2. O sinteriranim čelicima i poroznosti	11
2.2.1. Legirajući elementi	13
2.2.2. Sinterirani čelici klase Astaloy Mo	13
2.3. Metoda konačnih elemenata	14
2.3.1. Osnovni pravokutni element	15
2.3.2. Ravninsko stanje naprežanja i ravninsko stanje deformacija	19
2.4. Zamorno ponašanje materijala	21
2.4.1. Uvodno o zamoru materijala	21
2.4.2. Statički vlačni pokus	22
2.4.3. Zamorna nomenklatura	23
2.4.4. Pristupi procjeni zamora	25
2.4.5. Wöhlerova krivulja (S – N krivulja)	25
2.4.6. Visokociklički i niskociklički zamor	26
2.4.7. S – N krivulja	27
2.4.8. Utjecaj srednjeg naprežanja na zamornu čvrstoću	28
2.4.9. Palmgren-Minerova hipoteza linearne akumulacije zamora materijala	30
2.5. Modeliranje heterogenih materijala	32
2.5.1. Reprezentativni volumenski element (RVE)	32
3. ODREĐIVANJE REPREZENTATIVNOG VOLUMENSKOG ELEMENTA	34
3.1. Metalografska struktura čelika Astaloy Mo+0,2C	34
3.2. Metoda odabira veličine RVEa	37
3.3. Validacija metode odabira veličina RVEa	39
3.4. Konvergencija rezultata odabrane veličine RVEa	43
4. ODREĐIVANJE MATERIJALNIH KARAKTERISTIKA SINTERIRANOG ČELIKA ASTALOY Mo+0,2C	45
4.1. Linearno-elastične karakteristike sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C	45
4.2. Zamorne karakteristike sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C	50

4.2.1. Metoda za određivanje zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C.....	56
4.2.2. Rezultati.....	60
4.2.2.1. Lom uslijed horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja.....	61
4.2.2.2. Lom uslijed horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu	64
4.2.2.3. Lom uslijed vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja.....	66
4.2.2.4. Lom uslijed vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu	68
4.2.3. Zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C	70
5. ZAKLJUČAK	71
LITERATURA.....	73

POPIS SLIKA

Slika 1. Proizvodi napravljeni postupcima metalurgije praha [1].....	2
Slika 2. Tok osnovnih procesa metalurgije praha.....	6
Slika 3. Oblici čestica praha [3]	8
Slika 4. Miješanje i umješavanje prahova [3].....	8
Slika 5. Ciklus kompaktiranja u tri etape [5]	9
Slika 6. Rana i kasnija faza sinteriranja (s lijeva na desno) [5].....	10
Slika 7. Metalografija mikrostrukture sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C	12
Slika 8. Osnovni pravokutni konačni element [12]	16
Slika 9. Faze rasta pukotine uslijed zamora materijala	21
Slika 10. Stvarni i inženjerski dijagram naprezanje-deformacija.....	22
Slika 11. Cikličko opterećenje i naprezanje [15]	23
Slika 12. Wöhlerov dijagram	26
Slika 13. Kvalitativni prikaz područja nisko- i visokocikličkog zamora.....	27
Slika 14. Kvalitativni prikaz idealizirane S – N krivulje.....	28
Slika 15. Utjecaj srednjeg naprezanja na zamornu čvrstoću	28
Slika 16. Haighov dijagram	29
Slika 17. Opterećenje s varijabilnim amplitudama.....	30
Slika 18. Tipičan dvodimenzionalni reprezentativni volumenski element [18].....	33
Slika 19. Prikaz epruvete načinjene od Astaloy Mo-0,2C.....	34
Slika 20. Dimenzije i oblik standardne epruvete.....	34
Slika 21. Metalografska snimka polirane epruvete uvećane 50x.....	35
Slika 22. Digitalizirana metalografska snimka	36
Slika 23. Prostorni raspored RVEa na promatranom području mikrostrukture	38
Slika 24. Konačne veličine RVEa.....	39
Slika 25. Nametnuti rubni uvjeti i opterećenje (a. slika slijeva, b. slika zdesna)	40
Slika 26. Položaj točke P na RVEima za horizontalni i vertikalni vlačni test.....	41
Slika 27. Dijagram naprezanje-deformacija za horizontalni vlačni test.....	41
Slika 28. Dijagram naprezanje-deformacija za vertikalni vlačni test.....	42
Slika 29. Uprosječeni dijagram naprezanje-deformacija za sve RVEe	42
Slika 30. Konvergencija ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu u točki P.....	44
Slika 31. Dijagrami ovisnosti modula elastičnosti, granice tečenja i vlačne čvrstoće o gustoći sinteriranog čelika	45
Slika 32. Dijagram naprezanje-deformacija sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C na makrorazini.....	46
Slika 33. Linearno-elastično područje dijagrama naprezanje-deformacija na makrorazini	47
Slika 34. Rubni uvjeti i opterećenje RVE020 za određivanje modula elastičnosti metalne matrice	48
Slika 35. Moduli elastičnosti metalne matrice	49
Slika 36. S-N dijagram homogenog materijala na makrorazini	53

Slika 37. Rubni uvjeti pomaka i opterećenje kod određivanja zamornih karakteristika sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C.....	54
Slika 38. Rezultati linearno-elastične analize za slučaj horizontalnog opterećenja.....	55
Slika 39. Rezultati linearno-elastične analize za slučaj vertikalnog opterećenja.....	55
Slika 40. Dijagram toka za određivanje zamornih karakteristika feritne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C.....	59
Slika 41. Rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1.....	61
Slika 42. Područje loma kod horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1.....	62
Slika 43. Rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2.....	63
Slika 44. Područje loma kod horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2.....	63
Slika 45. Rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1.....	64
Slika 46. Područje loma kod horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1.....	64
Slika 47. Rezultat analize zamora horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2.....	65
Slika 48. Područje loma kod horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2.....	65
Slika 49. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1.....	66
Slika 50. Područje loma kod vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1.....	66
Slika 51. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2.....	67
Slika 52. Područje loma kod vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2.....	67
Slika 53. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1.....	68
Slika 54. Područje loma kod vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1.....	68
Slika 55. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2.....	69
Slika 56. Područje loma kod vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2.....	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci metalurgije praha.....	7
Tablica 2. Odabrane veličine RVEa	37
Tablica 3. Elastično idealno plastične karakteristike materijala za provedbu validacije.	40
Tablica 4. Broj korištenih konačnih elemenata	40
Tablica 5. Materijalne karakteristike sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C gustoće 7,1 g/cm ³	45
Tablica 6. Određivanje modula elastičnosti metalne matrice	48
Tablica 7. Usporedba statičkih mehaničkih svojstava sinteriranih čelika	51
Tablica 8. Zamorne karakteristike sinteriranog čelika Distaloy AB	51
Tablica 9. Ovisnost amplitude naprezanja o broju promjena ciklusa do loma.....	52
Tablica 10. Način određivanja efektivne amplitude naprezanja.....	56
Tablica 11. Zajedničke varijable pri provedbi ispitivanja zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2.....	60
Tablica 12. Konačne vrijednosti zamornih karakteristika za pojedini slučaj	60
Tablica 13. Zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C	70

POPIS OZNAKA

Latinične oznake	Opis
a, b	dimenzije pravokutnog konačnog elementa
\mathbf{a}	matrica koeficijenata u interpolacijskim polinomima
a_i	koeficijenti interpolacijskih polinoma
A	veličina poprečnog presjeka epruvete u opterećenom stanju
A_0	veličina poprečnog presjeka epruvete u neopterećenom stanju
b	eksponent zamorne čvrstoće
b_{mm}	eksponent zamorne čvrstoće metalne matrice
\mathbf{B}	matrica međusobne ovisnosti deformacije u elementu i pomaka u čvorovima, operator rubnih veličina
\mathbf{C}	matrica međusobne ovisnosti stupnjeva slobode i koeficijenata interpolacijskih polinoma
D	kumulativno oštećenje
\mathbf{D}	matrica elastičnosti
\mathbf{D}_k	kinematički diferencijalni operator
e	inženjerska deformacija
E	modul elastičnosti; Youngov modul
E_{mm}	modul elastičnosti metalne matrice
f	frekvencija, frekvencija opterećivanja
F	sila
F_a	amplituda opterećenja
F_m	srednja vrijednost opterećenja
$F(t)$	opterećenje silom zavisno o vremenu
i	broj čvora konačnog elementa
k	koeficijent smjera pravca
l	duljina opterećene epruvete
l_0	duljina neopterećene epruvete
m	odsječak pravca na osi y
n	broj konačnih elemenata, broj ciklusa naprezanja
N	broj ciklusa naprezanja

N	matrica funkcija oblika
N_f	broj ciklusa do loma
$2N_f$	broj promjena ciklusa do loma
N_i	funkcija oblika za čvor i
p	kontinuirano opterećenje
p_{acad}	postotak poroznosti unutar AutoCAD-a
$p_{RVE,uk}$	postotci poroznosti svih RVEa
p_t	teorijski postotak poroznosti
r	odnos naprezanja
R_e	granica tečenja materijala
R_m	vlačna čvrstoća materijala
S	inženjersko naprezanje, naprezanje
S	matrica elastičnih konstanti materijala i koordinata čvorova konačnog elementa
S_a	amplituda naprezanja
S_{a0}	efektivna amplituda naprezanja za srednje naprezanje $S_m = 0$
S_m	srednje naprezanje
S_{ult}	vlačna čvrstoća materijala
$S_{ult,A}$	vlačna čvrstoća sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C
$S_{ult,RVE}$	vlačna čvrstoća RVEa
S_y	granica tečenja materijala
S'_f	koeficijent zamorne čvrstoće
$S'_{f,mm}$	koeficijent zamorne čvrstoće metalne matrice
S_r^{FL}	trajna dinamička čvrstoća materijala za odnos naprezanja r
t	vrijeme
u	vektor polja pomaka
u_1	rubni uvjet pomaka u smjeru osi x
u_2	rubni uvjet pomaka u smjeru osi y
u_i	pomak i -tog čvora konačnog elementa u smjeru osi x
v	vektor stupnjeva slobode u lokalnom koordinatnom sustavu
v_i	pomak i -tog čvora konačnog elementa u smjeru osi y
x	duljina brida RVEa

x, y	Kartezijeve koordinate
Grčke oznake	Opis
α	matrica funkcija u interpolacijskim polinomima
γ_{xy}	kutna deformacija u Kartezijevom koordinatnom sustavu
ε	stvarna deformacija, deformacija
$\boldsymbol{\varepsilon}$	tenzor deformacije
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	duljinske deformacije u Kartezijevom koordinatnom sustavu
ν	Poissonov faktor
$\rho_{\check{c}}$	gustoća klasičnog čelika
ρ_{epr}	teorijska gustoća epruvete sinteriranog čelika
σ	stvarno naprezanje, naprezanje
σ_a	amplituda naprezanja
σ_d	donje naprezanje, minimalni iznos naprezanja
σ_g	gornje naprezanje, maksimalni iznos naprezanja
σ_m	srednja vrijednost naprezanja
$\sigma(t)$	naprezanje zavisno o vremenu
$\boldsymbol{\sigma}$	tenzor deformacije
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	normalne komponente naprezanja u Kartezijevom koordinatnom sustavu
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	tangencijalne komponente naprezanja u Kartezijevom koordinatnom sustavu
φ	fazni kut opterećivanja
ω	kružna frekvencija opterećivanja

SAŽETAK

Tehnologija metalurgije praha ima brojne prednosti nad klasičnom metalurgijom. No, kod proizvodnje dijelova tehnologijom metalurgije praha zbog postupka koji se sastoji od tlačenja praškastog materijala u kalupu koji se nakon toga zagrijava na odgovarajuću temperaturu u nekom vremenskom intervalu, u gotovom proizvodu dolazi do pojave zaostale poroznosti. Stoga je ovom diplomskom radu razmatran utjecaj mikrostrukture sinteriranog čelika na njegovo zamorno ponašanje u uvjetima visokocikličkog zamora. U radu je razmatran sinterirani čelik Astaloy Mo+0,2C. Detaljno je objašnjena metodologija numeričkog modeliranja zamora materijala i konstitutivnog ponašanja heterogenih materijala. Na temelju metalografskih ispitivanja je određen reprezentativni volumenski element (RVE) koji statistički predstavlja ponašanje mikrostrukture heterogenog materijala. Nadalje, određene su linearno-elastične karakteristike feritne matrice sinteriranog čelika primjenom homogenizacije na prethodno definiranom RVEu, koje su poslužile kao temelj prilikom procjene visokocikličkog zamora. Numeričke simulacije su provedene u programsku paketu *Abaqus*. Nakon određivanja linearno elastičnog ponašanja, određene su zamorne karakteristike feritne matrice Astaloya Mo+0,2C uz eksplicitno razmatranje mikrostrukture materijala. Kod određivanja zamornih karakteristika feritne matrice u uvjetima visokocikličkog zamora, razmatrana su dva slučaja: bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja i s razmatranjem utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu. Numeričke simulacije zamornog ponašanja provedene su u programskom paketu *fe-safe*. Nažalost, eksperimentalna ispitivanja mehaničkih karakteristika Astaloya Mo+0,2C nisu u potpunosti provedena zbog posljedica uzrokovanih pandemijom koronavirusa Covid-19. Zbog toga nije bila moguća validacija rezultata numeričkih simulacija, a materijalne karakteristike materijala nužne za provedbu numeričkih analiza su preuzete iz literature.

Ključne riječi: metalurgija praha, sinterirani čelik Astaloy Mo+0,2C, reprezentativni volumenski element, visokociklički zamor, modeliranje heterogenih materijala

SUMMARY

Powder metallurgy technology has numerous advantages over classical metallurgy. However, in the production of parts by powder metallurgy technology due to a process consisting of pressing the powdered material in a mold which is then heated to the appropriate temperature in a certain time interval, residual porosity occurs in the finished product. Therefore, this master's thesis discusses the influence of the microstructure of sintered steel on its fatigue behavior under conditions of high-cyclic fatigue. The material considered is sintered steel Astaloy Mo+0.2C. The methodology of numerical modeling of material fatigue and the constitutive behavior of heterogeneous materials is explained in detail. Based on the metallographic testing, a representative volume element (RVE) was determined, which statistically represents the microstructural behavior of the heterogeneous material. Furthermore, the linear-elastic characteristics of the sintered steel ferrite matrix were determined using homogenization on a predefined RVE, which served as a basis in the assessment of high-cyclic fatigue. Numerical simulations were performed in the software package Abaqus. After determining the linear elastic behavior, the fatigue characteristics of the Astaloy Mo+0.2C ferrite matrix were determined by explicit consideration of the material microstructure. During determination the fatigue characteristics of the ferrite matrix under conditions of high-cyclic fatigue, two cases were considered: without the influence of medium stress and with consideration of the influence of medium stress according to Goodman. Numerical simulations of fatigue behavior were performed in the software package fe-safe. Unfortunately, experimental study of the mechanical properties of Astaloy Mo+0.2C has not been fully performed due to the consequences caused by the Covid-19 coronavirus pandemic. Therefore, it was not possible to validate the results of numerical simulations, while the material characteristics necessary for the conduction of numerical analyzes were taken from the literature.

Key words: powder metallurgy, sintered steel Astaloy Mo+0.2C, representative volume element, high-cyclic fatigue, modeling of heterogeneous materials

1. UVOD

Potreba današnjice za što lakšim, učinkovitijim i ekološki prihvatljivim proizvodima, dijelovima ili konstrukcijskim komponentama nikad nije bila toliko sveprisutna i ukorijenjena u društvu. Zadnjih nekoliko desetljeća se pojam održivosti usadio u mnogobrojne infrastrukture, djelatnosti i grane gospodarstva te je postao jedan od glavnih komparativnih karakteristika konkurentnosti tvrtki na tržištu.

Krajnji cilj svake tvrtke je, u suštini, plasirati na tržište proizvod koji zadovoljava trendove današnjice. Primjerice, kada govorimo o postojećim trendovima, pojavljuje se trend smanjenja mase proizvoda uz zadržavanje postojećih mehaničkih svojstava istog (engl. *Lightweight Design*), kako bi se smanjenjem količine materijala potrebne za izradu nekog dijela, pa posljedično smanjenjem proizvodnih troškova, doprinijelo rastu, konkurentnosti i globalizaciji tvrtke na tržištu.

Danas je iznimno bitan trend očuvanja okoliša i općenito očuvanja planeta Zemlje, bilo da je to, npr. smanjenjem emisije CO₂ u atmosferu, ili možebitnim generalnim smanjenjem utjecaja proizvoda, dijela ili konstrukcijske komponente na okoliš.

Metalurgija praha (engl. *Powder Metallurgy*) doprinosi razvoju i stvaranju novih trendova današnjice te ide u korak s očuvanjem postojećih, zbog svoje ekološke prihvatljivosti. Najjednostavnije rečeno, dijelovi izrađeni postupkom metalurgije praha nemaju otpadaka te gotovo da ne zahtijevaju dodatnu površinsku obradu. Time se dovodi do smanjenja cijene proizvodnih troškova i smanjenja potrebe za zbrinjavanjem otpadnih materijala. Očito je, da je metalurgija praha danas itekako bitna grana moderne industrije, iako je puni procvat doživjela, povijesno gledano – nedavno, odnosno sredinom 20. stoljeća, točnije nakon Drugog svjetskog rata [1].

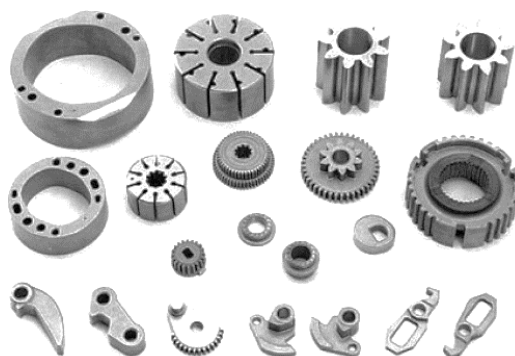
Razvojem novih prahova, koji variraju veličinom zrna i čistoćom praha, te neiscrpnim razvojem novih tehnološko-proizvodnih postupaka u području obrade materijala metalurgijom praha (primjerice, engl. *Powder Bed Metallurgy*), omogućena je izrada dijelova s izvanrednim mehaničkim svojstvima [2]. Istraživanjem novih materijala, a najviše poboljšavanjem postojećih dodavanjem legirajućih elemenata, poput molibdena,

nikla i titana [1] u sastav materijala, dobivene su smjese prahova koje sadrže bolja mehanička svojstva od dosad poznatih prahova.

Dijelovi izrađeni metalurgijom praha primjenjuju se u različitim sferama, no najveću primjenu pronalaze u automobilskoj industriji, gdje se svakodnevno, od začeca automobilske industrije do danas, javlja potreba za preciznim dijelovima male mase kako bi se smanjila potrošnja goriva potrebnog za rad, ali i sam utjecaj na okoliš. Isto tako, sve je veća prisutnost takvih dijelova u vojnoj, svemirskoj i zrakoplovnoj industriji [3].

Zajednički nazivnik maloprije navedenih industrija je smanjenje mase njihovih gotovih proizvoda, koliko god je to moguće u zadanim okvirima, uzimajući u obzir ograničenja postojećih tehnologija. Općenito, veća masa nekog proizvoda posljedično doprinosi većoj potrošnji energije potrebne za pokretanje, rad i izvršavanje pojedinog zadatka i sl.

Dosad je automobilska industrija bila jedan od najvećih korisnika tehnologije metalurgije praha [1,2,3], gdje su prvenstveno koristili tu tehnologiju za izradu konstrukcijskih komponenti motora s unutarnjim izgaranjem i prijenosnika snage i gibanja. Trenutni trend povlačenja dizelskih motora iz europskih metropola, kao i možebitno dugoročno povlačenje dizelskih i benzinskih motora općenito, zbog neposredne proizvodnje štetnih emisija koje odlaze u atmosferu našeg „zelenog“ planeta, znatno će utjecati na korištenje tehnologije metalurgije praha u automobilskoj industriji. Zbog toga, pojavit će se novo područje primjene metalurgije praha, u obliku cijelog spektra magnetskih materijala [1,3], koji bi mogli zaživjeti i u sustavima hibridnih i električnih vozila.



Slika 1. Proizvodi napravljeni postupcima metalurgije praha [1]

Zadatak smanjenja mase konstrukcijskih komponenti je jedan od najvećih izazova današnjice s kojim se gore spomenute industrije susreću. Ovdje se ne smije smetnuti s

uma ni složenost dijelova koje takve industrije zahtijevaju. No, pri korištenju tehnologija postoje ograničenja koja diktiraju što se može, a što ne može napraviti. Ograničenja, kao i tehno-ekonomski aspekti metalurgije praha, bit će detaljnije opisani u nastavku rada.

Glavna odrednica dijelova izrađenih postupcima metalurgije praha je izvanredna fleksibilnost gledano sa strane materijala. Predviđa se da će metalurgija praha, kao znanstvena disciplina, tek ostvariti svoj ogroman potencijal u budućnosti, iako je već ušla na velika vrata u razne industrije. Time će pokazati svoju raskoš nad tradicionalnim postupcima proizvodnje uz naglasak na prijelaz na druge gospodarske grane, van trenutno popularnih područja primjene.

Konačno, sinterirani čelici izrađeni postupkom metalurgije praha su zadnjih godina prestigli klasične legirane i nelegirane čelike zbog niske cijene, visoke mogućnosti primjene u raznim granama industrije te visoke učinkovitosti dijelova. Također, inženjeri su uočili tehno-ekonomske prednosti koje metalurgija praha nudi.

Kombinacijom specijalnih, suvremenih materijala i tehnologije „gotovo konačno izrađenih dijelova“ (engl. *Near Net Shape*), sinterirani čelici i metalurgija praha će postati sve popularniji i zastupljeniji [1].

1.1. Motivacija

Metali, općenito, su najzastupljeniji materijali u strojogradnji. Prilikom eksploatacije u realnim uvjetima, najčešći uzrok njihovog kolapsa je zamor materijala. Od početka proučavanja zamora materijala pa do danas još uvijek postoje neriješena pitanja u tom području [4]. Na zamor materijala neke konstrukcijske komponente utječe: vrsta materijala od kojeg je ista proizvedena, struktura materijala, vrsta opterećenja i prostor, odnosno okolina, u kojoj neki proizvod dio izvršava dio određene funkcije. Promatranje fenomena visokocikličkog zamora materijala na razini mikrostrukture materijala je dio problematike ovog rada.

Standardne metode mogu na pojednostavljeni način proračunati probleme nad jednostavnim konstrukcijama, točnije, saznati mehaničko ponašanje materijala u danim uvjetima. No, proračunavanje složenih geometrija postaje iznimno *zamoran* i težak posao ako se pritom koriste takve metode.

Napretkom tehnologije i pojavom novih numeričkih alata i metoda, testiranje mehaničkih svojstava materijala postalo je znatno jeftinije i brže. Numeričke metode svakim danom smanjuju potrebu za skupim eksperimentalnim ispitivanjima. No, u ovoj poziciji, gdje se pojedine numeričke metode još uvijek istražuju, dorađuju i/ili obogaćuju, eksperimentalna ispitivanja su gotovo pa nezamjenjiva u području verifikacije i validacije numeričkih rješenja.

Gotovo svi materijali su na mikrorazini heterogeni. Svojstvo heterogenosti ima značajan utjecaj na mehaničko ponašanje materijala u eksploataciji istog. Sinterirani čelici su na razini mikrostrukture heterogeni i sadrže pore raznih oblika koje su u pravilu nepravilne. Tlačenjem praškastog materijala u kalupu, koji ima oblik gotovog proizvoda koji se proizvodi, ostaje prazan prostor između čestica praha. Taj prazan prostor predstavlja pore, odnosno poroznost materijala. Svaka pora predstavlja mjesto lokalnog naprezanja u kojem se javlja koncentracija naprezanja, tj. jedan od bitnih parametara pri procjeni zamora materijala.

U životnom vijeku proizvoda, ako uzmemo u obzir broj ciklusa kojeg jedna konstrukcijska komponenta može i/ili mora izdržati, poroznost igra važnu ulogu te je upravo iz tog razloga potrebno istražiti zamorna svojstva sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C na mikrorazini, kako bi se ta svojstva prenijela na makrorazinu, odnosno na neku stvarnu geometriju i oblik. Istraživanjem materijala na mikrorazini numeričkim metodama doprinosi se širem razumijevanju ponašanja mehaničkih svojstava materijala na makrorazini.

Stoga je i ovaj diplomski rad napravljen u sklopu istraživanja utjecaja mikrostrukture sinteriranog čelika na njegove zamorne karakteristike, koje je financirano sredstvima Hrvatske zaklade za znanost, u okviru projekta PZS-2019-02-4177 „Višerazinsko numeričko modeliranje i eksperimentalno istraživanje procesa starenja u sinteriranim konstrukcijskim komponentama“.

2. TEORIJSKA POZADINA RADA

2.1. O metalurgiji praha

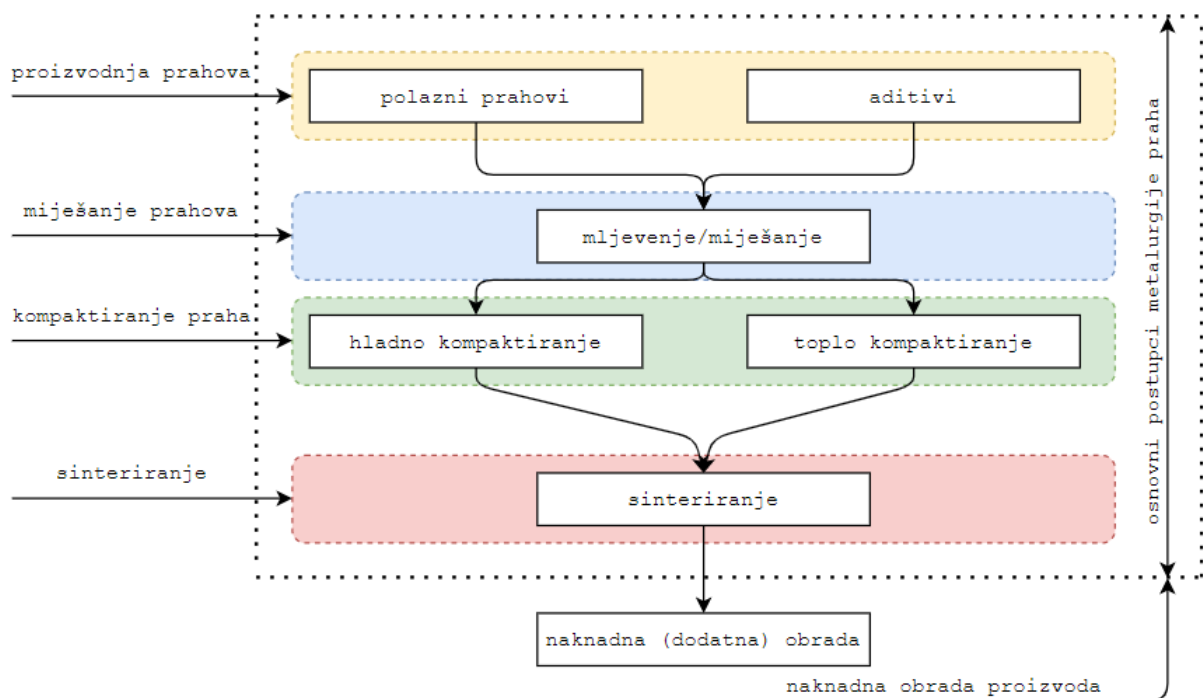
Metalurgija praha je nova grana moderne industrije [1,3] nastala 50-ih godina 20. stoljeća. Njezin intenzivni rast pripisuje se prednostima nad drugim klasičnim proizvodnim postupcima. Razvojem metalurgije praha omogućila se izrada legura iz metala koji nisu topivi jedan u drugome, upravo iz razloga što taljenje nije polazišna točka kod izrade metala i legura u metalurgiji praha. Do gotovih proizvoda se dolazi spajanjem čestica praha te toplinskom obradom istih na temperaturama ispod temperature tališta.

Pod metalurgijom praha podrazumijevamo tehnologiju proizvodnje praha i izrade gotovih dijelova, zagrijavanjem smjese praha malo ispod temperature tališta [1]. Općenito, metalurgija praha obuhvaća sve tehnike za proizvodnju čvrstih proizvoda na bazi metala i njihovih legura. Metal ili legura se pomoću metalurgije praha prevode u gotove proizvode unaprijed određenog oblika. To je ostvarivo isključivo uporabom kalupa, u kojem se pod djelovanjem vanjske sile žiga metalni prah tlači. Zatim, čestice praha srastaju zajedno tako formirajući željeni proizvod.

Konvencionalna procedura proizvodnje dijelova postupkom metalurgije praha može se opisati četirima osnovnim tehnološkim operacijama. To su redom:

- proizvodnja praha,
- stvaranje mješavine prahova,
- kompaktiranje praha i
- sinteriranje.

Iako naknadna obrada sinterirane konstrukcijske komponente nije odrednica metalurgije praha, ista je ponekad potrebna u vidu ostvarivanja bolje površinske obrade, postizanja finijih tolerancija i sl. Cijeli tok osnovnih procesa metalurgije praha prikazan je i vizualno na slici 2.



Slika 2. Tok osnovnih procesa metalurgije praha

Uz svoje višestruke prednosti, metalurgija praha je pokazala neke od nedostataka, zbog čega predstavlja svojevrsnu barijeru u širenje na druge industrije. Usprkos tome, teži se uklanjanju tih nedostataka, kako bi se povećala mogućnost primjene. Najveći konzument dijelova dobivenih metalurgijom praha je automobilska industrija [1,2,3], jer je u metalurgiji praha ista vidjela prednost izrade velikih serija dijelova, relativno manjih dimenzija, u jako kratkom roku u odnosu na konvencionalne metode. Neke prednosti i nedostaci prikazani su tablici 1.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci metalurgije praha

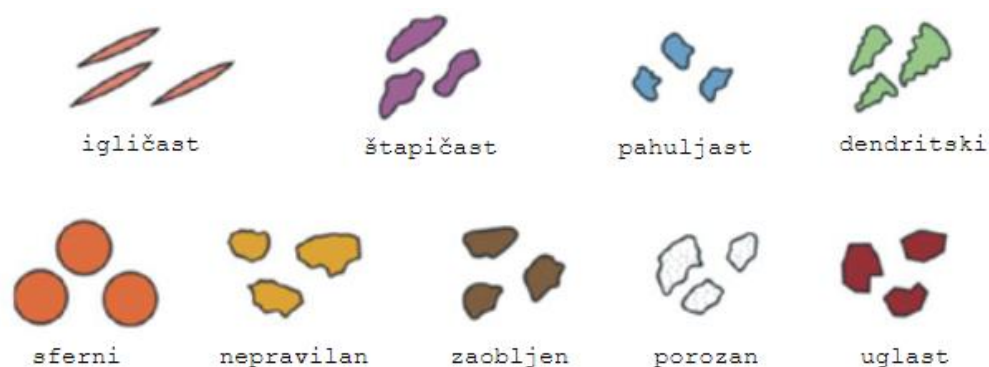
Prednosti	Nedostaci
- točne dimenzije gotovih proizvoda nakon izrade	- visoka cijena prahova i kalupa
- proizvodnja prahova koji su obično netopivi jedan u drugome	- pojava poroznosti u materijalu uz naglasak na lošija mehanička svojstva
- mogućnost izrade velikih serija komada u vrlo kratkom roku	- nemogućnost izrade manjih serija
- mogućnost izrade složenih geometrija	- oblik i dimenzija kompakta su određeni geometrijom kalupa, nova geometrija – novi kalup
- nema otpadnog materijala	- generalno nešto slabija mehanička svojstva nego kod konvencionalnih postupaka proizvodnje
- ekološki prihvatljiva tehnologija	- prahovi se moraju propisno skladištiti

U nastavku će biti detaljnije opisane četiri osnovne tehnološke operacije metalurgije praha.

2.1.1. Proizvodnja praha

Proizvodnja praha je jedan od najznačajnijih postupaka metalurgije praha. Pravilnom karakterizacijom praha i poznavanjem njihove međusobne kompatibilnosti može se postići smjesa praha iznimnih mehaničkih svojstava. U tom području je stavljen najveći fokus na istraživanju, gdje se različitim kombinacijama postojećih prahova, te dodavanjem različitih legirajućih elemenata, pokušava pronaći bolja smjesa praha koja bi odgovorila na tražene potrebe.

Oblik i veličina čestica praha su osnovna svojstva smjese praha. Oblik čestica praha vidljiv je na slici 3. Isti utječe na parametre poput stlačivosti i mogućnosti sinteriranja. Prahove je moguće dobiti jednim od četiri postupka: mehaničkim (udarnim djelovanjem, trenjem, sječenjem i tlačenjem), kemijskim, elektrolitičkim tehnikama i atomizacijom [3].

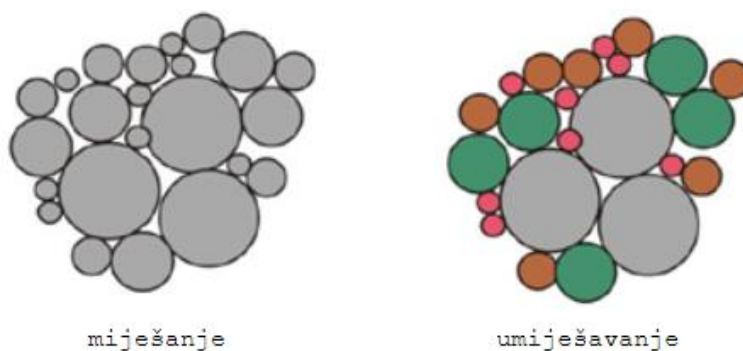


Slika 3. Oblici čestica praha [3]

Razlikujemo više oblika čestica praha, svaki sa svojim prednostima i nedostacima. Primjerice, čestice štapičastog oblika su dobro stlačive i imaju izraženu sinterabilnost, dok su sferne čestice lošije stlačive i slabije sinterabilne. S druge strane, razmatrajući veličinu čestica, što je veličina ujednačenija, to je miješanje bolje.

2.1.2. Miješanje prahova

Za dobivanje homogene smjese, potrebno je jednom od dviju tehnika pomiješati konstituente. Razlikujemo miješanje (engl. *Blending*) i umješavanje (engl. *Mixing*). Osnovna razlika između te dvije tehnike je ta, što se kod obje mogu miješati prahovi različitih veličina, no kod miješanja je potrebno koristiti isključivo prahove istog kemijskog sastava.



Slika 4. Miješanje i umješavanje prahova [3]

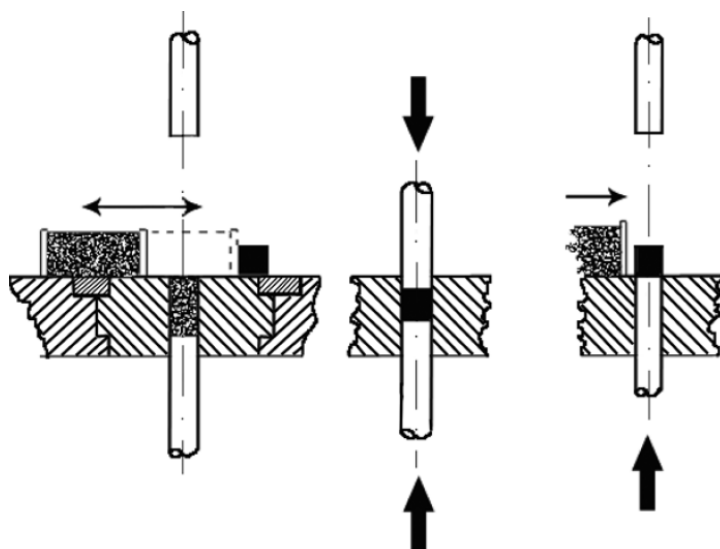
Miješanje, odnosno umješavanje, nije jedina pripremna operacija uoči sinteriranja. U pripremne operacije ubrajamo i klasiranje, aglomeraciju, deaglomeraciju, žarenje, pročišćavanje i podmazivanje prahova lubrikantima [3].

Da bismo osigurali homogenost mikrostrukture nakon sinteriranja, miješanje je obavezno, osim kada se sinterira samo jedna vrsta praha. Isto tako, dodavanjem lubrikanata smanjujemo trenje između čestica praha i stijenki kalupa [3]. Miješanje može biti mokro ili suho, jer lubrikanti postoje i u čvrstom i u tekućem stanju.

2.1.3. Kompaktiranje praha

Kompaktiranje praha predstavlja mjeru zgušnjavanja praha [3]. Ciklus kompaktiranja se dijeli u tri etape:

- punjenje kalupa – smjesa praha se uporabom gravitacijske sile doprema u kalup gdje poprima oblik kalupne šupljine,
- zgušnjavanje (engl. *Densification*) praha – trenje između praha i stijenki kalupa utječe na kvalitetu zgušnjavanja kompakta (kompakt je obično homogeniji u sredini nego na površini),
- izbacivanje gotovog dijela (kompakta) iz kalupa.



Slika 5. Ciklus kompaktiranja u tri etape [5]

Konvencionalno kompaktiranje praha u kalupu može biti jednostrano ili dvostrano. Kompaktiranje se vrši upotrebom žiga. Kod jednostranog kompaktiranja najveći nedostatak je nehomogena raspodjela gustoće po presjeku kompakta [3].

Za kvalitetno kompaktiranje se mora voditi računa o tlaku kompaktiranja, veličini i obliku metalnih čestica praha, poroznosti, sadržaju lubrikanata i tipu metalnog praha [3].

2.1.4. Sinteriranje

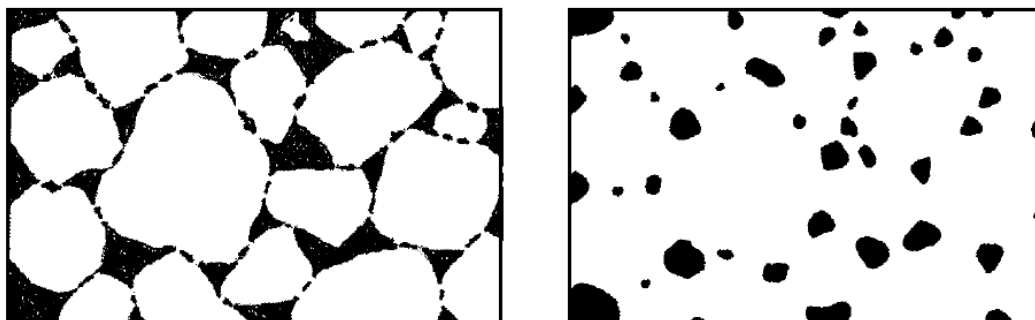
Sinteriranje, ili srašćivanje, je završna tehnološka operacija metalurgije praha. Definira se kao proces konsolidacije praha u kontroliranim uvjetima temperature i vremena. Uz sve to, može se definirati i kao tehnika za proizvodnju dijelova iz metalnih prahova primjenom kontrolirane toplinske energije. Temperatura na kojoj se provodi postupak sinteriranja je niža od temperature taljenja glavnog konstituenta (po zastupljenosti u smjesi praha) [3].

Na visokoj temperaturi, pod djelovanjem vanjske sile, čestice praha se tlače i srastaju jedna u drugu – veće čestice sporije, dok manje čestice brže.

Na postupak sinteriranja najviše utječu sljedeći parametri [3]:

- temperatura i vrijeme – viša temperatura sinteriranja posljedično skraćuje vrijeme potrebno za željeno povezivanje čestica praha,
- geometrijska struktura čestica praha,
- sastav smjese praha – odabir konstituenata za smjesu ovisi o željenim mehaničkim svojstvima koje želimo postići,
- gustoća kompakta – što je veća gustoća kompakta, legirajući elementi se bolje vežu s prahovima, jer je površina kompakta veća i sl.

Kod sinteriranja prahova dolazi do dviju pojava – adhezije i promjena oblika čestica [3]. Prvo se čestice skupe pa se zgusnu. Naposljedku nastaje konačna mikrostruktura. Adhezija kod sinteriranih prahova podrazumijeva zavarivanje površina čestica praha stvaranjem vratova.



Slika 6. Rana i kasnija faza sinteriranja (s lijeva na desno) [5]

Čestice praha se moraju na dodirnim površinama zavariti te stvoriti vrat u svrhu povezivanja smjese praha u kalupu. Nakon adhezije čestica, čestice moraju moći promijeniti oblik. Promjenom oblika omogućava se zgušnjavanje, čime se mogu postići određene teorijske gustoće uz postizanje željenih mehaničkih svojstava. Neki od postupaka kojima možemo postići teorijske gustoće su [3]:

- kovanje praha,
- injekcijsko prešanje praha,
- vruće izostatsko prešanje,
- vruće prešanje,
- ekstrudiranje i sl.

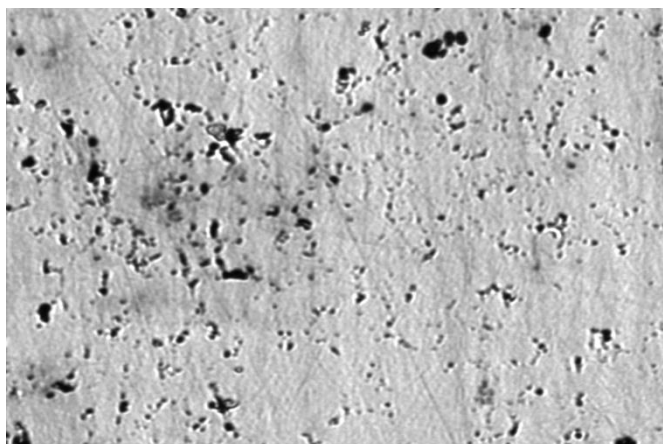
2.2. O sinteriranim čelicima i poroznosti

U sinteriranim čelicima se obično nakon završetka procesa sinteriranja javlja rezidualna, odnosno zaostala, poroznost. Na poroznost sinteriranog čelika utječu parametri [7] poput: „zelene“ gustoće, odnosno gustoće kompakta, vrijeme i temperatura sinteriranja, veličina čestica praha itd. Pored toga, postotak poroznosti ima veliki značaj na mehaničko ponašanje sinteriranog čelika, pogotovo na zamor materijala [8]. Na mikrostrukturi se često javlja međupovezanost pora, tj. pore često znaju biti jedne blizu drugih. Na tim mjestima dolazi do povećanja lokalne deformacije zbog sinteriranjem nastalih malih vratova između pora [8]. Na nepravilnijim porama se javljaju veće koncentracije naprezanja, koje pak negativno utječu na mehaničko ponašanje materijala.

U [9], istraživao je utjecaj poroznosti u odnosu na toplinsku provodnost materijala, magnetska svojstva, vlačnu čvrstoću, zamor materijala, tvrdoću i modul elastičnosti. Također, dobiveni su zakoni koji opisuju ponašanje poroznih metala u odnosu na neporozne, homogene metale, upotrebom postotka poroznosti p . Generalno, utjecaj poroznosti je smanjio mehanička svojstva u svim promatranim aspektima.

Karakterizacija pora (određivanje oblika, veličine, prostorne raspodjele i međusobne interakcije) na mikrorazini je najčešće provedena metalografskim ispitivanjem, tj. postupkom metalografije. Metalografija je znanstvena metoda koja se bavi proučavanjem

i određivanjem strukture metala. Primjer metalografije mikrostrukture sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C prikazan je na slici 7.



Slika 7. Metalografija mikrostrukture sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

Za ostvarivanje željenih mehaničkih svojstva sinteriranog čelika, važno je voditi računa o sljedećim parametrima [10]:

- gustoći (služi za karakterizaciju prahova, kod sinteriranih čelika razlikujemo nasipnu, vibriranu, teorijsku i „zelenu“ gustoću),
- uvjetima sinteriranja (temperatura, vrijeme ...),
- legirajućim elementima (obrađeni u sljedećem potpoglavlju) i
- uvjetima toplinske obrade.

Gustoća je od primarne važnosti kod usporedbe mehaničkih svojstava sinteriranih čelika. Vlačna čvrstoća, trajna dinamička izdržljivost i udarna čvrstoća rastu povećanjem gustoće sinteriranog čelika [10].

2.2.1. Legirajući elementi

Legirajući elementi, pomiješani s glavnim konstituentom, u sinteriranim čelicima dovode do formiranja različitih oblika geometrije mikrostruktura. Kao i u klasičnim, konvencionalnim čelicima, legirajući elementi imaju isti utjecaj u sinteriranim čelicima u pogledu promjene svojstava. No, neki od kemijskih elemenata (kemijski elementi Cr, Mn i V), ne mogu postati legirajući elementi u sinteriranim čelicima zbog izraženog svojstva oksidacije u sinter-atmosferi [10]. Od legirajućih elemenata u sinteriranim čelicima najzastupljeniji su redom sljedeći kemijski elementi: C, Cu, P, Ni i Mo.

2.2.2. Sinterirani čelici klase Astaloy Mo

Promatrani materijal u ovom radu je sinterirani čelik Astaloy Mo+0,2C. Sinterirani čelici klase Astaloy Mo u sastavu smjese praha sadrže 1,5% molibdena (kemijski element Mo) zbog čega se mogu prilikom kompaktiranja smjese praha u kalupu primijeniti veći tlakovi kompaktiranja. Taj sadržaj molibdena omogućuje gotovo pa homogenu mikrostrukturu nakon procesa sinteriranja [11]. Dosad su se sinterirani čelici klase Astaloy Mo pokazali izuzetno dobri u pogledu ostvarivanja visoke čvrstoće, uz gotovo pa nikakvu naknadnu obradu nakon procesa sinteriranja. Dodatkom ugljika u sinterirani čelik klase Astaloy Mo u iznosu od 0,2 do 0,6%, postiže se vrlo dobra tvrdoća. Smjesa praha tog čelika dobivena je elektrolitičkim postupkom atomiziranja vodom [11].

Atomizacija vodom je najjednostavnija tehnika za dobivanje elementarnih prahova metala te je ujedno i najekonomičnija [3]. Da bi se mogla uspješno koristiti, legirajući elementi ne smiju imati svojstvo oksidacije.

2.3. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda. Kod metode konačnih elemenata razmatramo kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja, diskretiziran konačnim brojem stupnjeva slobode gibanja. Kontinuum tada postaje konačan, opisan nekim točnim brojem konačnih elemenata.

Inženjerski problemi temeljeni na principima mehanike kontinuuma opisani su parcijalnim diferencijalnim jednadžbama, koje su najčešće lako rješive za jednostavnije slučajeve. Povećanjem kompleksnosti geometrije, kao i vrste opterećenja, rješavanje diferencijalnih jednadžbi klasičnim matematičkim postupcima postaje složeno i zahtjevno.

Stoga, metoda konačnih elemenata proizlazi kao jedna od metoda kojim se parcijalne diferencijalne jednadžbe mogu zamijeniti algebarskim izrazima, koji rješavaju diskretizirani kontinuum s n konačnih elemenata.

Kao što je već spomenuto, razmatra se diskretizirani sustav s n konačnih elemenata. Svaki od tih konačnih elemenata opisan je vlastitim poljem naprezanja, pomaka, temperature itd., pomoću interpolacijskih funkcija [12]. Konačni elementi su međusobno povezani čvorovima, odnosno točkama koje se najčešće nalaze po konturi konačnog elementa.

Kako bi se diskretizirani sustav mogao približno ponašati kao kontinuum, interpolacijske funkcije moraju zadovoljiti odgovarajuće uvjete. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, rješenja koja tražimo konvergiraju k nekom iznosu povećanjem broja konačnih elemenata [12]. Fizikalno gledano, usitnjavanjem mreže konačnih elemenata, energija deformiranja konvergira k točnom iznosu energije deformiranja proračunskog modela. No, povećanjem broja konačnih elemenata povećamo sustav algebarskih jednadžbi koje treba riješiti pa je neophodna primjena računala.

Postupci rješavanja sustava algebarskih jednadžbi su implementirani u postojeće komercijalne programske pakete za analizu konačnih elemenata. Generalno, svi ti programski paketi građeni su u nekoliko cjelina, svaka sa svojom svrhom:

- I. cjelina – pretprocesor (služi za unošenje ulaznih podataka),
- II. cjelina – procesor (služi za izračunavanje sustava algebarskih jednadžbi),
- III. cjelina – postprocesor (služi za prikaz rezultata, odnosno rješenja).

Metoda konačnih elemenata danas olakšava simuliranje fizikalnog ponašanja složenih i kompleksnih konstrukcija. S obzirom da je sama metoda numerička, već u startu postoji određena greška, s kojom bi inženjer/konstruktor trebao računati. Ponekad ta greška može biti i puno veća pa je važno dobro vladati fizikalnim i matematičkim konceptima za kvalitetnu interpretaciju rješenja.

Na tržištu postoje različite verzije programskih paketa za analizu konačnih elemenata. Nalazimo ih kao samostalni programe, ili integrirane u već postojeće CAD sustave u svrhu proširenja istog. Jedan od najpoznatijih programskih paketa, koji će se koristiti u ovom radu, je *Abaqus* verzije 6.14 (u daljnjem tekstu *Abaqus*), razvijen kao samostalni programski paket za analizu konačnih elemenata od strane francuske tvrtke *Dassault Systèmes*.

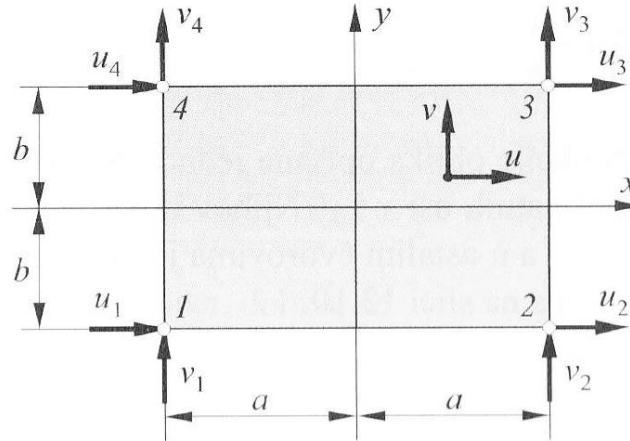
2.3.1. Osnovni pravokutni element

Kod rješavanja problema ravninskog stanja deformacija i ravninskog stanja naprezanja, najčešće se koriste dvodimenzijski konačni elementi s funkcijom pomaka prikazanom u Kartezijevom koordinatnom sustavu x - y .

Kako bi ti elementi, bilo trokutni ili četverokutni, ispunili uvjete kompatibilnosti, potrebno je duž rubova ispuniti C^0 kontinuitet. U suštini, razlikujemo osnovne konačne elemente i konačne elemente višeg reda. Tijekom ovog rada, prilikom određivanja reprezentativnog volumenskog elementa, korišten je osnovni pravokutni konačni element. Na razini programskog paketa *Abaqus* govorimo o konačnom elementu za opisivanje problema ravninskog stanja deformacije, tj. o konačnom elementu oznake CPE4.

Osnovni pravokutni konačni element najjednostavniji je pravokutni element, s četiri čvora u vrhovima pravokutnika, svaki s dva stupnja slobode gibanja u svakom čvoru. Sve relacije u nastavku ovog potpoglavlja izvest će se za lokalni koordinatni sustav x - y , čije su osi paralelne sa stranicama pravokutnika, te čije je ishodište u težištu pravokutnika.

Pripadni osnovni pravokutni konačni element, zajedno s ucrtanim koordinatnim sustavom i čvorovima, prikazan je na slici 8.



Slika 8. Osnovni pravokutni konačni element [12]

Stupnjevi slobode su pomaci u pravcu koordinatnih osi x i y :

$$\mathbf{v}^T = [u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad u_4 \quad v_4]. \quad (1)$$

Polje pomaka osnovnog pravokutnog konačnog elementa opisano je nepotpunim polinomima drugog stupnja:

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy, \quad (2)$$

$$v = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy. \quad (3)$$

Ako izraze (2) i (3) zapišemo u matričnom zapisu, dobijemo:

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{a}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & xy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Daljnijim uvrštavanjem rubnih uvjeta za čvorove $x = x_i$, $y = y_i$, $u = u_i$ i $v = v_i$, za $i = 1 \dots 4$, u izraz (1), a u odnosu na koordinatni sustav sa slike 8., dobije se sustav algebarskih jednadžbi:

$$\mathbf{v} = \mathbf{C}\mathbf{a}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -a & -b & ab & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -a & -b & ab \\ 1 & a & -b & -ab & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a & -b & -ab \\ 1 & a & b & ab & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a & b & ab \\ 1 & -a & b & -ab & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -a & b & -ab \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Kombinacijom dvaju matričnih izraza (4) i (6), dobijemo vezu između vektora polja pomaka \mathbf{u} i vektora stupnjeva slobode \mathbf{v} :

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{C}^{-1}\mathbf{v}. \quad (8)$$

Veza između vektora polja pomaka \mathbf{u} i vektora stupnjeva slobode \mathbf{v} definira se kao matrica funkcija oblika \mathbf{N} , koja se konkretno za trenutno promatrani konačni element sastoji od osam stupaca i dva retka. Matrica funkcija oblika \mathbf{N} računa se prema sljedećem izrazu:

$$\mathbf{N} = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{C}^{-1}, \quad (9)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

U izrazu (10), N_1, N_2, N_3 i N_4 su funkcije oblika za pripadne čvorove osnovnog pravokutnog konačnog elementa $i = 1 \dots 4$. Funkcije oblika su jednodimenzijski linearni polinomi u pravcu lokalnog koordinatnog sustava x - y , ovisni o geometriji konačnog elementa, odnosno o duljini a i širini b , kao i o koordinatama x i y :

$$N_1 = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right), \quad (11)$$

$$N_2 = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{x}{a}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right), \quad (12)$$

$$N_3 = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{x}{a}\right) \left(1 + \frac{y}{b}\right), \quad (13)$$

$$N_4 = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{a}\right) \left(1 + \frac{y}{b}\right). \quad (14)$$

Nadalje, matrica međusobne ovisnosti deformacije u elementu i pomaka u čvorovima **B** izračunava se posredno, deriviranjem funkcija oblika **N**, pomoću matričnog izraza:

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}_k \mathbf{N}, \quad (15)$$

gdje je \mathbf{D}_k kinematički diferencijalni operator za ravninsko stanje deformacije, odnosno ravninsko stanje naprezanja, definiran sljedećim izrazom:

$$\mathbf{D}_k = \begin{bmatrix} \partial_x & 0 \\ 0 & \partial_y \\ \partial_y & \partial_x \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Daljnijm sređivanjem i uvrštavanjem u izraz (15), matrica međusobne ovisnosti deformacije u elementu **B**, nakon deriviranja funkcija oblika, glasi:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{4ab} \begin{bmatrix} -(b-y) & 0 & (b-y) & 0 & (b+y) & 0 & -(b+y) & 0 \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & 0 & (a+x) & 0 & (a-x) \\ -(a-x) & -(b-y) & -(a+x) & (b-y) & (a+x) & (b+y) & (a-x) & -(b+y) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Raspodjela deformacija po konačnom elementu opisana je izrazom:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{v}, \quad (18)$$

dok su komponente tenzora deformacije jednake:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}]. \quad (19)$$

Zbog kompleksnosti izraza, matrični izraz (18) neće biti raspisan, no ako promotrimo izraze (1) i (17), možemo uočiti kako će se komponenta deformacije ε_x mijenjati linearno u zavisnosti od koordinate y , komponenta deformacije ε_y će se mijenjati linearno u

zavisnosti od koordinate x , dok će se γ_{xy} mijenjati linearno u ovisnosti od obje koordinate x i y .

Naprezanje u konačnom elementu izračunava se putem sljedećeg izraza:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{v}, \quad (20)$$

gdje je:

$$\mathbf{S} = \mathbf{D}\mathbf{B}, \quad (21)$$

što predstavlja matricu \mathbf{S} , odnosno matricu elastičnih konstanti materijala i koordinata čvorova konačnog elementa.

Matrica elastičnosti \mathbf{D} razlikuje se za ravninsko stanje deformacije, odnosno ravninsko stanje naprezanja – detaljnije opisano u poglavlju 2.3.2. Komponente naprezanja glase:

$$\boldsymbol{\sigma}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}]. \quad (22)$$

Analogno, zbog kompleksnosti matričnog izraza za određivanje naprezanja, isti neće biti detaljnije raspisan. No, ako promotrimo ulazne parametre u matrični izraz (20), možemo jednostavno i lako zaključiti kako je polje naprezanja u osnovnom pravokutnom konačnom elementu linearna funkcija za svaku od navedenih komponenata naprezanja. Iako je to očigledna prednost nad osnovnim trokutnim konačnim elementom, na vidjelo proizlazi nedostatak nepotpunosti polinoma kojim se opisuju funkcije pomaka.

2.3.2. Ravninsko stanje naprezanja i ravninsko stanje deformacija

U mehanici čvrstih tijela razlikujemo dvije vrste pojednostavljenja, gdje možemo 3D geometriju razmatrati kao 2D geometriju, naravno uz pretpostavku da se materijal ponaša linearno elastično uz male deformacije. Primjena tih pojednostavljenja su još uvijek zavisna o inženjerskoj procjeni. Ispravna primjena tih pojednostavljenja može znatno ubrzati mehaničke proračune.

Ravninsko stanje naprezanja je naziv koji opisuje stanje nekog dijela, u kojem se sva naprezanja nalaze u istoj ravnini. Matematički rečeno, ako promatramo ravnu ploču u ravnini x - y , u kojoj postoji ravninsko stanje naprezanja, to znači da su u tenzoru

naprezanja komponente $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau_{xz} = \tau_{zx} = 0$, dok je deformacija u pravcu osi z $\varepsilon_z \neq 0$. Tada se tenzor naprezanja prikazuje u obliku [12]:

$$\boldsymbol{\sigma}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}]. \quad (23)$$

U tom slučaju matrica elastičnosti \mathbf{D} jednaka je:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

To pojednostavljenje se najčešće koristi za analizu vrlo tankih komponenti, primjerice tankih zupčanika ili spremnika izrađenih od zavarenih tankih limova čija je jedna dimenzija zanemarivo mala u odnosu na preostale dvije.

S druge strane, analogno, ravninsko stanje deformacije je naziv koji opisuje stanje nekog dijela, u kojem se sve deformacije nalaze u istoj ravnini. Matematički rečeno, ako promatramo ravnu ploču u ravnini x - y , u kojoj postoji ravninsko stanje deformacije, to znači da su u tenzoru deformacije komponente $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \gamma_{xz} = \gamma_{zx} = 0$, dok je naprezanje u smjeru osi z $\sigma_z \neq 0$. Tada se tenzor deformacija prikazuje u obliku [12]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}]. \quad (25)$$

U tom slučaju matrica elastičnosti \mathbf{D} jednaka je:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Ravninsko stanje deformacije se najčešće upotrebljava je kod debelostjenih konstrukcija. U oba slučaja se veličine u smjeru osi z ne razmatraju kod doprinosa energiji deformiranja, jer je umnožak $\sigma_z \varepsilon_z = 0$!

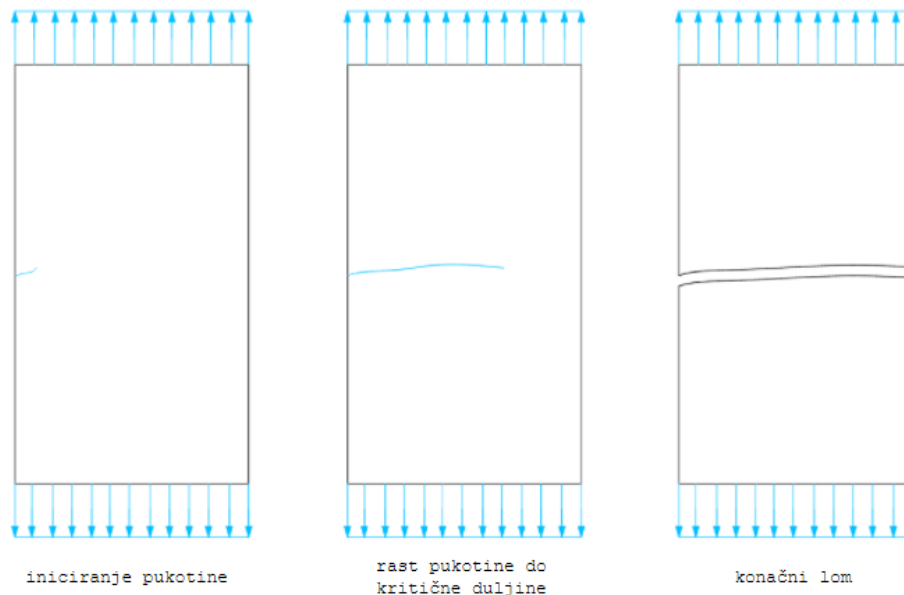
2.4. Zamorno ponašanje materijala

2.4.1. Uvodno o zamoru materijala

Konstruktivske komponente izložene opterećenjima koja variraju u zavisnosti od vremena mogu kolabirati kod naprezanja daleko ispod proračunatog. Taj fenomen je poznat kao zamor materijala (engl. *Fatigue*). Zamor materijala je jedan od glavnih uzročnika katastrofalnih lomova proizvoda, konstrukcija i strojeva u strojogradnji. Posude pod tlakom, zavareni spojevi na biciklu i dizalice razne namjene, samo su neki od primjera kod kojih lom može dovesti do, npr. havarija uzrokovanih istjecanjem ulja iz spremnika, ili ozljeda te potencijalne smrti čovjeka.

Do loma uslijed zamora materijala dolazi zbog iniciranja i propagacije zamorne pukotine u materijalu [13]. Općenito, zamor materijala se može podijeliti u tri faze (slika 9.):

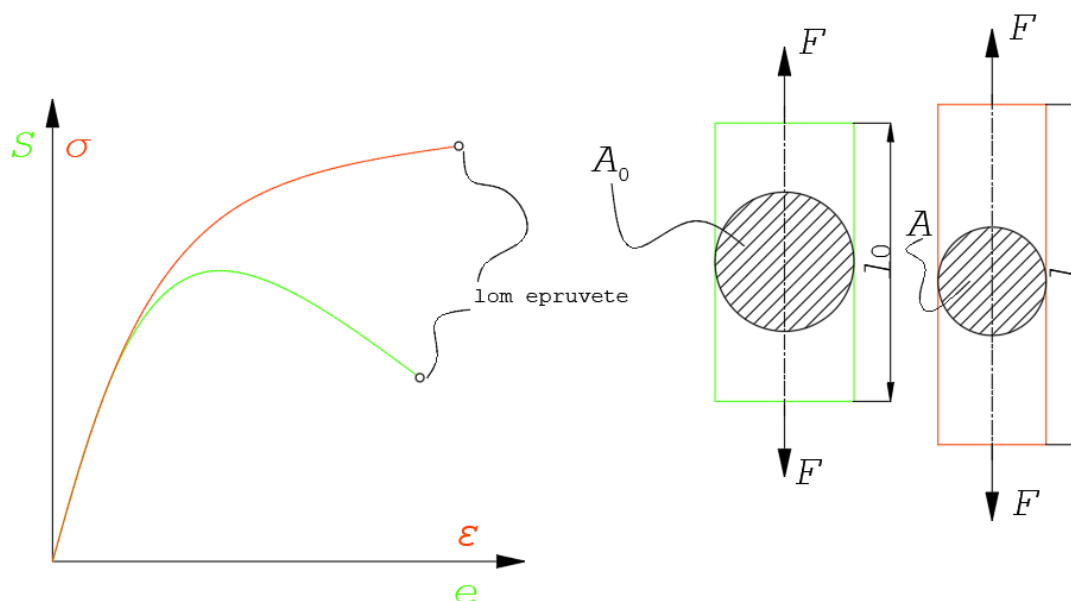
- iniciranje pukotine,
- propagacija pukotine,
- konačni, nestabilni lom materijala.



Slika 9. Faze rasta pukotine uslijed zamora materijala

2.4.2. Statički vlačni pokus

Vlačnim opterećenjem epruvete, ista se širi po dužini te sužava u presjeku. Standardne epruvete se proizvode s oslabljenjem u srednjem dijelu (vrat epruvete), kako bi se povećanjem vlačne sile na tom mjestu dovelo do tečenja materijala pa posljedičnog loma kod duktilnih materijala, ili samo loma kod krhkih materijala bez izraženog fenomena tečenja materijala. Na slici 10. prikazan je stvarni i inženjerski dijagram naprezanje-deformacija, kao i opterećena i neopterećena epruveta [14].



Slika 10. Stvarni i inženjerski dijagram naprezanje-deformacija

Inženjersko naprezanje S računa se prema:

$$S = \frac{F}{A_0}, \quad (27)$$

gdje je:

F – sila kojom je opterećena epruveta,

A_0 – veličina poprečnog presjeka epruvete u neopterećenom stanju.

Stvarno naprezanje računa se prema:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (28)$$

Inženjerska deformacija računa se prema:

$$e = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (29)$$

dok se stvarna deformacija računa prema:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l}, \quad (30)$$

gdje je:

l – duljina opterećene epruvete,

l_0 – duljina neopterećene epruvete.

2.4.3. Zamorna nomenklatura

Cikličko opterećenje oblik je periodičkog, odnosno vremenski promjenjivog opterećenja, koje se najčešće koristi kod razmatranja zamora materijala epruveta. Jednostavan oblik periodičkog opterećenja glasi [14,15]:

$$F(t) = F_m + F_a \sin(\omega t + \varphi), \quad (31)$$

gdje je:

$F(t)$ – opterećenje zavisno o vremenu,

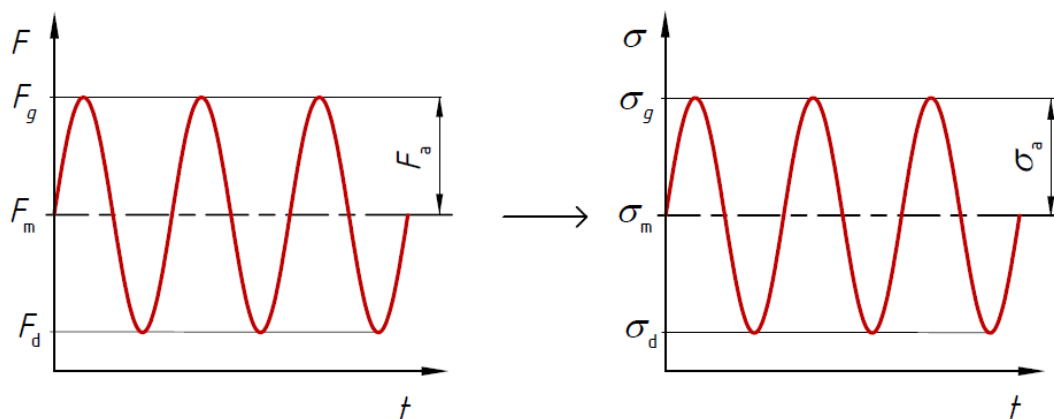
t – vrijeme,

F_m – srednja vrijednost opterećenja,

F_a – amplituda opterećenja,

ω – kružna frekvencija opterećivanja i

φ – fazni kut opterećivanja.



Slika 11. Cikličko opterećenje i naprezanje [15]

To opterećenje na presjeku epruvete poprečnog presjeka A izaziva naprezanje jednako tako ovisno o vremenu t [15]:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t + \varphi), \quad (32)$$

gdje je:

$\sigma(t)$ – naprezanje zavisno o vremenu,

σ_m – srednja vrijednost naprezanja i

σ_a – amplituda naprezanja.

U pojednostavljenom postupku određivanja trajne dinamičke izdržljivosti, zanemaruje se frekvencija opterećivanja f te se u razmatranje uzimaju samo vrijednosti maksimalnog i minimalnog iznosa naprezanja, odnosno gornje naprezanje:

$$\sigma_g = \sigma_m + \sigma_a, \quad (33)$$

i donje naprezanje:

$$\sigma_d = \sigma_m - \sigma_a, \quad (34)$$

uz ukupni broj ciklusa naprezanja n . Iz slike 11. vidljivo je da srednja vrijednost naprezanja i amplituda naprezanja iznose:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_g + \sigma_d}{2}, \quad (35)$$

odnosno:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{2}. \quad (36)$$

Kod ispitivanja epruveta, ista se provode za konstantni iznos odnosa naprezanja r . Isti se definira kao omjer minimalnog i maksimalnog naprezanja nekog ciklusa naprezanja prema sljedećem izrazu:

$$r = \frac{\sigma_d}{\sigma_g}. \quad (37)$$

Ispitivanja se najčešće provode za čisto izmjenično cikličko opterećenje ($r = -1$) i čisto istosmjerno cikličko opterećenje ($r = 0$). Odnos naprezanja r definiran je rasponom:

$$-1 \leq r \leq 1. \quad (38)$$

2.4.4. *Pristupi procjeni zamora*

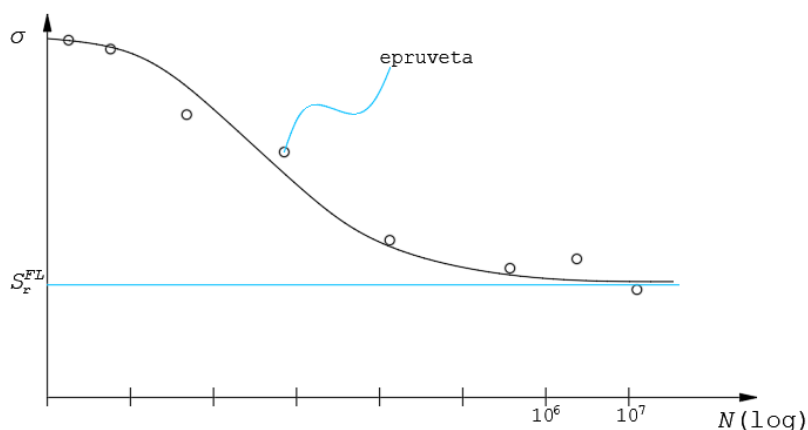
Zamor nastaje kao rezultat plastične deformacije u razdoblju iniciranja i propagacije pukotine [13]. Prema [4], postoje dva različita teorijska pristupa procjeni zamora materijala: teorija kumulativnog oštećenja za određivanje zamorne čvrstoće i teorija propagacije pukotine uslijed zamora, što već spada u mehaniku loma. U svrhu ovog rada koristit će se metoda koja pripada teoriji kumulativnog oštećenja za određivanje zamorne čvrstoće. Unutar te teorije nalazimo dvije najznačajnije metode pristupa procjeni zamora [4]:

1. $S - N$ metoda; najčešće korištena metoda kod rješavanja problema visokocikličkog zamora,
2. $\varepsilon - N$ metoda; najčešće korištena metoda kod rješavanja problema niskocikličkog zamora uz $d\alpha/dN$ metodu.

Za bolje razumijevanje rada, u nastavku će biti objašnjene razlike između visoko- i niskocikličkog zamora materijala.

2.4.5. *Wöhlerova krivulja (S - N krivulja)*

August Wöhler je 60-ih godina 19. stoljeća prvi počeo provoditi eksperimente gdje je lomio epruvete pod ciklički promjenljivim naprežanjem. Time je određivao broj ciklusa do loma epruvete N , za neku čvrstoću materijala σ , uz konstantni odnos naprezanja r . Jedna epruveta je predstavljala jednu točku (N, σ) u dijagramu. Eksperiment je proveo više puta te je sve točke unio u $\sigma - N$ dijagram, kojeg danas poznajemo pod nazivom $S - N$ dijagram (krivulja; ili Wöhlerov dijagram), te na taj način ucrtao krivulju – vidi sliku 12.



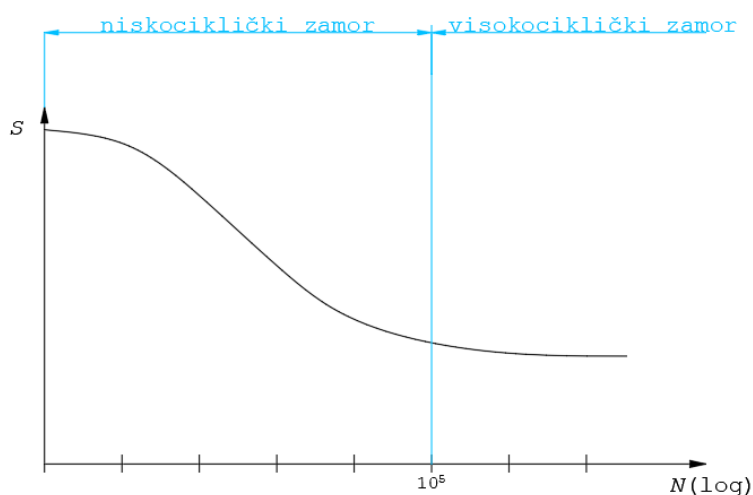
Slika 12. Wöhlerov dijagram

Uočio je, da kod velikih brojeva ciklusa naprezanja, $N > 10^6 \div 10^7$, naprezanje poprima približnu konstantnu vrijednost. Teorijski, epruvete s amplitudama naprezanja ispod te konstantne vrijednosti naprezanja mogu doživjeti beskonačni broj ciklusa. To konstantno naprezanje poznato je pod nazivom trajna dinamička čvrstoća materijala S_r^{FL} . Prostor ispod dobivene krivulje (slika 12.) označava prostor u kojem epruveta neće doživjeti lom.

2.4.6. Visokociklički i niskociklički zamor

Kod visokocikličkog zamora (engl. *High-cyclic Fatigue*) lom nastupa kod velikog broja ciklusa opterećenja ($> 10^5$) uz pretpostavku da se naprezanja i deformacije nalaze u linearno-elastičnom području, uz pretpostavku malih deformacija. Za rješavanje problema procjene visokocikličkog zamora koristi se $S - N$ metoda, metoda bazirana na upotrebi $S - N$ krivulje [16].

Kod niskocikličkog zamora (engl. *Low-cyclic Fatigue*) lom nastupa između 10^2 i 10^5 ciklusa uz pretpostavku da se naprezanja i deformacije nalaze u elastoplastičnom području. Kod visokocikličkog zamora broj ciklusa do iniciranja pukotine je gotovo pa jednak broju ciklusa do loma, dok kod niskocikličkog zamora to nije slučaj. Za određivanje broja ciklusa do iniciranja pukotine se koristi $\varepsilon - N$ metoda. Do broja ciklusa do loma, postoji određena razlika u broju ciklusu. To pripisujemo fenomenu propagaciji pukotine do kritične duljine, koja je izraženija kod niskocikličkog zamora, što najbolje objašnjava Parisov zakon rasta pukotine, odnosno $d\alpha/dN$ metoda [16].



Slika 13. Kvalitativni prikaz područja nisko- i visokocikličkog zamora

U nastavku ovog rada, bit će definirani i objašnjeni pojmovi koji se isključivo vežu uz problematiku visokocikličkog zamora materijala.

2.4.7. $S - N$ krivulja

Broj ciklusa do loma N_f u ovisnosti o amplitudi napreznja S_a u dvostrukom logaritamskom mjerilu izražen je analitički, preko Basquinovog zakona [14]:

$$\log(S_a) = \log(S'_f) + b \log(N_f) \leftrightarrow S_a = S'_f(N_f)^b, \quad (39)$$

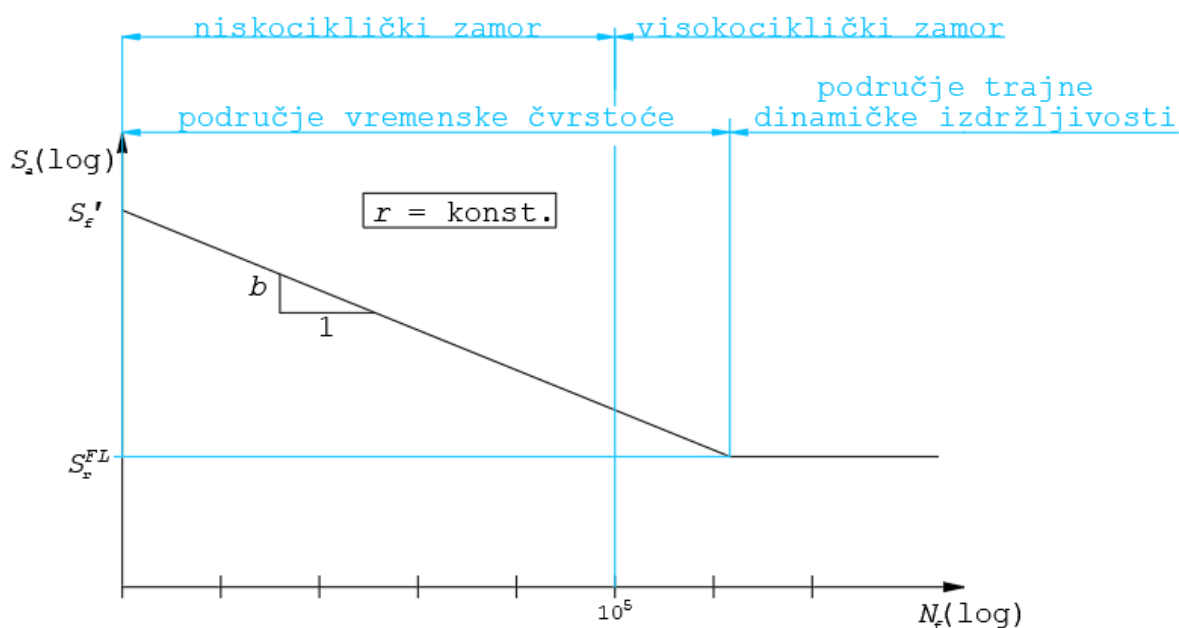
gdje su:

S'_f – koeficijent zamorne čvrstoće i

b – eksponent zamorne čvrstoće.

Poznavanjem koeficijenta i eksponenta zamorne čvrstoće, i trajne dinamičke čvrstoće, uz konstantni odnosno napreznja $r = \text{konst.}$, možemo u potpunosti definirati idealiziranu $S - N$ krivulju. U [14], u izrazu koji opisuje Basquinov zakon, umjesto broja ciklusa N_f definira se $2N_f$, koji tada predstavlja broj promjena ciklusa do loma (1 ciklus = 2 promjene!).

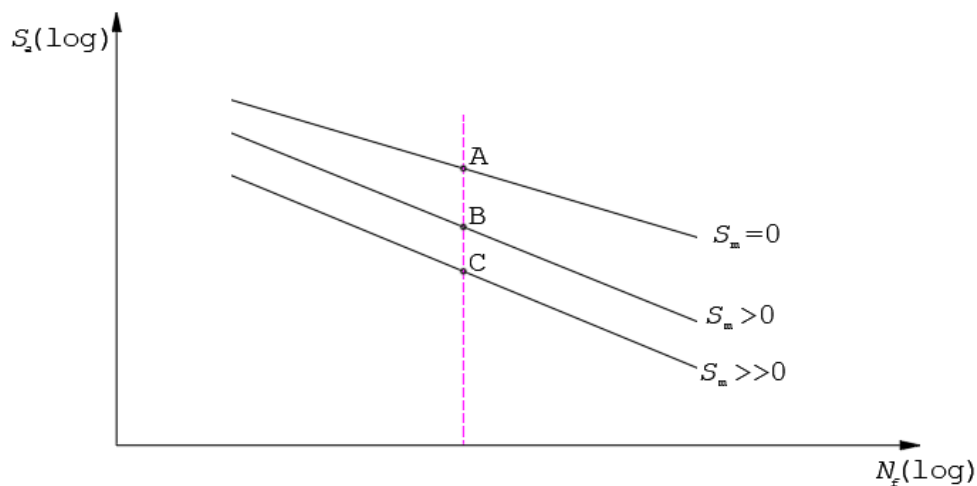
Na slici 14. prikazana je kvalitativna i idealizirana $S - N$ krivulja, za $r = \text{konst.}$, na kojoj se jasno vide razlike između nisko- i visokocikličkog zamora materijala uz naznaku polja vremenske i trajne dinamičke čvrstoće [15,16].



Slika 14. Kvalitativni prikaz idealizirane S - N krivulje

2.4.8. Utjecaj srednjeg napreznaja na zamornu čvrstoću

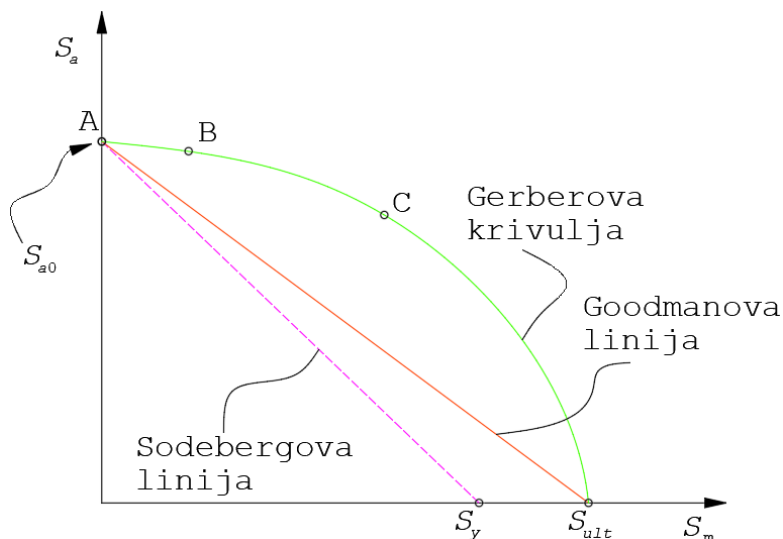
Na visokociklički zamor značajno utječe srednje napreznaje. Na slici 15. prikazane su S - N krivulje za različita srednja napreznaja, ali uz jednake amplitude napreznaja. Povećanjem srednjeg napreznaja, trajna dinamička čvrstoća materijala se smanjuje.



Slika 15. Utjecaj srednjeg napreznaja na zamornu čvrstoću

Točke A, B i C sa slike 15. se mogu prikazati u dijagramu ovisnosti srednjeg napreznaja o amplitudi napreznaja, tj. u tzv. Haighovom dijagramu, naravno za isti odnos napreznaja r i broj ciklusa do loma N_f – slika 16. Ovisnost srednjeg napreznaja o amplitudi napreznaja

je u Haighovom dijagramu moguće opisati trima relacijama [14,16], koje su u nastavku prikazane u segmentnom obliku jednadžbe pravca (za Sodebergovu i Goodmanovu relaciju) i parabole (za Gerberovu relaciju) – izrazi (40), (41) i (42).



Slika 16. Haighov dijagram

Sodebergova relacija opisana je izrazom:

$$\frac{S_a}{S_{a0}} + \frac{S_m}{S_y} = 1, \quad (40)$$

gdje je:

S_a – amplituda naprezanja,

S_{a0} – efektivna amplituda naprezanje za srednje naprezanje $S_m = 0$,

S_y – granica tečenja materijala (y – engl. *Yield Strength*).

Goodmanova relacija opisana je izrazom:

$$\frac{S_a}{S_{a0}} + \frac{S_m}{S_{ult}} = 1, \quad (41)$$

gdje je:

S_{ult} – vlačna čvrstoća materijala (ult – engl. *Ultimate Tensile Strength*).

Gerberova relacija opisana je izrazom:

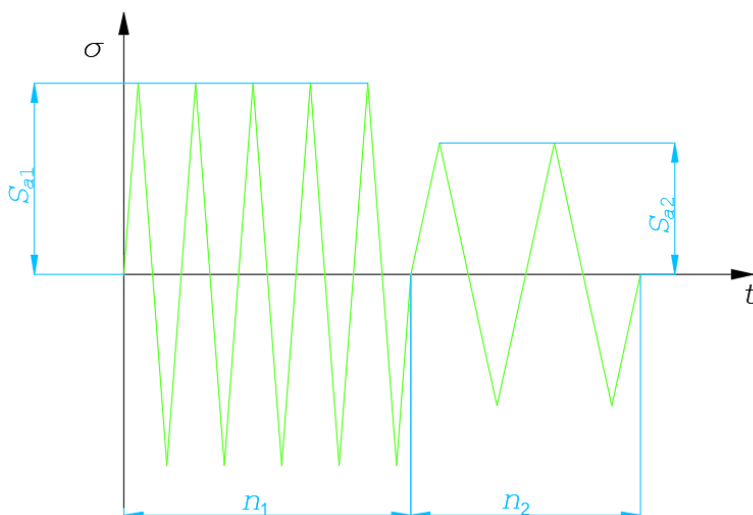
$$\frac{S_a}{S_{a0}} + \left(\frac{S_m}{S_{ult}}\right)^2 = 1. \quad (42)$$

Sodebergova relacija je najkonzervativnija, dok se Goodmanova relacija najčešće primjenjuje za krhke metale. Gerberova relacija je dobra za duktilne metale [14,16].

2.4.9. Palmgren-Minerova hipoteza linearne akumulacije zamora materijala

Realne konstrukcijske komponente nisu opterećene u svom životnom vijeku opterećenjem konstantne amplitude naprezanja. Štoviše, amplitude naprezanja variraju [14]. Palmgren i Miner su sredinom 20. stoljeća predstavili koncept kumulativnog oštećenja materijala pri zamoru materijala, koji je pomogao procjeni zamora konstrukcijskih komponenata opterećenih s varijabilnim amplitudama.

Za lakše razumijevanje, zamislimo da je zadano opterećenje s varijabilnim amplitudama (slika 17.), uz uvjet da je odnos naprezanja r isti tokom cijelog signala te da poznajemo u potpunosti Wöhlerovu krivulju za materijal komponente čiji zamor razmatramo. Isto tako, moraju biti u potpunosti definirane sve vrijednosti opterećenja, tj. amplituda naprezanja i srednje naprezanje, kao i broj ciklusa naprezanja svakog, pojedinačnog cikličkog opterećenja s konstantnom amplitudom.



Slika 17. Opterećenje s varijabilnim amplitudama

Kod visokocikličkog zamora ulazimo s pretpostavkom da se nalazimo u linearno-elastičnom području. Zbog toga, kompleksni signal sa slike 17. možemo podijeliti na dva

jednostavna opterećenja s konstantnim amplitudama pa potom načelom superpozicije kumulativno odrediti ukupno oštećenje.

Konstruktivska komponenta opterećena isključivo ciklusom naprezanja n_1 određenim amplitudom S_{a1} doživjet će lom kod N_{f1} . Analogno, amplitudi S_{a2} pridružen je broj ciklusa do loma N_{f2} . Svaki ciklus naprezanja doprinosi oštećenju konstrukcijske komponente.

Ako je sve to ispunjeno, onda se oštećenje superponira na sljedeći način:

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} = D, \quad (43)$$

gdje je:

D – kumulativno oštećenje (engl. *Cumulative Damage*).

Ako je zadan kompleksni signal s m ciklusa naprezanja konstantnih amplituda, tada se ukupno kumulativno oštećenje može zapisati kao:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{fi}} = D. \quad (44)$$

Do loma dolazi kada je kumulativno oštećenje materijala veće ili jednako 1, odnosno kada je:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{fi}} = D \geq 1. \quad (45)$$

2.5. Modeliranje heterogenih materijala

Modeliranje mehaničkog ponašanja heterogenih materijala predstavlja jedan od osnovnih problema u računalnoj mehanici [18]. S obzirom da su gotovo svi materijali na razini mikrostrukture heterogeni, razmatranje utjecaja mikrostrukture heterogenih materijala na mehanička svojstva istog je postalo predmet intenzivnog istraživanja zadnjih nekoliko desetljeća.

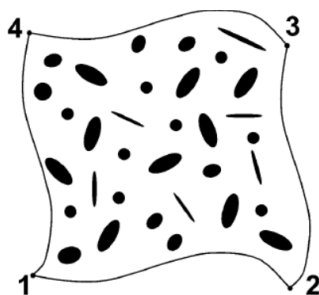
Mikrostruktura heterogenog materijala sastoji se od matrice materijala i ostalih faza, tj. uključina. U slučaju sinteriranog čelika, na mikrorazini nalazimo metalnu matricu i pore. Mehaničko ponašanje heterogenih materijala, u ovom slučaju sinteriranih čelika, uvelike ovisi o prostornom rasporedu, veličini i obliku pora.

Danas postoje različite metode za modeliranje mikrostrukture heterogenih materijala. Te metode većinom su bazirane na konceptu reprezentativnog volumenskog elementa (u daljnjem tekstu RVE), koji je predstavljen u zadnjoj polovici 20. stoljeća. Korištenjem fizikalnih izraza, koji vrijede na makrorazini, te primjenom metode konačnih elemenata, određuju se mehanička svojstva RVEa na mikrorazini [18]. Dobiveni rezultati se tada mogu odgovarajućim metodama iskoristiti za procjenu i analizu mehaničkog ponašanja homogenog materijala na makrorazini.

Modeliranje mehaničkog ponašanja takvog čelika, gdje bi se u razmatranje uzela veličina, razmještaj pora i udio poroznosti, bi doprinijelo boljem razumijevanju mehaničkog ponašanja na makrorazini te bi se time produbilo znanje o mehaničkim svojstvima sinteriranih materijala, koji se zadnjih godina javljaju kao trend u brojnim granama industrije.

2.5.1. Reprezentativni volumenski element (RVE)

Reprezentativni volumenski element predstavlja (reprezentira!) najmanji dio materijala na mikrorazini koji se fizikalno ponaša kao cijela mikrostruktura. Prilikom samog odabira RVEa, što je ujedno iterativan postupak i delikatan zadatak [18], mora se paziti da konačan uzorak što više odgovara stvarnom stanju mikrostrukture. Pošto je već nekoliko puta eksplicitno spomenuta mikrostruktura, treba imati na umu da uzorci RVEa variraju u veličinama od nekoliko desetaka do nekoliko stotina μm .



Slika 18. Tipičan dvodimenzionalni reprezentativni volumenski element [18]

U ovom radu, svi reprezentativni volumenski elementi su diskretizirani osnovnim pravokutnim konačnim elementom CPE4, odnosno četverokutnim elementom prvog reda s C^0 kontinuitetom. Spomenuti konačni element opisan u je potpoglavlju 2.3.1.

3. ODREĐIVANJE REPREZENTATIVNOG VOLUMENSKOG ELEMENTA

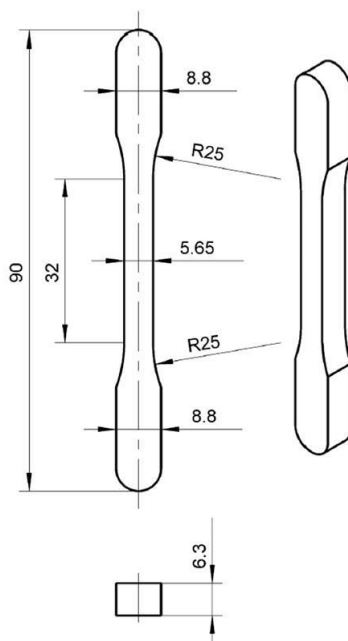
3.1. Metalografska struktura čelika Astaloy Mo+0,2C

Kao što je spomenuto u prethodnom potpoglavlju, za modeliranje mehaničkog ponašanja heterogenih materijala, potrebno je pronaći referentnu veličinu RVEa. Kako bi to uopće bilo moguće, nužno je poznavati raspored konstituenata na mikrorazini. Nad epruvetom od sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C gustoće $7,1 \text{ g/cm}^3$ (slika 19.) napravljeno je metalografsko ispitivanje mikrostrukture.



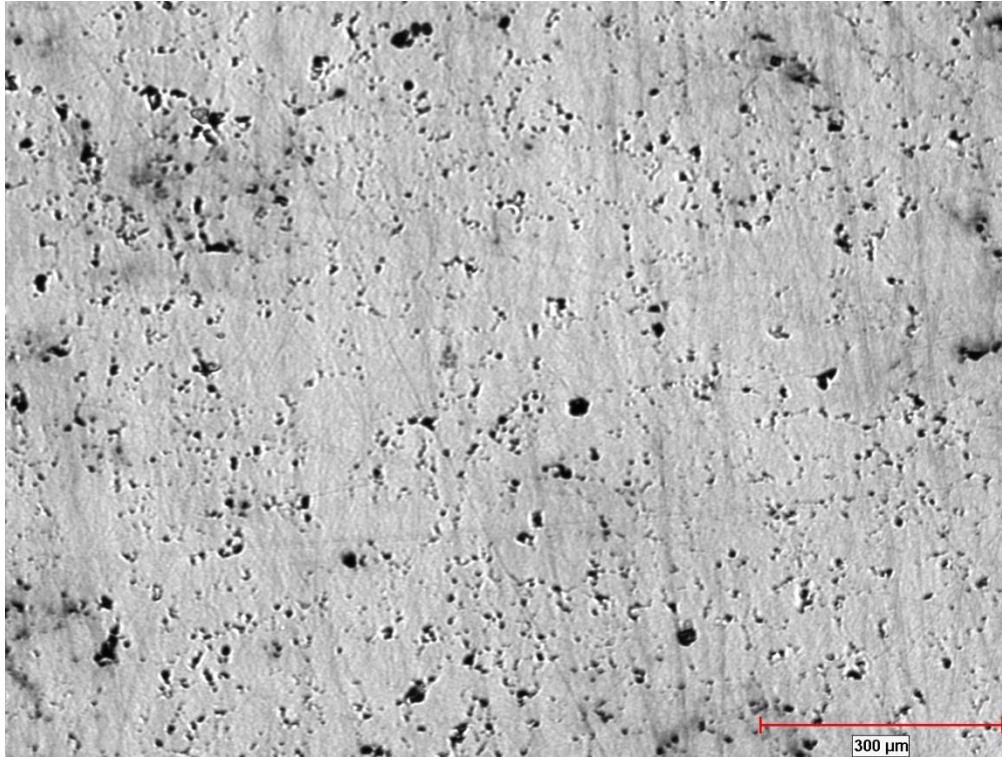
Slika 19. Prikaz epruvete načinjene od Astaloy Mo-0,2C

Uzorci za metalografiju moraju biti dovoljno veliki, tako da se nad njima može provesti naknadna obrada, npr. poliranje, zbog dobivanja kvalitetnijeg uvida u mikrostrukturu promatranog materijala. Epruveta je presječena uzdužno te su prve metalografske snimke napravljene uz rub prihвата, dalje od sredine. Dimenzije i oblik standardne epruvete su prikazani na slici 20.



Slika 20. Dimenzije i oblik standardne epruvete

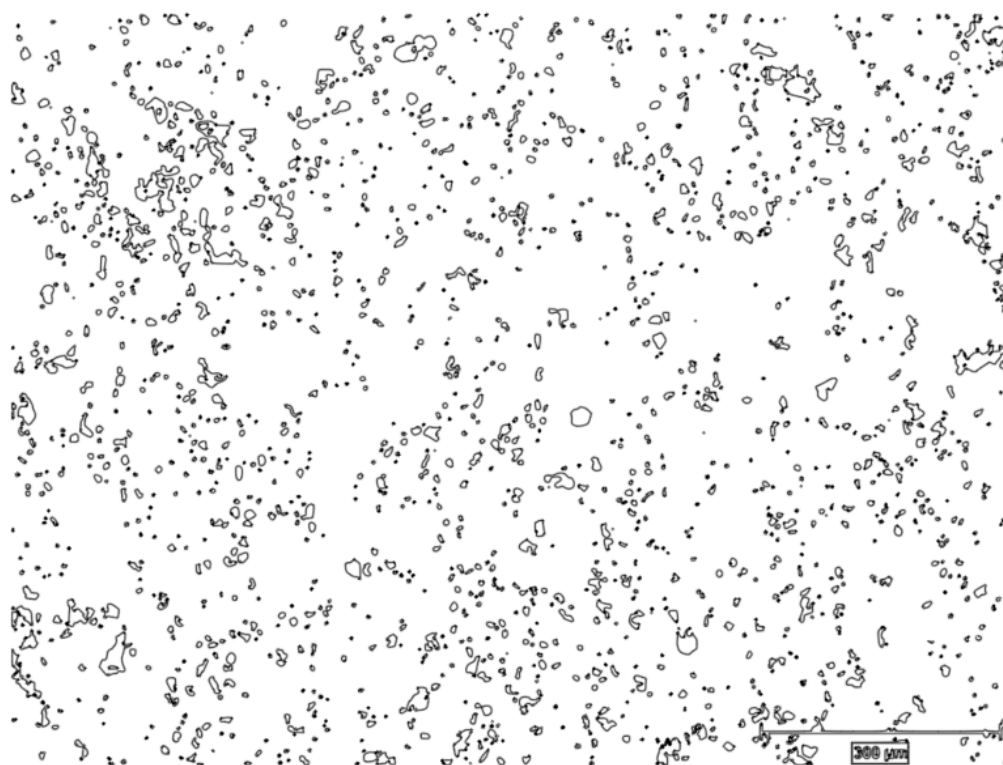
Sljedeći korak, nakon provedbe metalografskog ispitivanja, je prevođenje metalografske snimke u digitalni oblik prikladan za provedbu daljnje numeričke analize. Digitalno je obrađena metalografska snimka polirane epruvete uvećane 50x. Ista je prikazana na slici 21.



Slika 21. Metalografska snimka polirane epruvete uvećane 50x

Na slici 21. vidljive su nasumično raspoređene pore u metalnoj matrici, odnosno u feritu, sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C. Veličina i oblik pora su također nasumični te ne prate nikakav obrazac.

Nadalje, upotrebom mrežnog pretvornika slika u vektorski format (engl. *on-line converter PNG to DXF*), slika 21. je pretvorena u oblik pogodan za učitavanje u Autodesk-ovom programskom paketu *AutoCAD 2019 – STUDENT VERSION* (u daljnjem tekstu *AutoCAD*), točnije u DXF oblik. Nakon učitavanja u *AutoCAD*, slika 21. je poprimila oblika sa slike 22.



Slika 22. Digitalizirana metalografska snimka

Usporedbom slike 21. i slike 22. zaključuje se kako su raspored pora unutar metalne matrice, veličina i oblik pora ostali očuvani u odnosu na original. Time će se doprinijeti boljoj i točnijoj procjeni mehaničkog ponašanja metalne matrice sinteriranog čelika.

Zatim, unutar *AutoCAD*-a je provedeno utvrđivanje postotka poroznosti mikrostrukture sa slike 22. S obzirom da je razmatrana teorijska gustoća epruvete sinteriranog čelika jednaka $\rho_{epr} = 7,1 \text{ g/cm}^3$, u istom volumenu bi prosječni teorijski postotak poroznosti p_t , u odnosu na gustoću klasičnog čelika $\rho_{\check{c}} = 7,86 \text{ g/cm}^3$, iznosio:

$$p_t = \left(1 - \frac{\rho_{epr}}{\rho_{\check{c}}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{7,1}{7,86}\right) \cdot 100\% = 9,67\%. \quad (46)$$

S obzirom da je utvrđeni postotak poroznosti unutar *AutoCAD*-a $p_{acad} = 5,97\%$, uočava se razlika između utvrđene i prosječne, proračunate gustoće iz izraza (46). Unatoč toj razlici, numeričko utvrđivanje veličine RVEa je provedeno u nastavku. Također, metalografske snimke su uzete blizu rubova uzdužno presječne epruvete te je na tim mjestima za očekivati manju gustoću. Isto tako, gustoća sinteriranog čelika bi se u zavisnosti od udaljenosti od sredine trebala smanjivati. No, s obzirom na generalnu

nasumično raspoređenost pora, ne možemo očekivati prosječnu, proračunatu gustoću na svakom dijelu epruvete. U tom slučaju, potrebno je ispitivanje provesti na različitim mjestima epruvete kako bi se dobio kvalitetniji uvid u stvarno stanje promatranog materijala.

3.2. Metoda odabira veličine RVEa

Veličine RVEa se najčešće kreću u desetinkama i stotinkama milimetara. Odabiru RVEa se pristupilo s oprezom. Pored toga, utvrđena su sljedeća svojstva koja svaki RVE mora zadovoljiti prilikom i nakon odabira:

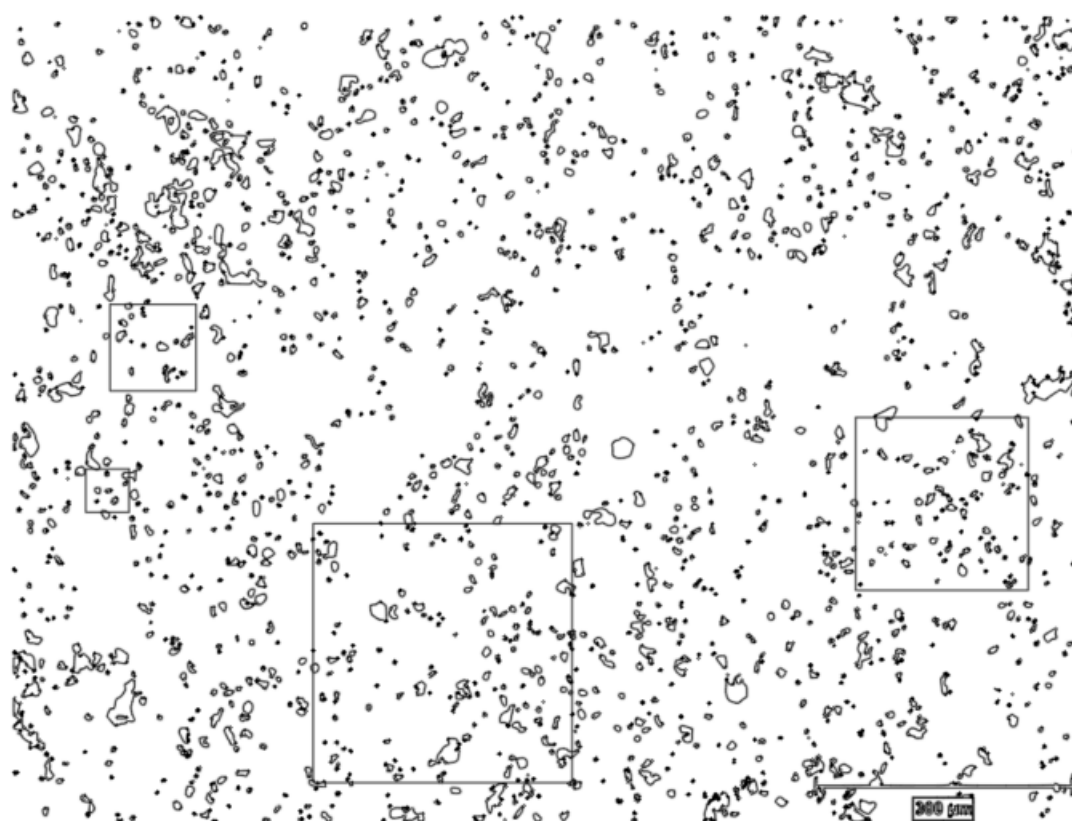
- svaki odabrani RVE mora nužno biti kvadratnog oblika,
- pore koje sijeku rubove RVEa se uklanjaju i ne razmatraju,
- pore koje su jako blizu rubova su također izuzete iz razmatranja, radi lakše kasnije diskretizacije mreže i provedbe analize,
- odabrani RVEi se ne smiju preklapati s drugim RVEima, kako bi se obuhvatio što veći dio metalografske snimke uzorka radi sveobuhvatnijeg razumijevanja mehaničkog ponašanja mikrostrukture, i
- postotak poroznosti svakog RVEa mora biti unutar nekog dogovorenog tolerancijskog okvira.

U tablici 2. prikazane su uzete veličine RVEa od manjih prema većim, sve zajedno četiri različite veličine. Uz to, utvrđena je simbolična nomenklatura koja će poslužiti za lakše prikazivanje i razumijevanje daljnjih postupaka.

Tablica 2. Odabrane veličine RVEa

Veličina RVE-a [mm x mm]	Oznaka RVE-a
0,05x0,05	RVE005
0,1x0,1	RVE010
0,2x0,2	RVE020
0,3x0,3	RVE030

Veličine RVEa iz tablice 2. i njihov međusobni prostorni raspored prikazan je na slici 23.

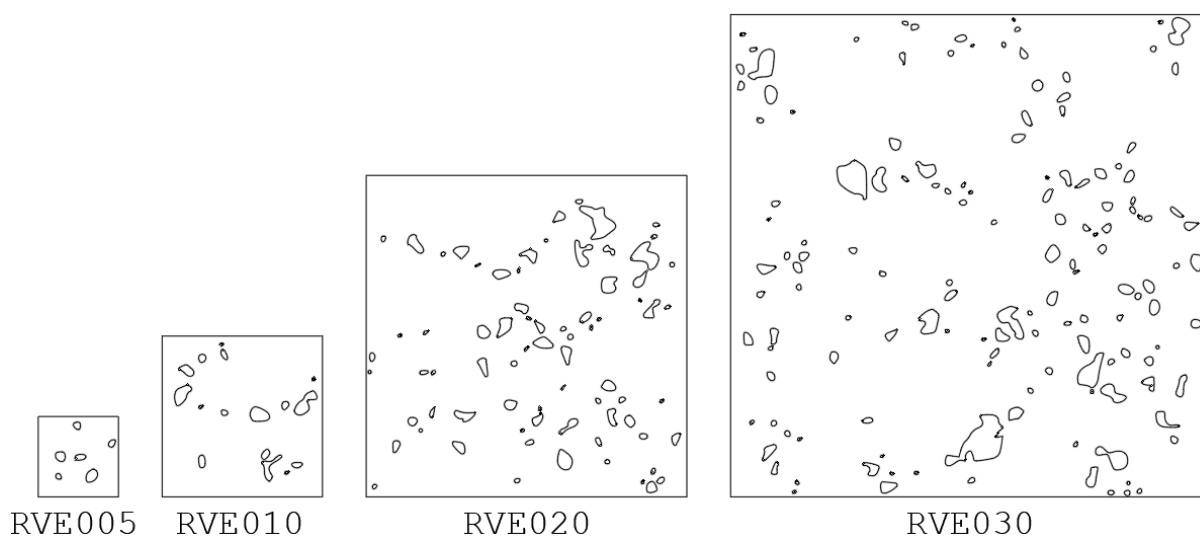


Slika 23. Prostorni raspored RVEa na promatranom području mikrostrukture

Analogno kao i na razini promatrane mikrostrukture, utvrđeni su postotci poroznosti svake pojedine veličine RVEa. Približiti se postotkom poroznosti RVEa teorijskoj, proračunatoj gustoći nije bilo moguće. Tokom odabira vodilo se računa da svi RVEi budu unutar određenih tolerancijskih okvira te je utvrđeno da su postotci poroznosti svih RVEa nakon odabira ušli unutar sljedećih granica:

$$p_{RVE,uk} = 5 \pm 0,2\%. \quad (47)$$

Može se zaključiti, da je uzorkovanje provedeno u vrlo uskom tolerancijskom okviru. Nadalje, svaki od odabranih RVEa je razmatran i uređivan zasebno prema gore navedenim svojstvima. Konačan i uređen oblik RVEa spremnih za daljnju analizu je prikazan na slici 24.



Slika 24. Konačne veličine RVEa

3.3. Validacija metode odabira veličina RVEa

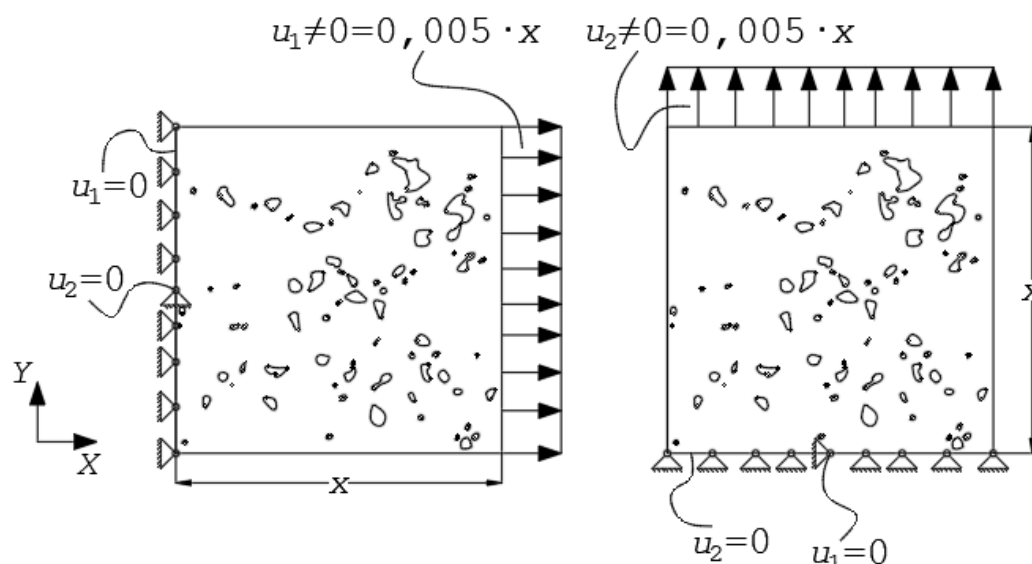
U svrhu odabira reprezentativne veličine RVEa, ispitivanja su provedena nad svim odabranim veličinama. Kako bismo saznali točnu veličinu RVEa, potrebno je provesti validaciju metode odabira veličina RVEa. Za provedbu iste korišten je programski paket za analizu konačnih elemenata *Abaqus*. Korišteni su konačni elementi za opisivanje ravninskog stanja deformacije CPE4 (opisani u potpoglavlju 2.3.1). Postupak validacija je osmišljen na sljedeći način:

- nad svakim RVEom je potrebno napraviti horizontalni i vertikalni vlačni test,
- prosjek ta dva testa bi služio kao referentna vrijednost prilikom usporedbe i utvrđivanja referentne veličine RVEa,
- s obzirom da su mehanička svojstva materijala nepoznata, zadan je elasto-idealno plastičan materijal s potrebnim vrijednostima prema tablici 3.,
- potrebno je nametnuti rubne uvjete pomaka na jedan brid, dok na nasuprotni brid nametnuti pomak u iznosu od 0,5% duljine brida \times pojedinog RVEa (slika 25.),
- kada se krivulja u dijagramu naprezanje-deformacija poklopi u nekom unaprijed definiranom postotku za prva dva RVEa, prvi od ta dva proglašavamo reprezentativnim za daljnje razmatranje.

Tablica 3. Elastično idealno plastične karakteristike materijala za provedbu validacije

Youngov modul, E [GPa]	Poissonov faktor, ν [-]	Granica tečenja, R_e [MPa]
200	0,288	240

Na slici 25. prikazani su nametnuti rubni uvjeti i opterećenje za RVE020 za horizontalni (slika 25.a) i vertikalni (slika 25.b) vlačni test.



Slika 25. Nametnuti rubni uvjeti i opterećenje (a. slika slijeva, b. slika zdesna)

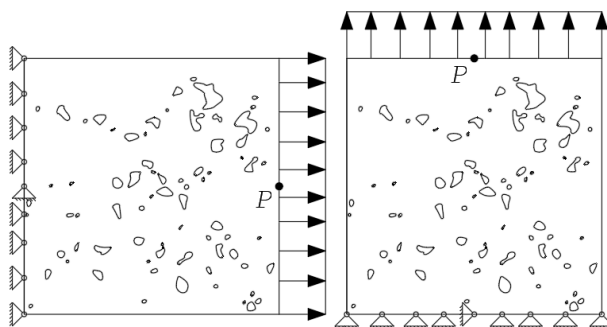
U nastavku analize, generirana je mreža konačnih elemenata. S gušćom mrežom će se bolje reprezentirati mehaničko ponašanje homogenog materijala. Kod generiranja mreže korišteni su isti parametri za svaki RVE, te su horizontalni i vertikalni testovi napravljeni na identičnim mrežama za pojedini RVE radi što vjerodostojnije usporedbe rezultata. Korištenjem istih parametara za svaki RVE postigla se približno ista veličina konačnih elemenata na svim RVEima. Konačno, u tablici 4. prikazan je broj korištenih konačnih elemenata u analizi horizontalnog i vertikalnog vlačnog testa RVEa.

Tablica 4. Broj korištenih konačnih elemenata

Oznaka RVE-a	Horizontalni vlačni test/Vertikalni vlačni test
RVE005	2560
RVE010	11498
RVE020	52209
RVE030	115479

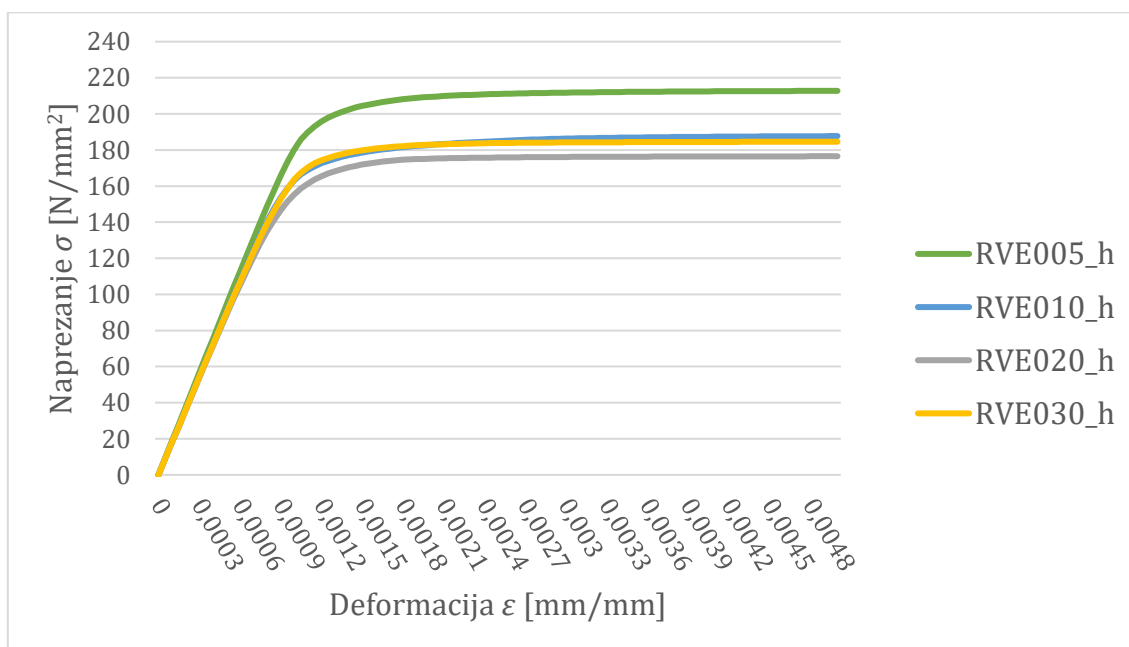
Nadalje, nakon definiranja svih ulaznih parametara, provedene su analize horizontalnog i vertikalnog vlačnog testa za svaki RVE. Dijagrami naprezanje-deformacija ($\sigma - \varepsilon$

dijagrami) su dobiveni za svaki promatrani slučaj. Napravljeni su na način da se reaktivne sile, u smjeru opterećenja za pojedini slučaj na bridu gdje se nalazi točka P (slika 26.), podijele s površinom brida, na kojem djeluje opterećenje, za dobivanje naprezanja σ . S druge strane, deformacija ε promatrana za točku P je dobivena kao pomak te točke, u smjeru djelovanja opterećenja, podijeljen s duljinom brida na kojem se nalazi točka P.

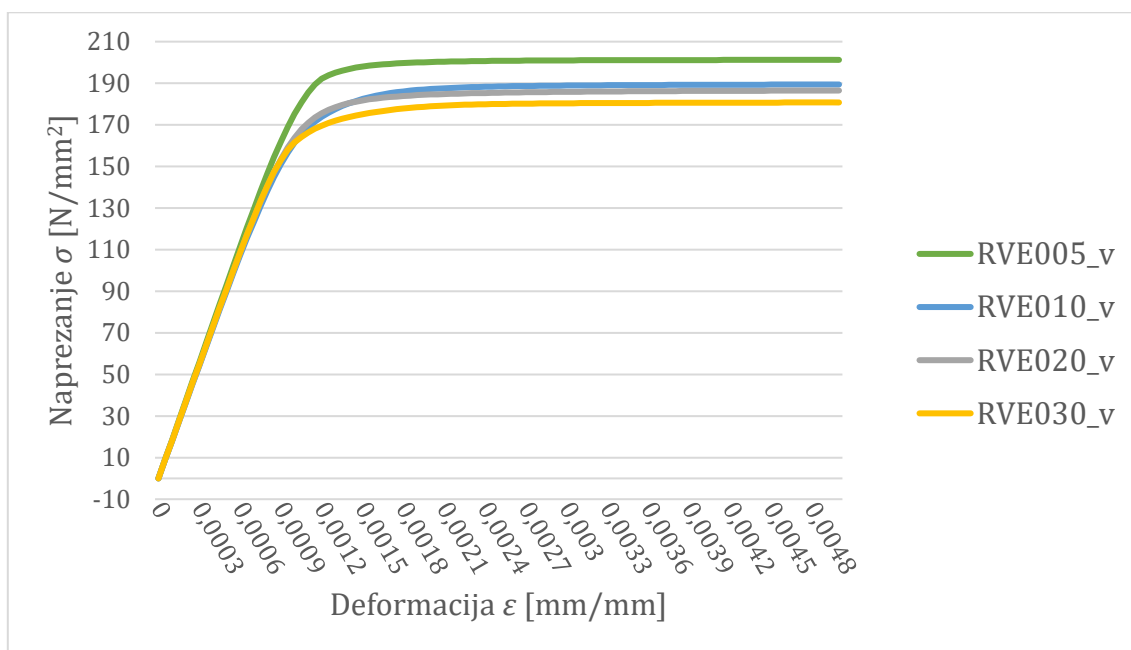


Slika 26. Položaj točke P na RVEima za horizontalni i vertikalni vlačni test

Zatim, $\sigma - \varepsilon$ dijagrami su prikazani zasebno za sve slučajeve horizontalnog i vertikalnog vlačnog testa (slika 27. i slika 28.). Simbolički je iza oznake RVEa dodano proširenje $_h$ ili $_v$, koje pobliže označava vrstu provedenog testa nad promatranim RVEom.

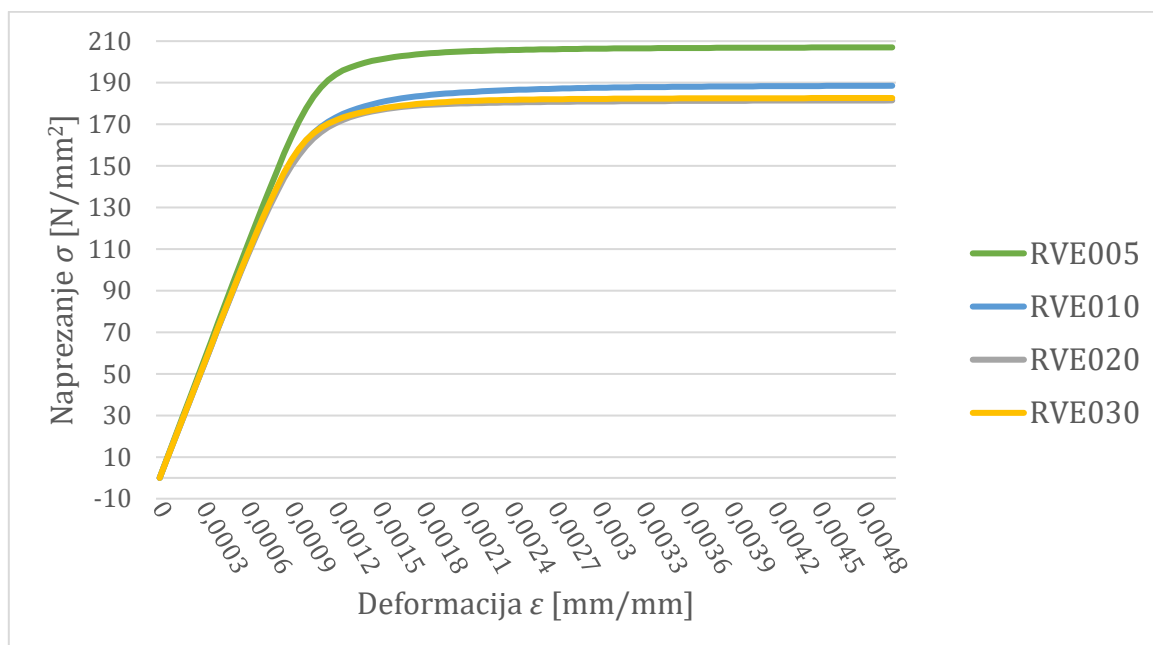


Slika 27. Dijagram naprezanje-deformacija za horizontalni vlačni test



Slika 28. Dijagram naprezanje-deformacija za vertikalni vlačni test

S ciljem da provjerom vlačnog testa u oba smjera dobijemo kompletniju sliku mehaničkog ponašanja RVEa, kreiran je zasebno $\sigma - \epsilon$ dijagram kao prosjek istih točaka horizontalnog i vertikalnog vlačnog testa (slika 29.), koji će u nastavku poslužiti kao referentni dijagram prilikom konačnog određivanja veličine RVEa.



Slika 29. Uprosječeni dijagram naprezanje-deformacija za sve RVEe

Iz slike 29. uočava se sljedeće: manje veličine RVEa su kruće od većih, odnosno krutost RVEa pada povećanjem veličine uzorka. Dijagram sa slike 29. možemo podijeliti u dva dijela: u linearno-elastični i idealno plastični dio. Analizom podataka o naprezanju i deformacijama zaključuje se sljedeće:

- u linearno-elastičnom području se vrijednosti naprezanja pojedinih RVEa, u odnosu na deformaciju, ponašaju linearno uz postotnu razliku od 5,55% do vrijednosti deformacije $\varepsilon = 0,0007$ mm/mm, što je unutar inženjerskih dopuštenih odstupanja,
- u idealno plastičnom dijelu, krivulja RVE030 se kvalitativno poklapa s krivuljom koju reprezentira RVE020 i
- egzaktno, postotna pogreška između RVE020 i RVE030 je 1,99% duž cijele krivulje.

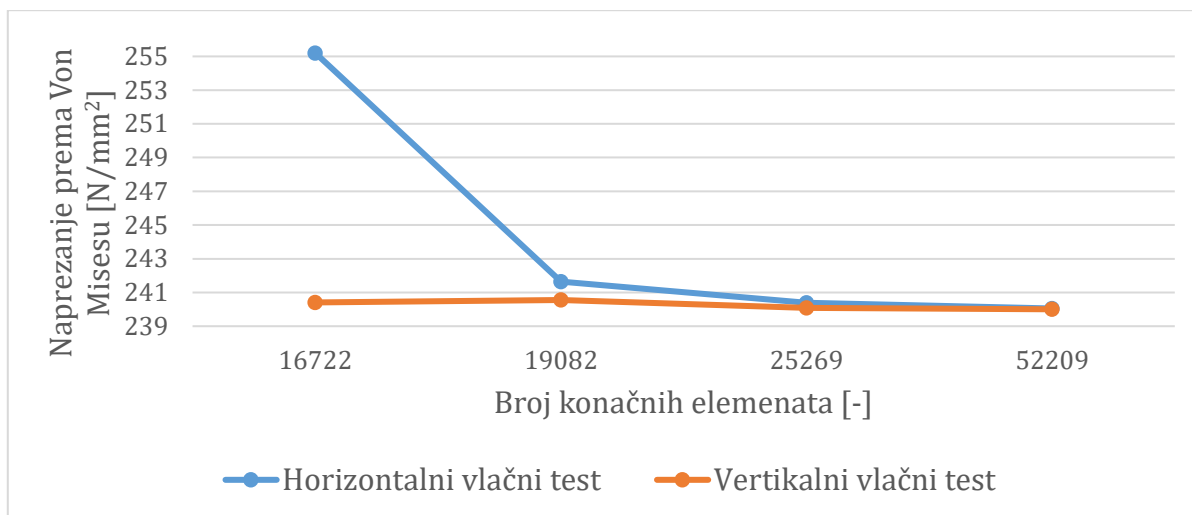
Daljnijim povećanjem dimenzija RVE, primjerice uzimanjem uzorka RVE040 (analogno tablici 2., dimenzije bi bile 0,4x0,4 – u milimetrima), $\sigma - \varepsilon$ dijagram tog uzorka bi se poklopio s vrijednostima RVE020 i RVE030. U ovom slučaju, RVE030 je služio kao potvrda RVE020, odnosno RVE030 je potvrdio svojim poklapanjem da RVE020 reprezentativno predstavlja mehaničko ponašanje mikrostrukture. Stoga, RVE020 proglašavamo reprezentativnim volumenskim elementom, koji će biti isključivo korišten u daljnjem radu.

3.4. Konvergencija rezultata odabrane veličine RVEa

Iako je RVE020 proglašen reprezentativnim, valja pokazati konvergenciju mreže odabranog RVEa. S obzirom da su podaci za generiranje mreže uzeti na način da se na svim RVE-ima dobiju približno iste veličine konačnih elemenata, definirane su gušće mreže u samom startu. Stoga, RVE020 sa svojom početnom mrežom od 52209 konačnih elemenata je poslužio kao referentni model mreže u procjeni konvergencije rezultata. Konvergencija mreže je napravljena za horizontalni i vertikalni vlačni test. U svakom od tih testova je promatrana konvergencija ekvivalentnog naprezanja prema *von Misesu* u točki P (slika 26.).

Ukazujući na činjenicu da je u početku napravljena gušća mreža konačnih elemenata, za pokazivanje konvergencije naprezanja prema *von Misesu* u točki P, definirane su grublje mreže sa redom 16722, 19082 i 25269 konačnih elemenata. U konačnici, konvergencija

je prikazana za četiri različite mreže sa sljedećim brojem konačnih elemenata, redom: 16722, 19082, 25629 i 52009. Na slici 30. vidljiva je konvergencija naprezanja prema *von Misesu* u točki P, uz napomenu da je kod horizontalnog vlačnog testa izraženija.

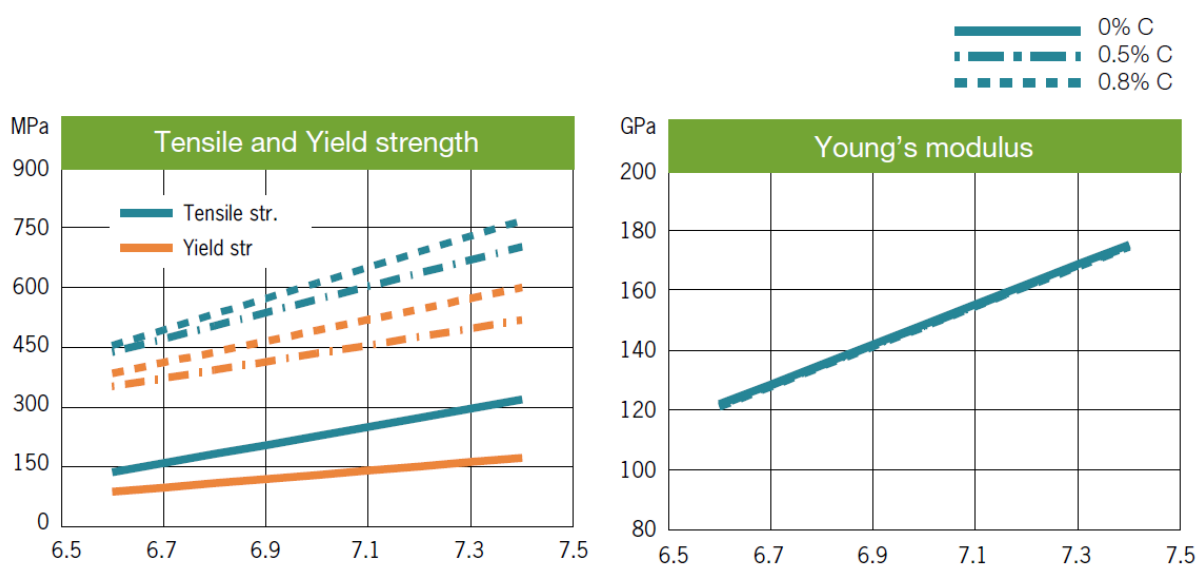


Slika 30. Konvergencija ekvivalentnog naprezanja prema von Misesu u točki P

4. ODREĐIVANJE MATERIJALNIH KARAKTERISTIKA SINTERIRANOG ČELIKA ASTALOY Mo+0,2C

4.1. Linearno-elastične karakteristike sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

Pregledom literature, u [11] su prikazani dijagrami koji opisuju promjenu Youngova modula E , granice tečenja R_e i vlačne čvrstoće R_m u zavisnosti od gustoće za sinterirane čelike grupe Astaloy Mo, sa sljedećim postocima ugljika: 0%C, 0,5%C i 0,8%C. S obzirom da promatrani sinterirani čelik sadrži 0,2%C u svom sastavu, vrijednosti u dijagramima su interpolirane između linija za 0%C i 0,5%C za gustoću 7,1 g/cm³.



Slika 31. Dijagrami ovisnosti modula elastičnosti, granice tečenja i vlačne čvrstoće o gustoći sinteriranog čelika

Upotrebom alata *WebPlotDigitizer-4.3* i linearne interpolacije dobivene su sljedeće materijalne karakteristike:

Tablica 5. Materijalne karakteristike sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C gustoće 7,1 g/cm³

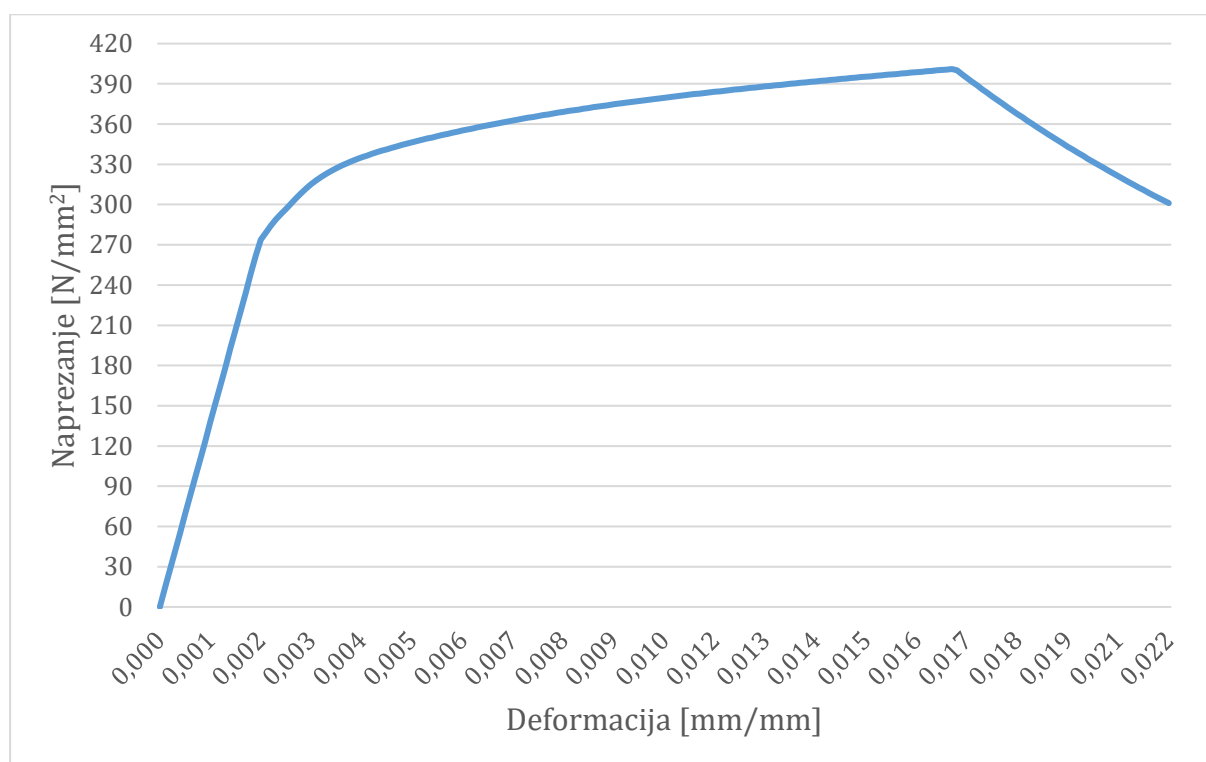
Youngov modul, E [MPa]	Granica tečenja, R_e [MPa]	Vlačna čvrstoća, R_m [MPa]
155682	270	398

Vrijednosti u tablici 5. su zaokružene na cijeli broj. S obzirom da eksperimentalna provedba statičkog vlačnog pokusa na epruvetama od sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C nije bila moguća zbog posljedica uzrokovanih pandemijom koronavirusa Covid-

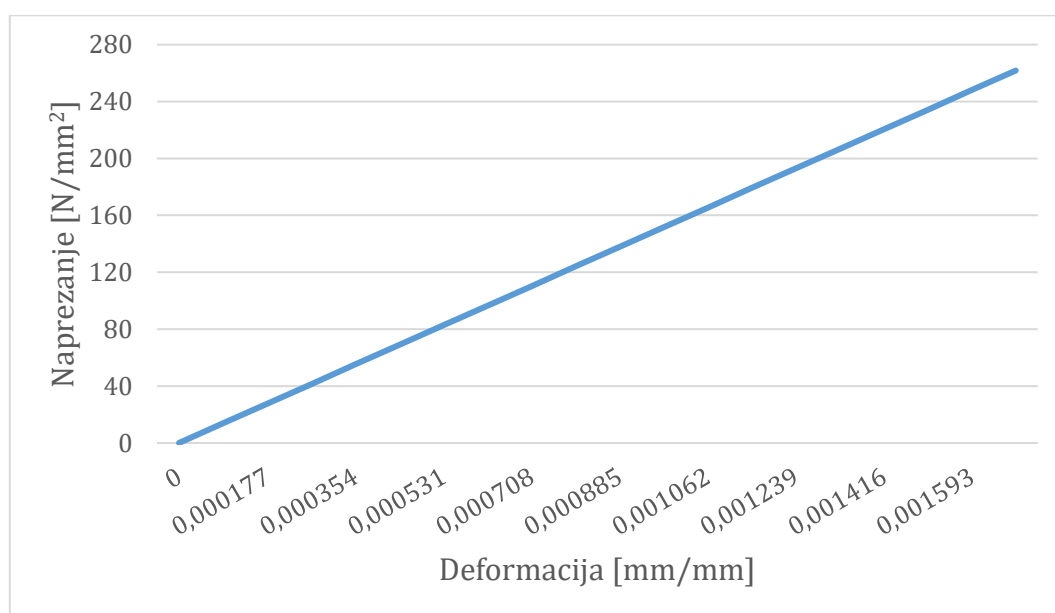
19, statički vlačni pokus je napravljen numerički primjenom napredne numeričke metode faznih polja (engl. *Phase Field Method*), na temelju ulaznih parametara iz tablice 5.

Numerička simulacija je provedena na jednom konačnom elementu, iz kojeg je dobiven dijagram naprezanje-deformacija (slika 31.), koji predstavlja mehaničko ponašanje homogenog materijala na makrorazini uslijed statičkog vlačnog testa (odnosno, ne razmatra se mikrostruktura materijala).

Budući da je dio problematike ovog rada određivanje linearno-elastičnih karakteristika sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C, naglasak je stavljen na linearno-elastični dio dijagrama naprezanje-deformacija sa slike 32. Linearno-elastično područje uprosječenog dijagrama naprezanje-deformacija prikazano je na slici 33.



Slika 32. Dijagram naprezanje-deformacija sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C na makrorazini



Slika 33. Linearno-elastično područje dijagrama naprezanje-deformacija na makrorazini

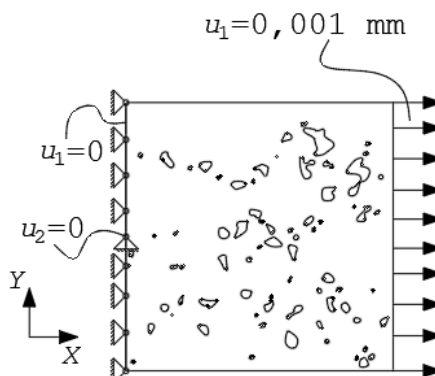
Linearno-elastično područje dijagrama naprezanje-deformacija na makrorazini je pravac koji ide iz ishodišta koordinatnog sustava. Koeficijent smjera tog pravca jednak je modulu elastičnosti. U ovom slučaju, modul elastičnosti na slici 33. jednak je modulu elastičnosti iz tablice 5.

Nadalje, sljedeći zadatak je pronaći modul elastičnosti feritne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C korištenjem RVEa. Kako bismo odredili modul elastičnosti metalne matrice, linearno-elastični odziv RVEa bi se u tom slučaju trebao poklapati s linearno-elastičnim područjem uprosječenog dijagrama naprezanje-deformacija. Očigledno je da je modul elastičnosti feritne matrice u RVEu veći od modula elastičnosti homogenog materijala na makrorazini, pošto je na razini RVEa prisutan utjecaj mikrostrukture, odnosno pora, koje predstavljaju šupljine u materijalu.

Za potrebe određivanja modula elastičnosti feritne matrice, upotrijebljen je RVE020. Upotrebom programskog paketa *Abaqus* dobiveni su uprosječeni dijagrami naprezanje-deformacija za linearno elastično ponašanje materijala.

Kao opterećenje RVEa, korišteni su rubni uvjeti pomaka za horizontalni vlačni test, uz narinuto opterećenje od 0,5% duljine brida, jednako kao i u potpoglavlju 3.3. RVE je diskretiziran mrežom od 52009 CPE4 konačnih elemenata, koja zadovoljava uvjete konvergencije, što je prikazano u potpoglavlju 3.4.

Rubni uvjeti i opterećenje RVE020 za određivanje modula elastičnosti metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C prikazani su na slici 33. Kako znamo da je duljina brida RVE020 jednaka 0,2 mm, na slici 34. prikazan je točan iznos zadanog pomaka na desnom bridu.

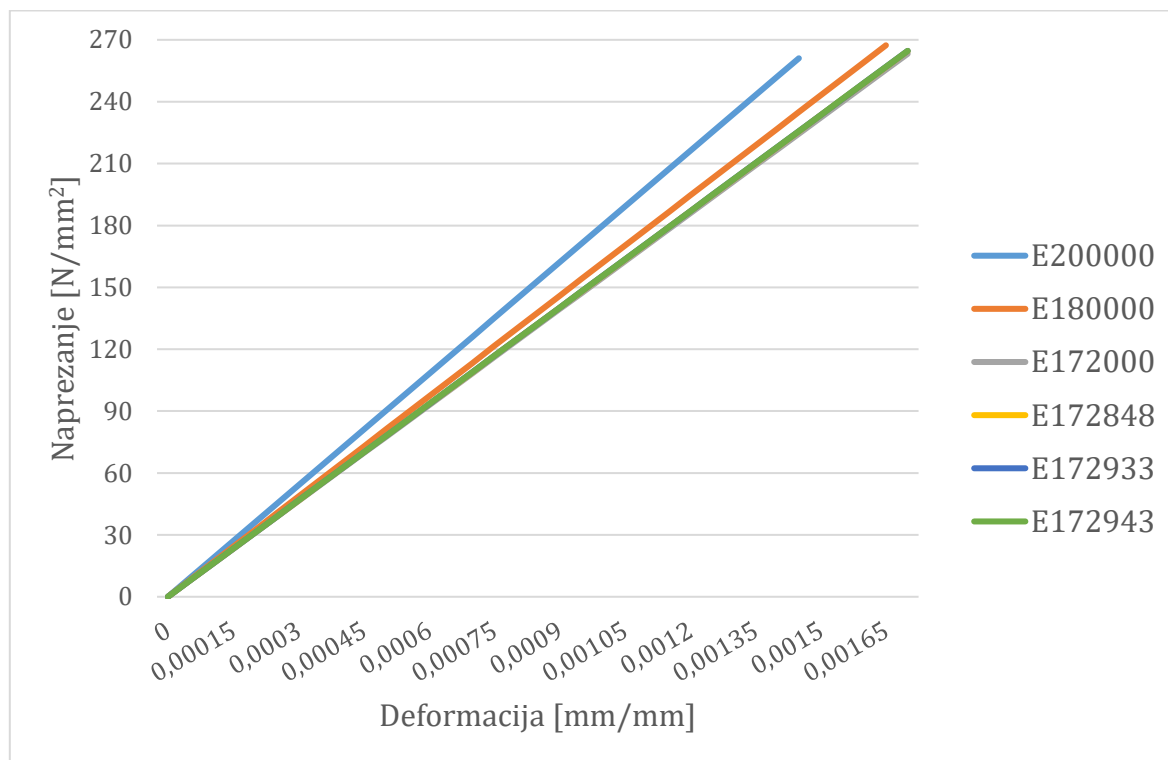


Slika 34. Rubni uvjeti i opterećenje RVE020 za određivanje modula elastičnosti metalne matrice
Tijekom traženja modula elastičnosti metalne matrice, Poissonov faktor je držan konstantnim, tj. $\nu = 0,3 = \text{konst.}$ Početni iznos modula elastičnosti metalne matrice odgovarao je modulu elastičnosti elastično idealno plastičnog materijala, zadanog preko tablice 3. Iznos modula elastičnosti RVE020 je dobiven manji u svakoj iteraciji te se isti uspoređivao s modulom elastičnosti homogenog materijala na makrorazini. Provedeno je ukupno šest iteracija, sve dok se modul elastičnosti RVE020 nije u potpunosti poklopio s modulom elastičnosti homogenog materijala na makrorazini. Podaci za svaku iteracije su dokumentirani i prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Određivanje modula elastičnosti metalne matrice

Broj iteracije	Modul elastičnosti metalne matrice [MPa]	Uprosječni modul elastičnosti RVE020 [MPa]	Modul elastičnosti homogenog materijala na makrorazini [MPa]
1	200000	180040	155682
2	180000	162036	
3	172000	154834	
4	172848	155597	
5	172933	155675	
6	172943	155682	

Uprosječni modul elastičnosti RVE020 kroz postupak iteriranja je prikazan i dijagramski na slici 35. Svakom pravcu je dodijeljen naziv E_{xxxxxx} , gdje $xxxxxx$ predstavlja modul elastičnosti metalne matrice u MPa. Budući da su vrijednosti modula elastičnosti u 3., 4., 5. i 6. iteraciji približno iste, na slici 35. se to manifestira poklapanjem pravaca.



Slika 35. Moduli elastičnosti metalne matrice

Analizom rezultata prikazanih u tablici 6., modul elastičnosti metalne matrice jednak je:

$$E_{mm} = 172943 \text{ MPa.} \quad (48)$$

Konačno, mehaničko ponašanje u linearno-elastičnom području RVE020, zadanog preko modula elastičnosti metalne matrice E_{mm} , će biti identično mehaničkom ponašanju u linearno-elastičnom području homogenog materijala na makrorazini, zadanog preko modula elastičnosti u tablici 5., uz konstantni iznos Poissonovog faktora $\nu = 0,3$.

4.2. Zamorne karakteristike sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

Kao što je spomenuto u potpoglavlju 4.1., eksperimentalni testovi na epruvetama od sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C gustoće $7,1 \text{ g/cm}^3$ nisu napravljeni. Pošto je dio problematike ovog rada utvrđivanje zamornih karakteristika metalne matrice spomenutog sinteriranog čelika, nužno je poznavati zamorne karakteristike homogenog materijala na makrorazini. U ovom slučaju, predmet razmatranja je visokociklički zamor materijala, kojeg je moguće u potpunosti opisati poznavanjem sljedećih zamornih karakteristika, za stalan odnos naprezanja $r = \text{konst.}$:

- a) S'_f – koeficijent zamorne čvrstoće,
- b) b – eksponent zamorne čvrstoće i
- c) S_r^{FL} – trajna dinamička izdržljivost.

U potpoglavlju 2.4.7. definiran je Basquinov zakon (39) preko kojeg se, uz poznavanje zamornih karakteristika a), b) i c), može u potpunosti definirati $S - N$ krivulja. Pregledom literature, u [21] dane su zamorne karakteristike dvaju sinteriranih čelika s kombinacijom legirajućih elemenata Cu-Ni-Mo. Nažalost, u literaturi zamorne karakteristike promatranog sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C gustoće $7,1 \text{ g/cm}^3$ nisu pronađene.

Za potrebe ovog rada uzete su zamorne karakteristike homogenog materijala na makrorazini za sinterirani čelik Distaloy AB (u daljnjem tekstu Distaloy AB) s dodacima lubrikanta Kenolube 11 (0,58% masenog udjela) i ugljika u obliku uranijevog fluorida UF4 (0,3% masenog udjela) gustoće $7,07 \text{ g/cm}^3$, za kojeg su statička mehanička i zamorna svojstva dana u [21].

Razlog zbog kojeg su uzete te zamorne karakteristike leži u činjenici da su statička mehanička svojstva sinteriranog čelika Distaloy AB najbliža statičkim mehaničkim svojstvima sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C. No, s obzirom da je mikrostruktura Astaloya Mo+0,2C jako porozna, a poznato je da poroznost izaziva velike koncentracije naprezanja u mikrostrukturi materijala, koje uvelike utječu na zamorno ponašanje materijala, lako je moguće da zamorna mehanička svojstva Astaloya i odabranog Distaloya nisu nimalo slična. U tablici 7., usporedno su prikazane statička mehanička svojstva za sinterirane čelike Astaloy Mo+0,2C i Distaloy AB.

Tablica 7. Usporedba statičkih mehaničkih svojstava sinteriranih čelika

	Modul elastičnosti, E [GPa]	Granica tečenja, R_e [MPa]	Vlačna čvrstoća, R_m [MPa]
Astaloy Mo+0,2C	155682	270	398
Distaloy AB	106000	281	446

Nadalje, iz [21] preuzete su sljedeće zamorne karakteristike sinteriranog čelika Distaloy AB na makrorazini za odnos naprezanja $r = 0,1$:

Tablica 8. Zamorne karakteristike sinteriranog čelika Distaloy AB

Koeficijent zamorne čvrstoće, S'_f [N/mm ²]	Eksponent zamorne čvrstoće, b [-]
530	-0,143

S obzirom da je istraživački fokus u [21] bio usmjeren na istraživanje utjecaja niskocikličkog zamora uslijed toplinske obrade, trajna dinamička izdržljivost materijala za dani slučaj opterećenja i odnos naprezanja nije navedena.

Također, poznato je da kod klasičnih čelika lom nastupa kod približno 2000000 promjena ciklusa do loma $2N_f$, tj. kod $2 \cdot 10^6$ promjena ciklusa do loma $2N_f$. Zbog nepoznavanja egzaktnosti vrijednosti trajne dinamičke izdržljivosti, $S - N$ dijagram će biti napravljen shodno zamornim karakteristikama iz tablice 8. te će se trajna dinamička izdržljivost očitati kod $2 \cdot 10^6$ promjena ciklusa do loma $2N_f$, odnosno kod $1 \cdot 10^6$ broja ciklusa do loma N_f .

Uvrštavanjem zamornih karakteristika iz tablice 8. u izraz (39), dobiva se sljedeće:

$$\log(S_a) = \log(S'_f) + b \log(N_f), \quad (49)$$

$$\log(S_a) = \log(530) + (-0,143)\log(N_f). \quad (50)$$

S obzirom da je u [21], u opisivanju Basquinova zakona, korišten broj promjena ciklusa do loma $2N_f$ umjesto broja ciklusa do loma N_f , isti će biti primijenjen u izrazu (50), koji poprima sljedeći oblik:

$$\log(S_a) = \log(530) + (-0,143)\log(2N_f). \quad (51)$$

Prije kreiranja $S - N$ dijagrama sinteriranog čelika Distaloy AB, koji predstavlja zamorno ponašanje homogenog materijala na makrorazini, u tablici 9. prikazana je promjena amplitude naprezanja S_a u ovisnosti o broju promjena ciklusa do loma $2N_f$.

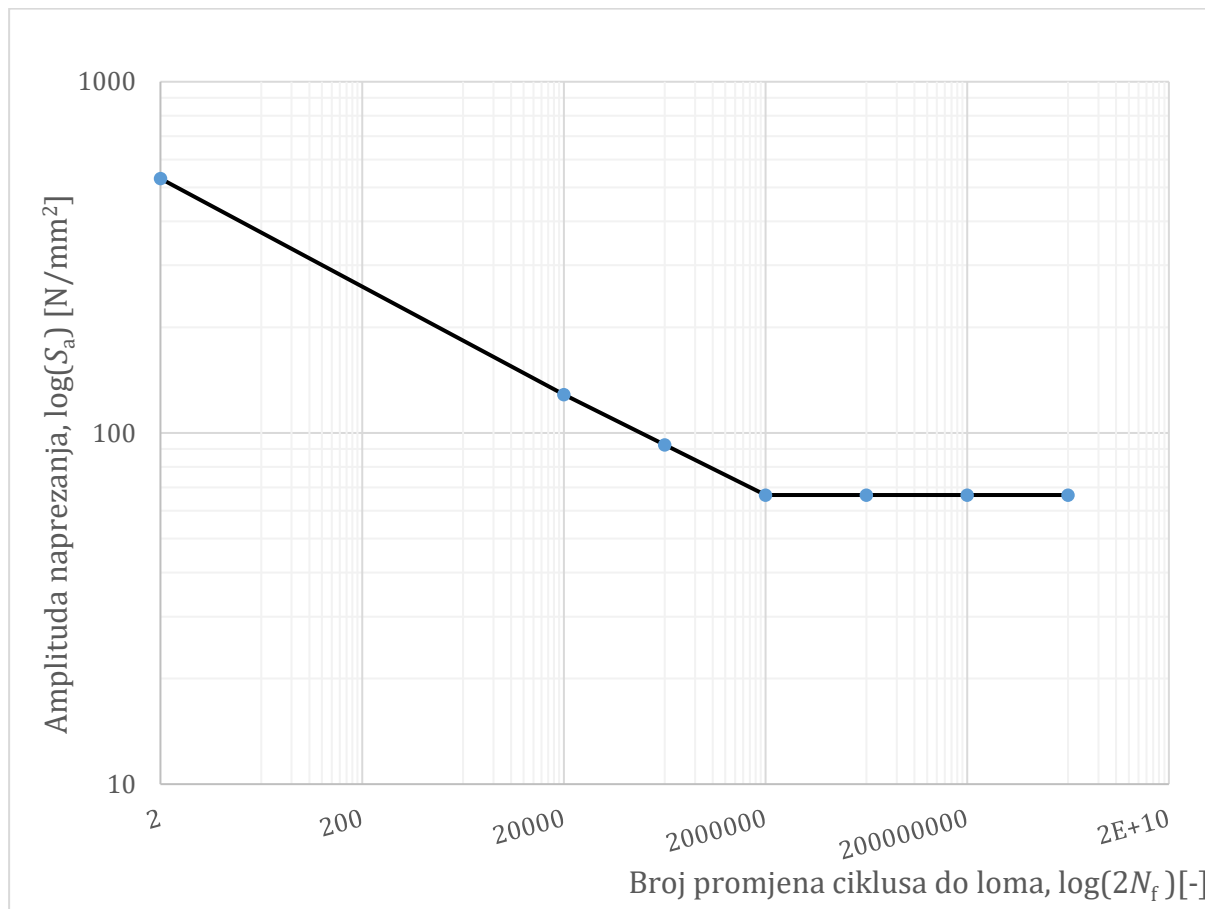
Tablica 9. Ovisnost amplitude naprezanja o broju promjena ciklusa do loma

Broj promjena ciklusa do loma, $2N_f$ [-]	Amplituda naprezanja, S_a [N/mm ²]
$2 = 2 \cdot 10^0$	530
$20000 = 2 \cdot 10^4$	128,6
$200000 = 2 \cdot 10^5$	92,5
$2000000 = 2 \cdot 10^6$	66,6
$20000000 = 2 \cdot 10^7$	66,6
$200000000 = 2 \cdot 10^8$	66,6
$2000000000 = 2 \cdot 10^9$	66,6

U suštini, izraz (51) predstavlja eksponencijalnu funkciju, koja teži nuli s povećanjem broja promjena ciklusa do loma. No, prilikom određivanja točaka $S - N$ krivulje, nakon $2 \cdot 10^6$ broja promjena ciklusa do loma, materijal teoretski može izdržati beskonačni broj ciklusa do loma ukoliko je amplituda naprezanja manja od trajne dinamičke čvrstoće materijala. Trajna dinamička čvrstoća materijala se u ovom slučaju određuje za $2 \cdot 10^6$ te, za $r = 0,1$, iznosi:

$$S_{0,1}^{FL} = 66,6 \frac{N}{\text{mm}^2}. \quad (52)$$

Konačno, $S - N$ dijagram za odnos naprezanja $r = 0,1$ poprima oblika prema slici 36.



Slika 36. $S-N$ dijagram homogenog materijala na makrorazini

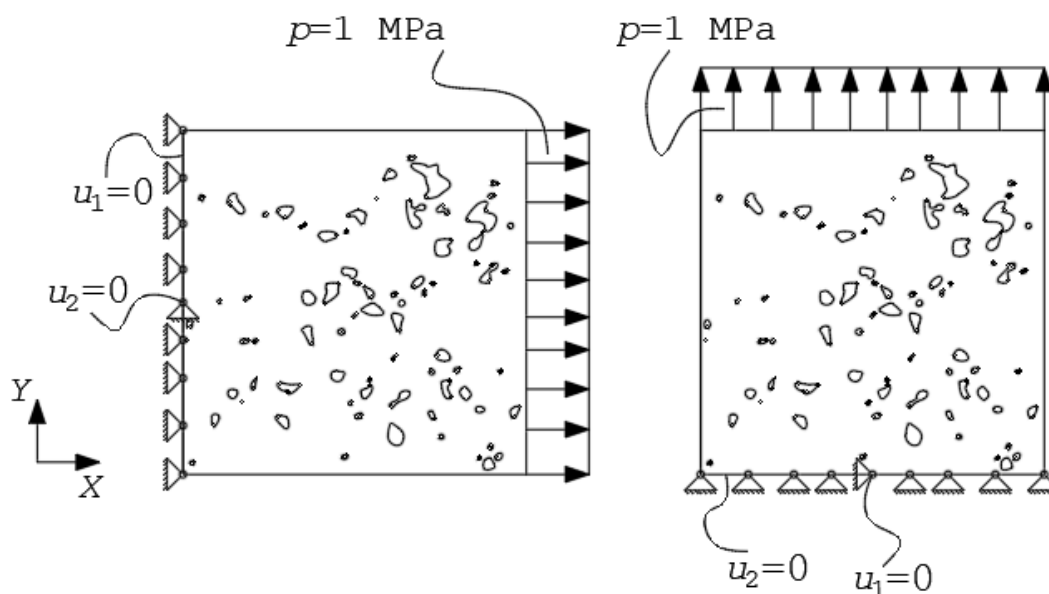
Na slici 36. prikazan je $S - N$ dijagram u logaritamskom mjerilu, koji reprezentira zamorno ponašanje homogenog materijala na makrorazini, odnosno zamorno ponašanje sinteriranog čelika Distaloy AB iz [21]. Nakon $2 \cdot 10^6$ broja promjena ciklusa do loma, krivulja zadržava vrijednost na $66,6 \text{ N/mm}^2$ što predstavlja trajnu dinamičku izdržljivost homogenog materijala na makrorazini za $r = 0,1$.

Sljedeći korak je određivanje zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C, tako da se, za isti slučaj opterećenja i isti odnos naprezanja r , broj promjena ciklusa do loma $2N_f$ (broj ciklusa do loma RVE020 u slučaju promatranja zamornog ponašanja) što više približi broju ciklusa do loma $2N_f$ homogenog materijala na makrorazini.

Zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C određene su za narinuta opterećenja u horizontalnom i vertikalnom smjeru, bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja i s utjecajem srednjeg naprezanja prema Goodmanu.

Za određivanje zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C korišten je programski paket *fe-safe* verzije 6.5 (u daljnjem tekstu *fe-safe*), odnosno proširenje programskog paketa *Abaqus* specijalizirano za modeliranje zamornog ponašanja materijala.

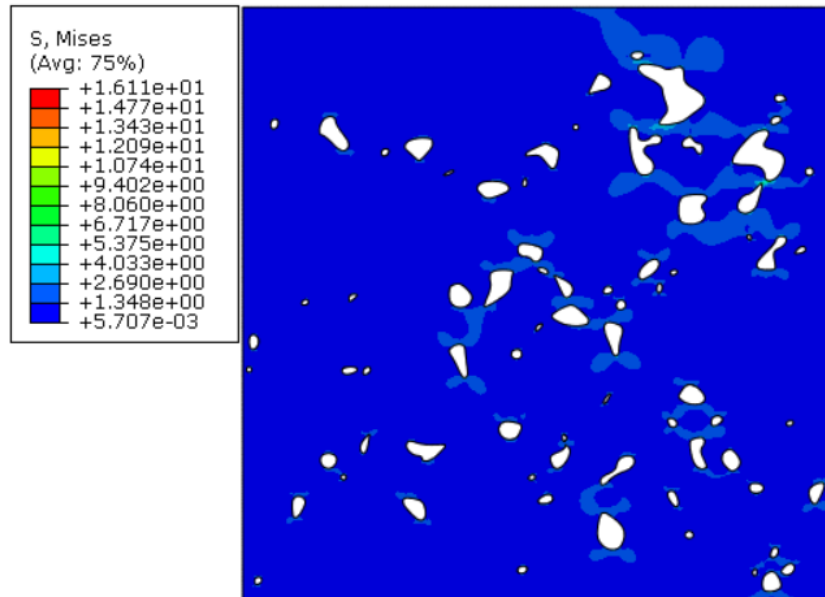
Prvi korak pri procjeni zamora je kreiranje jednostavne linearno-elastične analize modela na kojem promatramo zamor. Model je u ovom slučaju RVE020, koji je u oba smjera opterećen kontinuiranim nominalnim opterećenjem $p = 1$ MPa (slika 37.). Na suprotnim bridovima zadani su rubni uvjeti pomaka, analogno kao i kod određivanja linearno-elastičnih karakteristika materijala u potpoglavlju 4.1.



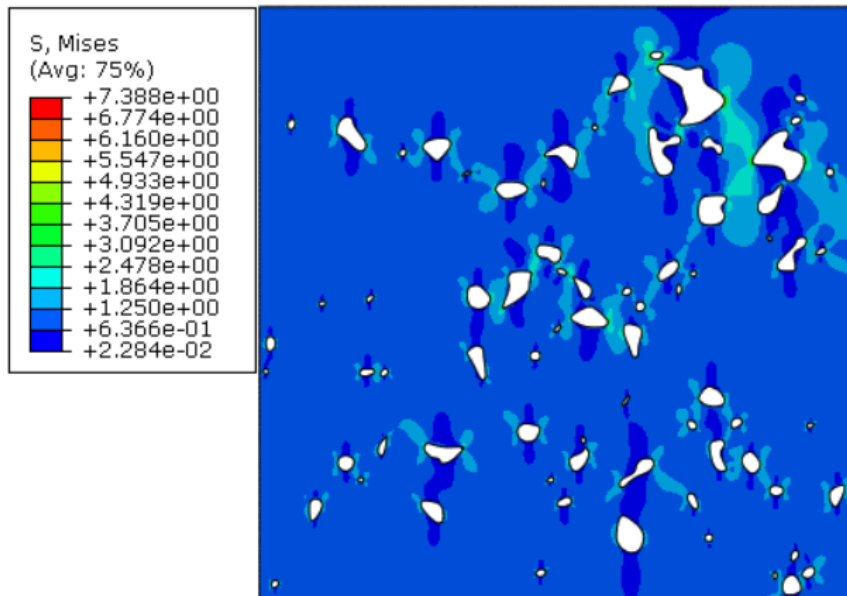
Slika 37. Rubni uvjeti pomaka i opterećenje kod određivanja zamornih karakteristika sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

Materijal je definiran upotrebom linearno-elastičnih karakteristika sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C koje su određene i prikazane u potpoglavlju 4.1. Isto tako, korištena je mreža RVE020 s 52209 CPE4 konačnih elemenata. Rezultati provedene linearno-elastične analize za horizontalni, odnosno vertikalni, vlačni test su uneseni u *fe-safe*. Rezultati

linearno-elastične analize za pojedini slučaj prikazani su na slikama 38. i 39., gdje se jasno vide mjesta koncentracije naprezanja.



Slika 38. Rezultati linearno-elastične analize za slučaj horizontalnog opterećenja



Slika 39. Rezultati linearno-elastične analize za slučaj vertikalnog opterećenja

4.2.1. Metoda za određivanje zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

S obzirom da RVE020 uz metalnu matricu sadrži i pore, za pretpostaviti je da će zamorne karakteristike metalne matrice biti veće od zamornih karakteristika RVE020 (odziv). Također, prostorni razmještaj pora će utjecati na zamorne karakteristike u horizontalnom i vertikalnom smjeru.

Da bismo u potpunosti opisali zamorno ponašanje RVE020, potrebno je poznavati dvije zamorne karakteristike: koeficijent zamorne čvrstoće S'_f i eksponent zamorne čvrstoće b , uz konstantan odnos naprezanja r . Na taj način u potpunosti definiramo zamorno ponašanje materijala preko Basquinovog zakona (39). U logaritamskom mjerilu, Basquinov zakon se ponaša linearno prema sljedećoj jednadžbi:

$$\log(S_a) = \log(S'_f) + b \log(2N_f) \rightarrow y = m + kx. \quad (53)$$

Za opisivanje linearnog ponašanja, odnosno jednadžbe pravca iz (53), dovoljno je znati dvije točke: $(2N_{f1}, S_{a01})$ i $(2N_{f2}, S_{a02})$, gdje je:

$2N_{f1}$ – broj promjena ciklusa do loma točke 1 [-],

$S_{a0,1}$ – efektivna amplituda naprezanja za $S_m = 0$ za točku 1 [MPa],

$2N_{f2}$ – broj promjena ciklusa do loma točke 2 [-] i

$S_{a0,2}$ – efektivna amplituda naprezanja za $S_m = 0$ za točku 2 [MPa].

Način određivanja efektivne amplituda naprezanja S_{a0} , za slučaj bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja i uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu, računa na sljedeći način prema tablici 10.

Tablica 10. Način određivanja efektivne amplitude naprezanja

	Bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja	S razmatranjem utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu
S_{a0}	S_a	$\left(1 - \frac{S_m}{S_{ult,RVE}}\right)^{-1} \cdot S_a$

$S_{ult,RVE}$ predstavlja vlačnu čvrstoću RVE020. Pošto eksperimentalna ispitivanja nisu provedena, za potrebe ovog rada slijedi da je:

$$S_{ult,RVE} = S_{ult,A} = 398 \text{ MPa}, \quad (54)$$

gdje je:

$S_{ult,A}$ – vlačna čvrstoća sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C na makrorazini prema tablici 5.

Za dobivanje vrijednosti točaka 1 i 2 korišten je *fe-safe*. Nakon zadavanja zamornih karakteristika metalne matrice (S'_f i b) i periodičkog opterećenja prema izrazu (31) na modelu RVE020, pokrećemo analizu visokocikličkog zamora čiji je rezultat broj ciklusa do loma N_f . U ovom slučaju zadano je periodičko naprezanje prema sljedećem izrazu:

$$S = S_m + S_a \sin(\omega t), \quad (55)$$

gdje je:

S – naprezanje [MPa],

ω – kružna frekvencija opterećenja [rad/s], zadana preko frekvencije ispitivanja f ,

t – vrijeme [s].

Nakon provedbe dvije analize zamora, za različita periodička naprezanja, ali za isti slučaj opterećenja i isti slučaj razmatranja srednjeg naprezanja, biti će poznate vrijednosti točaka ($2N_{f1}, S_{a01}$) i ($2N_{f2}, S_{a02}$). Važno je napomenuti da *fe-safe* kao rezultat daje broj ciklusa do loma N_f , koji će biti pretvoren u broj promjena ciklusa do loma $2N_f$. Poznavanjem vrijednosti spomenutih točaka ostvarujemo uvjete za određivanje zamornih karakteristika RVE020. Basquinov izraz za točke 1 i 2 glase:

$$S_{a0,1} = S'_{f,RVE} (2N_{f1})^{b,RVE}, \quad (56)$$

$$S_{a0,2} = S'_{f,RVE} (2N_{f2})^{b,RVE}, \quad (57)$$

gdje je:

$S'_{f,RVE}$ – koeficijent zamorne čvrstoće RVE020 [MPa] i

b_{RVE} – eksponent zamorne čvrstoće RVE020 [-].

Koeficijent i eksponent zamorne čvrstoće RVE020 izvode se na temelju izraza (56) i (57) te iznose:

$$S'_{f,RVE} = \frac{\log(S_{a0,1}) \cdot \log(2N_{f2}) - \log(S_{a0,2}) \cdot \log(2N_{f1})}{\log(2N_{f2}) - \log(2N_{f1})}, \quad (58)$$

$$b_{RVE} = \frac{\log\left(\frac{S_{a0,1}}{S_{a0,2}}\right)}{\log\left(\frac{2N_{f1}}{2N_{f2}}\right)}. \quad (59)$$

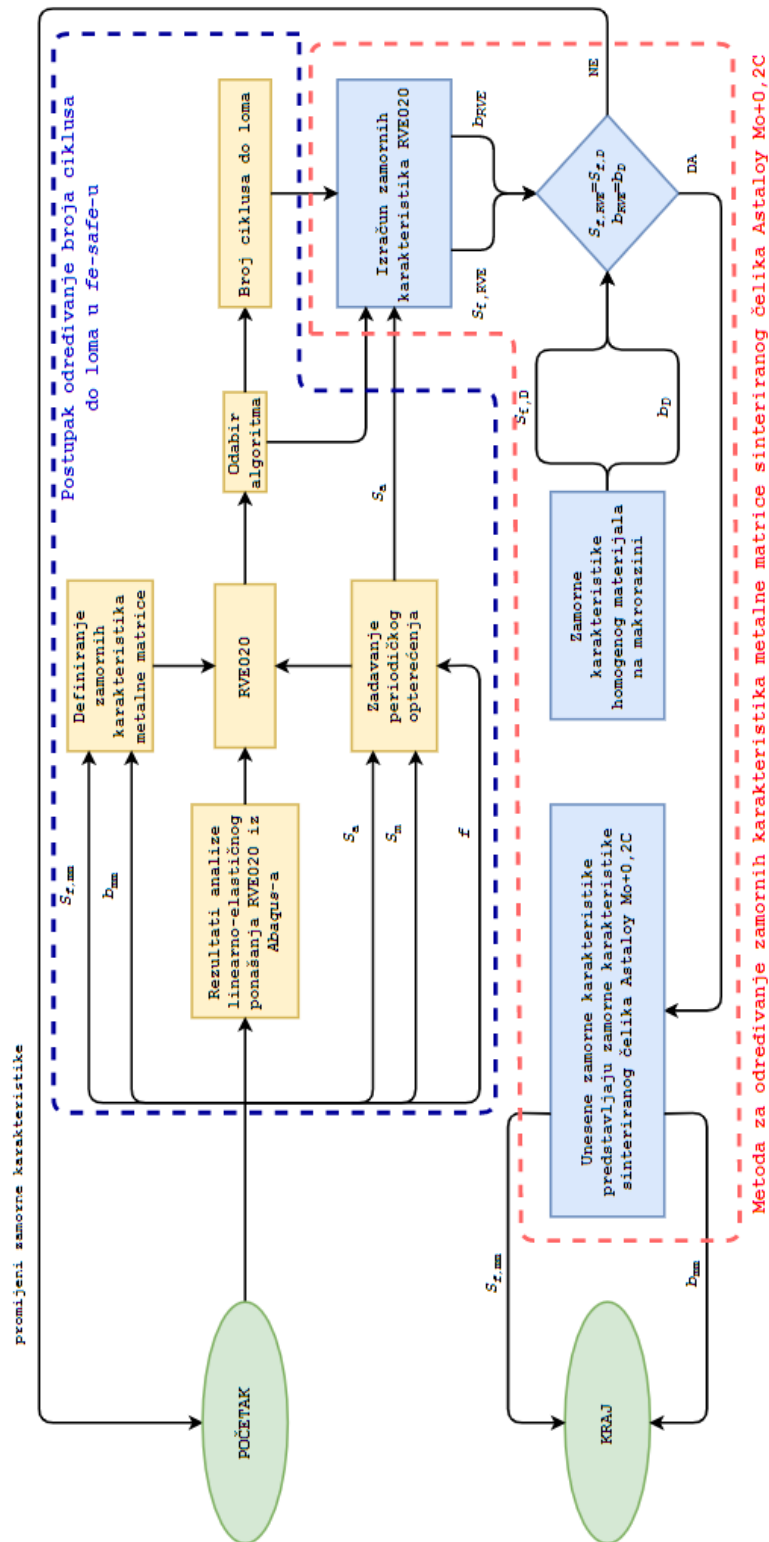
Vrijednosti koeficijenta i eksponenta zamorne čvrstoće međusobno ne ovise jedan o drugim, odnosno $S'_{f,RVE} = f(S_{a0,1}, S_{a0,2}, 2N_{f1}, 2N_{f2})$ i $b_{RVE} = f(S_{a0,1}, S_{a0,2}, 2N_{f1}, 2N_{f2})$.

Očito je da će proces određivanja zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C biti iterativan proces.

Cijeli proces određivanja zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C prikazan je na slici 40. gdje se jasno vidi tok podataka i procesa potrebnih za određivanje zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C. Dijagram toka sa slike 40. je podijeljen u dva dijela:

- a) postupak određivanja broja ciklusa do loma u *fe-safe*-u i
- b) metoda za određivanje zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C.

Postupak je proveden za horizontalan i vertikalni slučaj opterećenja, bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja i uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu. Frekvencija ispitivanja kod analize zamora je $f = 1$ Hz te se ispitivanje provodilo za odnos naprezanja $r = 0,1$. S obzirom na zamorno ponašanje homogenog materijala na makrorazini (slika 36.), za ispitivanje visokocikličkog zamora metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C korištene su amplitude naprezanja $S_{a1} = 90$ MPa i $S_{a2} = 120$ MPa.



Slika 40. Dijagram toka za određivanje zamornih karakteristika feritne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

4.2.2. Rezultati

Dobivene su zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C za četiri slučaja: horizontalni slučaj opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg napreznja (za potrebe tabličnog i grafičkog prikaza H), horizontalni slučaj opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg napreznja prema Goodmanu (za potrebe tabličnog i grafičkog prikaza H_G), vertikalni slučaj opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg napreznja (za potrebe tabličnog i grafičkog prikaza V) i vertikalni slučaj opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg napreznja prema Goodmanu (za potrebe tabličnog i grafičkog prikaza V_G). Iste su prikazane u tablici 12. te su označene crvenom bojom.

Tablica 11. Zajedničke varijable pri provedbi ispitivanja zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2

$r = 0,1$
$f = 1 \text{ Hz}$
$S_{a1} = 90 \text{ MPa}$
$S_{a2} = 120 \text{ MPa}$
$S_{m1} = 110 \text{ MPa}$
$S_{m2} = 146,67 \text{ MPa}$
$S_{ult} = 398 \text{ MPa}$

Tablica 12. Konačne vrijednosti zamornih karakteristika za pojedini slučaj

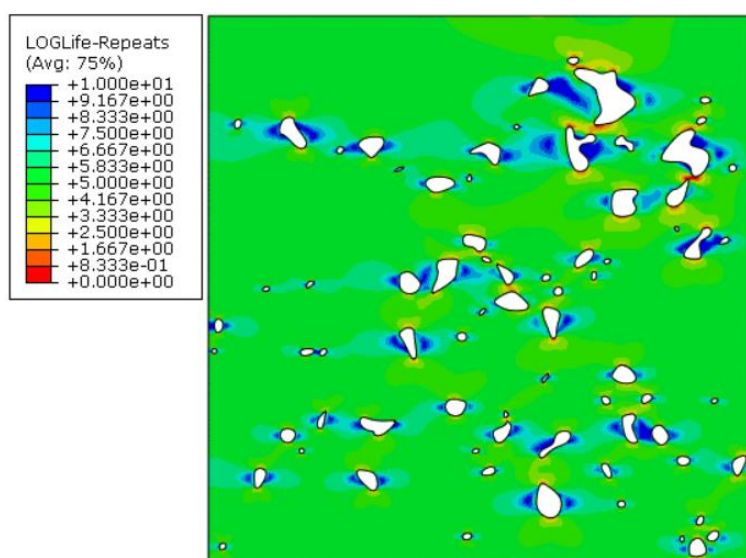
H		H_G		V		V_G	
$S'_{f,mm}$ [MPa]	b_{mm} [-]	$S'_{f,mm}$ [MPa]	b_{mm} [-]	$S'_{f,mm}$ [MPa]	b_{mm} [-]	$S'_{f,mm}$ [MPa]	b_{mm} [-]
565	-0,143	694	-0,155	557	-0,143	662	-0,155
$S_{a0,1}$ [MPa]	$S_{a0,2}$ [MPa]	$S_{a0,1}$ [MPa]	$S_{a0,2}$ [MPa]	$S_{a0,1}$ [MPa]	$S_{a0,2}$ [MPa]	$S_{a0,1}$ [MPa]	$S_{a0,2}$ [MPa]
90	120	124,4	190	90	120	124,4	190
$2N_{f1}$ [-]	$2N_{f2}$ [-]	$2N_{f1}$ [-]	$2N_{f2}$ [-]	$2N_{f1}$ [-]	$2N_{f2}$ [-]	$2N_{f1}$ [-]	$2N_{f2}$ [-]
233254	31392	29222	1454	237372	31902	24680	1266
$S'_{f,RVE}$ [MPa]	b_{RVE} [-]	$S'_{f,RVE}$ [MPa]	b_{RVE} [-]	$S'_{f,RVE}$ [MPa]	b_{RVE} [-]	$S'_{f,RVE}$ [MPa]	b_{RVE} [-]
529,9	-0,143	531,5	-0,143	530,6	-0,143	527	-0,143
$S'_f = 530 \text{ MPa}$				$b_{RVE} = -0,143$			

Uočimo kako se razlike isključivo javljaju kod koeficijenta zamorne čvrstoće $S'_{f,RVE}$. Iako postoji postotna razlika, ista je zanemariva te je manja od 1% u najgorem slučaju.

Nadalje, tokom određivanja broja ciklusa do loma unutar *fe-safe*-a, obraćena je pozornost na iniciranje i smjer širenja pukotine. RVE020 sadrži poroznosti, koje zbog svoje koncentracije naprezanja znatno utječu na zamorno ponašanje materijala. Mjesta koncentracije naprezanja predstavljaju mjesta iniciranja pukotine. Ako materijal popusti na samo jednom dijelu, točnije ako se dvije pore spoje, ne možemo tvrditi da je materijal puknuo, jer teoretski materijal još uvijek nosi. Potrebno je povezati spojeve više pora, odnosno formirati zonu loma, kako bismo bili sigurni da je materijal u potpunosti popustio.

4.2.2.1. Lom uslijed horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja

U analizi zamornog ponašanja RVE020 za slučaj horizontalnog opterećenja, utvrđena su točna mjesta gdje se pore međusobno spajaju tako tvoreći pukotinu. No najprije, na slici 41. prikazan je rezultat provedene analize zamora za točku 1. Rezultati su prikazani u programskom paketu *Abaqus*.

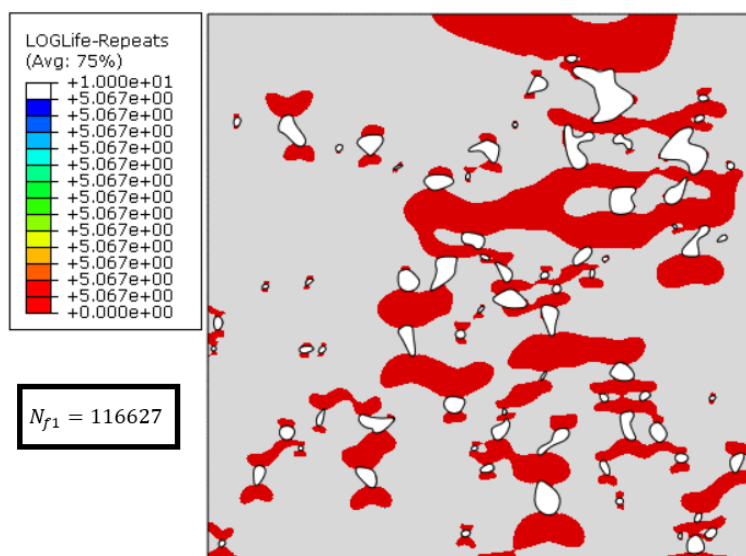


Slika 41. Rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1

Na slici 41. vidljiv je broj ciklusa do loma u logaritamskom mjerilu $\log N_{f1}$ za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a1} = 90$ MPa. Uočimo, kako je na mjestima koncentracije

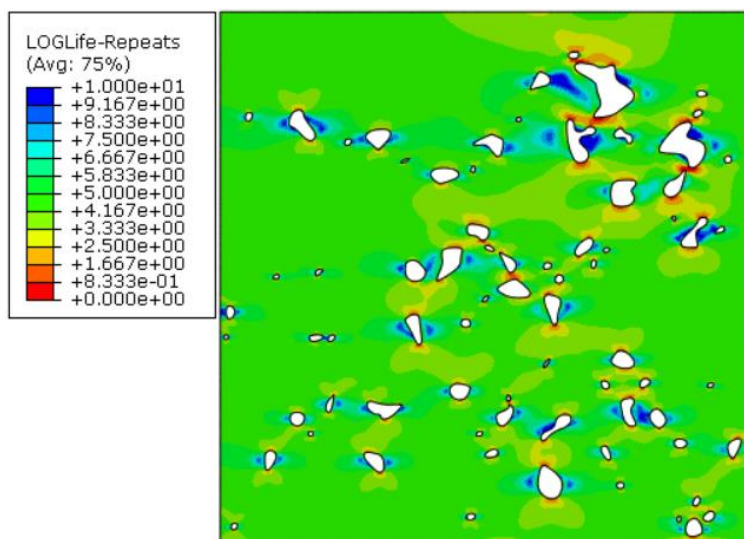
naprezanja najmanja vrijednost $\log N_{f_1} = 0$, tj. $N_{f_1} = 1$. Na tom mjestu materijal počinje najprije popuštati, odnosno doživi 1 ciklus. Unatoč tome, RVE020 ne doživljava potpuni lom. Stoga, potrebno je formirati područje loma kako bi se jasnije predočila zona loma, pukotina i njezin smjer širenja.

Iako je broj ciklusa do loma prikazan, i dalje nije utvrđeno na kojem se broju ciklusa do loma N_{f_1} RVE020 u potpunosti slomi. Zbog toga, na slici 42. utvrđeno je područje loma (crvene boje), koja formira pukotinu s jednog kraja materijala na drugi. Broj ciklusa kada se zadnje pore spoje, tako tvoreći pukotinu, je broj ciklusa do loma N_{f_1} , koji je ujedno i prikazan na slici 42. Sivom bojom označena su područja koja mogu izdržati više od broja ciklusa do loma N_{f_1} , dok su crvenom bojom označena područja koja su do navedenog broja ciklusa do loma popustila.

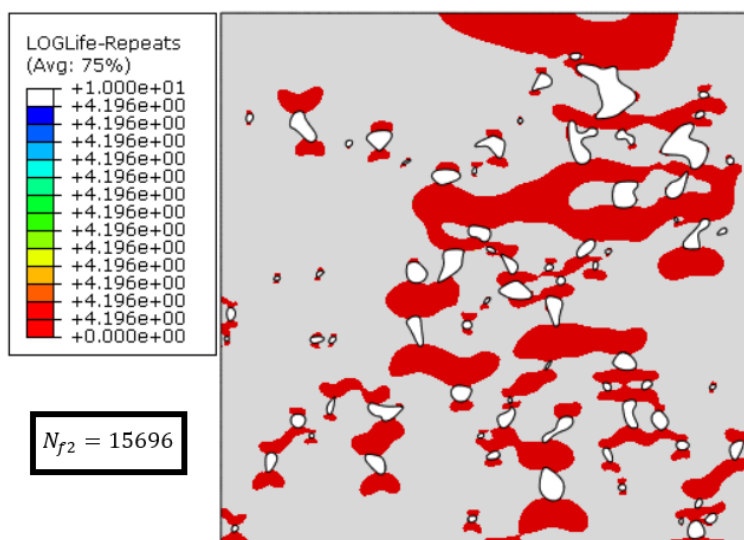


Slika 42. Područje loma kod horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1

Analogno, za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a2} = 120$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f_2} . Na slici 43. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2. Slika 44. pokazuje područje loma kod horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2 uz točan iznos broja ciklusa do loma.



Slika 43. Rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg napreznja za točku 2

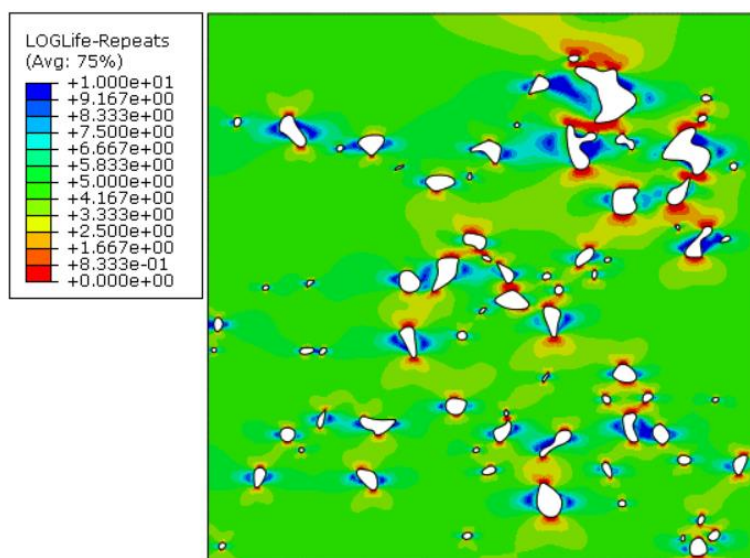


Slika 44. Područje loma kod horizontalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg napreznja za točku 2

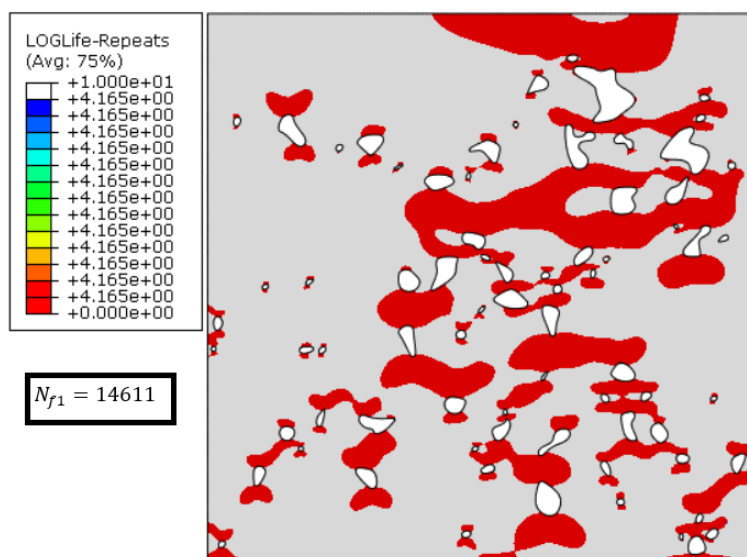
U nastavku, analogno potpoglavlju 4.2.2.1., u potpoglavljima 4.2.2.2., 4.2.2.3. i 4.2.2.4. bit će prikazani rezultati analize zamora i područja loma za točke 1 i 2.

4.2.2.2. Lom uslijed horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu

Za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a1} = 90$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f1} . Na slici 45. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1. Slika 46. pokazuje područje loma kod horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1 uz točan iznosa broja ciklusa do loma.

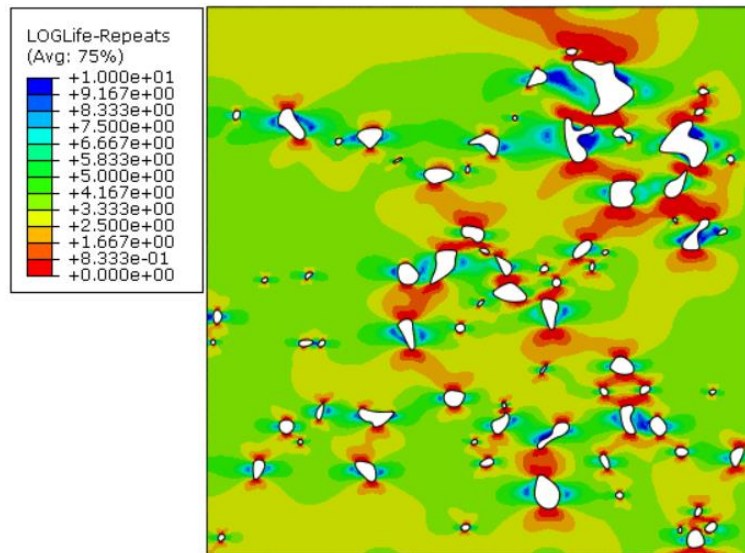


Slika 45. Rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1

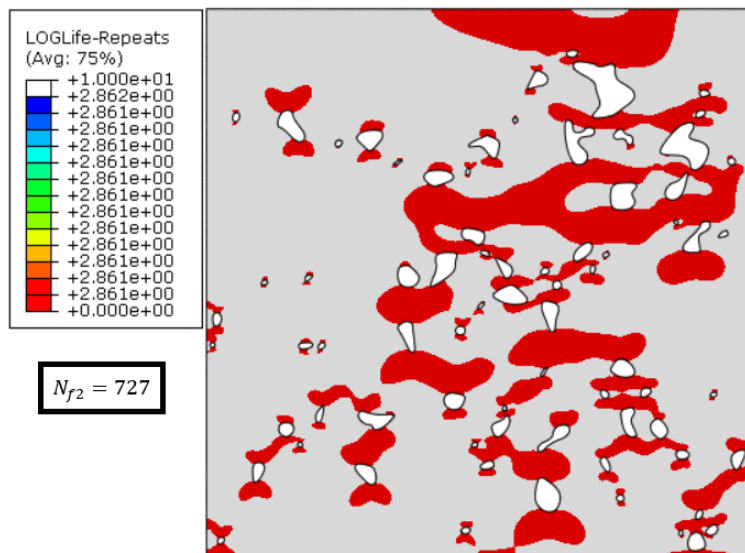


Slika 46. Područje loma kod horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1

Za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a2} = 120$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f2} . Na slici 47. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2. Slika 48. pokazuje područje loma kod horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2 uz točan iznos broja ciklusa do loma.



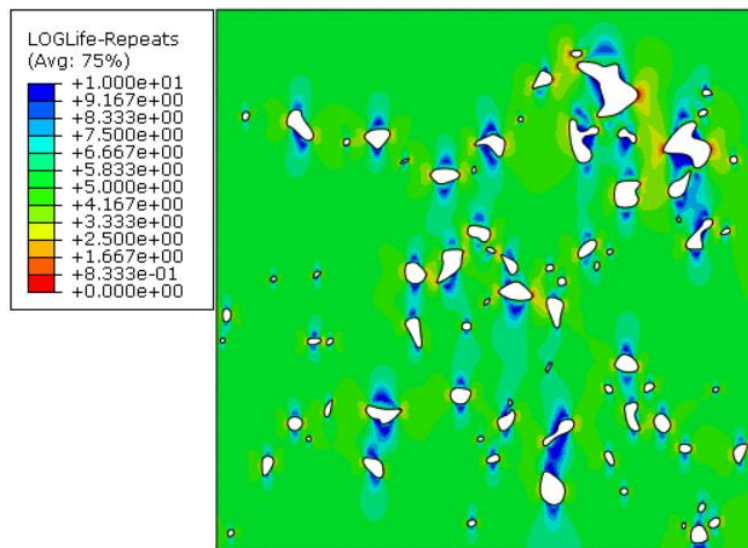
Slika 47. Rezultat analize zamora horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2



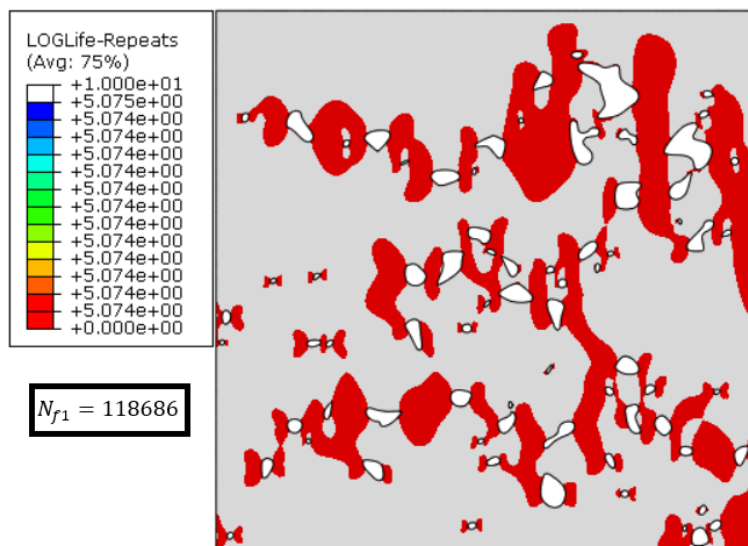
Slika 48. Područje loma kod horizontalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2

4.2.2.3. Lom uslijed vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja

Za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a1} = 90$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f1} . Na slici 49. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1. Slika 50. pokazuje područje loma kod vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1 uz točan iznos broja ciklusa do loma.

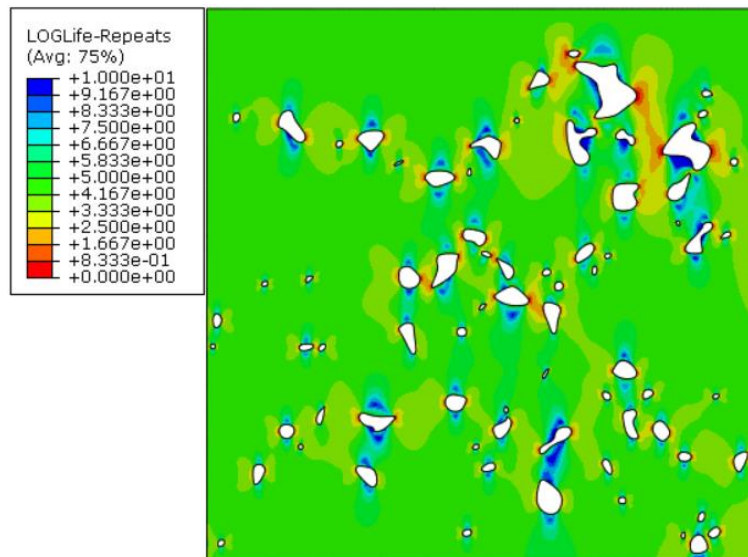


Slika 49. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1

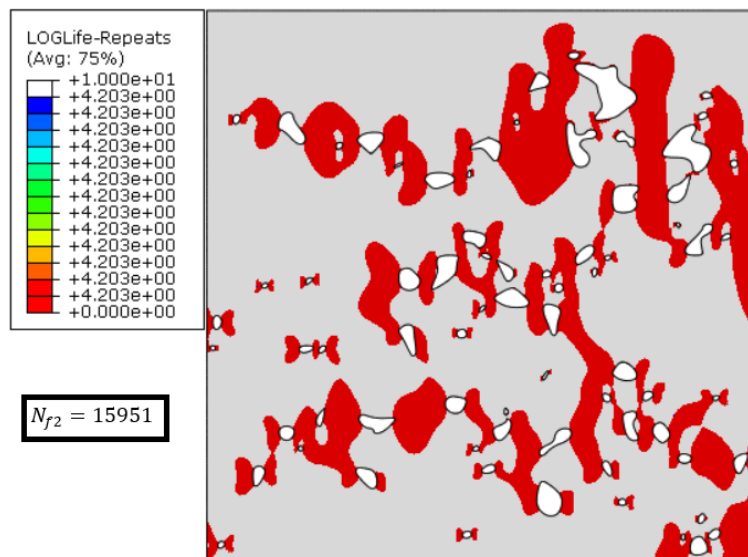


Slika 50. Područje loma kod vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 1

Za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a2} = 120$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f2} . Na slici 51. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2. Slika 52. pokazuje područje loma kod vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2 uz točan iznosa broja ciklusa do loma.



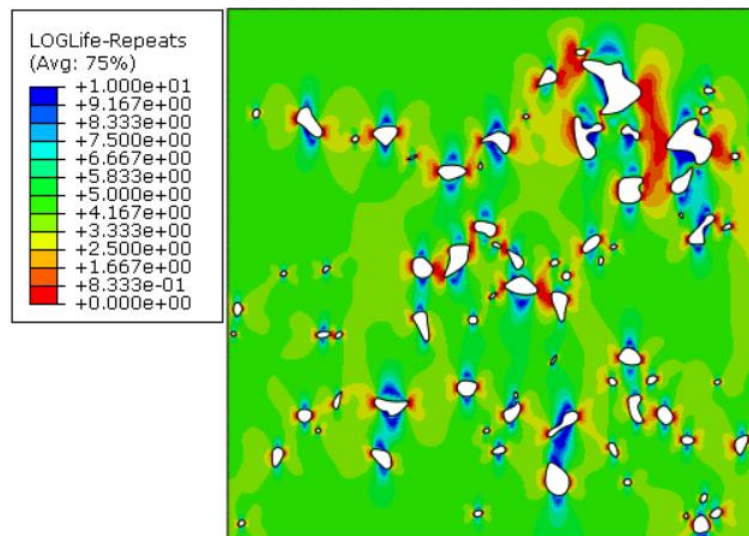
Slika 51. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2



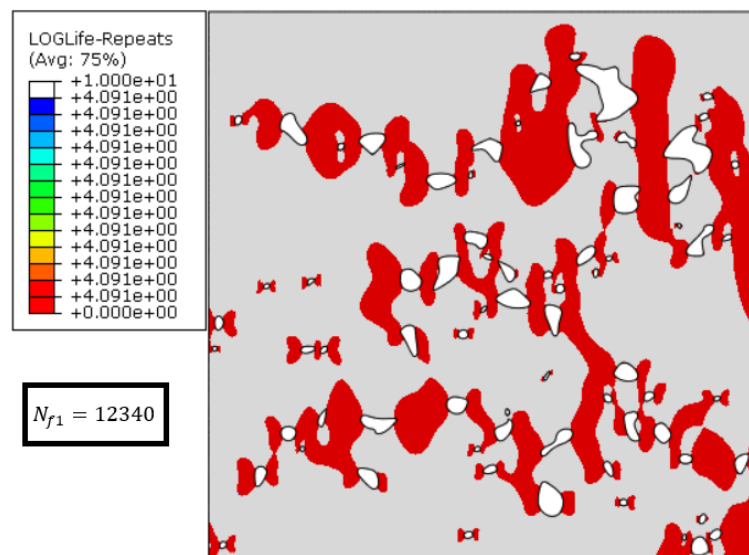
Slika 52. Područje loma kod vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja za točku 2

4.2.2.4. Lom uslijed vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu

Za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a1} = 90$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f1} . Na slici 53. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1. Slika 54. pokazuje područje loma kod vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1 uz točan iznos broja ciklusa do loma.

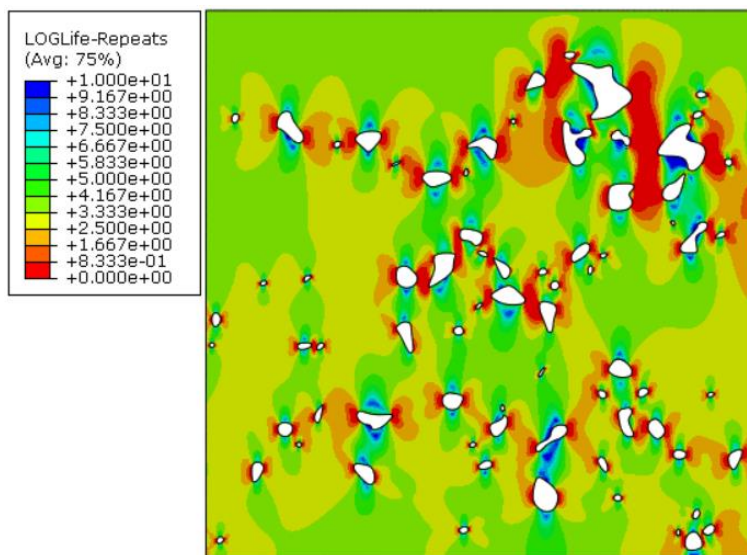


Slika 53. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1

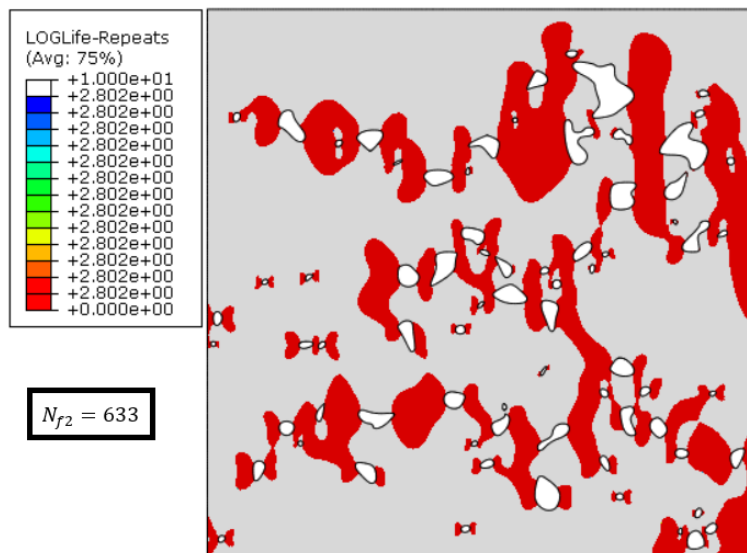


Slika 54. Područje loma kod vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 1

Za nametnutu amplitudu naprezanja $S_{a2} = 120$ MPa, utvrđen je broj ciklusa do loma N_{f2} . Na slici 55. prikazan je rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2. Slika 56. pokazuje područje loma kod vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2 uz točan iznos broja ciklusa do loma.



Slika 55. Rezultat analize zamora za slučaj vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2



Slika 56. Područje loma kod vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu za točku 2

4.2.3. Zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

Prilikom određivanja zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C promatrano je zamorno ponašanje RVE020 u horizontalnom i vertikalnom slučaju opterećenja. U tablici 12. dane su konačne vrijednosti zamornih karakteristika za pojedini slučaj.

Provedbom analize visokocikličkog zamora uslijed horizontalnog i vertikalnog slučaja opterećenja na RVE020 dobiven je detaljan uvid u zamorno ponašanje čelika Astaloy Mo+0,2C. Usporedbom koeficijenta zamorne čvrstoće i eksponenata zamorne čvrstoće metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C kod slučajeva horizontalnog i vertikalnog opterećenja bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja, uočava se najveća postotna razlika u iznosu od 1,5%.

S druge strane, usporedbom koeficijenta zamorne čvrstoće i eksponenata zamorne čvrstoće metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C kod slučajeva horizontalnog i vertikalnog opterećenja uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu, uočava se najveća postotna razlika u iznosu od 4,6%.

S obzirom da je postotna razlika u oba slučaja manja od 5%, kao referentne vrijednosti zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C uzimaju se prosječne vrijednosti horizontalnog i vertikalnog slučaja opterećenja za jedan slučaj razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja.

Konačno, zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C bez razmatranja utjecaja i s razmatranjem utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu dane su u tablici 13.

Tablica 13. Zamorne karakteristike metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C

Bez razmatranja utjecaja srednjeg naprezanja		Uz razmatranje utjecaja srednjeg naprezanja prema Goodmanu	
$S'_{f,mm} = 561 \text{ MPa}$	$b_{mm} = -0,143$	$S'_{f,mm,G} = 678 \text{ MPa}$	$b_{mm,G} = -0,155$

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatran je utjecaj eksplicitnog modeliranja mikrostrukture sinteriranog čelika na određivanje zamornog ponašanja u uvjetima visokocikličkog zamora. Kod proizvodnje sinteriranih čelika dolazi do pojave rezidualne poroznosti, koja utječe na proces deformiranja materijala. Također, poroznost igra značajnu ulogu kod procjene zamornog ponašanja sinteriranog čelika zbog pojave lokalizacije deformacija na mjestima između pora. Istraživanje utjecaja poroznosti na mikrorazini kod sinteriranih čelika omogućuje preciznije modeliranje mehaničkog ponašanja na makrorazini.

Rad je podijeljen u pet poglavlja. Prvo poglavlje se bavi trendovima i primjenom metalurgije praha. Također, uočena je važnost istraživanja zamora i modeliranja heterogenih materijala. Sljedeće poglavlje objašnjava problematiku zamora materijala i numeričko modeliranje heterogenih materijala. Opisana je metoda konačnih elemenata i konačni elementi koji su korišteni u diplomskom radu. Isto tako, predstavljen je i opisan proces proizvodnje u metalurgiji praha uz naglasak na važnost utjecaja poroznosti na mehanička svojstva u sinteriranim čelicima. Treće poglavlje posvećeno je određivanju veličine i geometrije reprezentativnog volumenskog elementa (RVE), gdje je opisan način odabira i metoda validacije metode odabira RVEa. Na temelju metalografskih ispitivanja odabrane su četiri različite veličine RVEa, pomoću kojih je određena statistički reprezentativna veličina uzorka. Odabrani RVE korišten je u nastavku rada za određivanje linearno-elastičnih i zamornih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C. U četvrtom poglavlju, nakon što je određena veličina i geometrija RVEa, pristupilo se određivanju linearno-elastičnih karakteristika metalne matrice sinteriranog čelika Astaloy Mo+0,2C. S obzirom na to da je materijal na mikrorazini oslabljen zbog utjecaja pora, pokazano je kako je konačna vrijednost modula elastičnosti metalne matrice veća od uprosječenog modula elastičnosti RVEa. Nažalost, planirana eksperimentalna ispitivanja nisu provedena zbog posljedica uzrokovanih pandemijom koronavirusa Covid-19, te su podaci nužni za provođenje numeričkih analiza i za validaciju dobivenih numeričkih rezultata preuzeti iz literature. U svrhu validacije i usporedbe numeričkih rezultata napravljen je uprosječni dijagram naprezanje-deformacija za homogeni materijal na makrorazini na temelju parametara preuzetih iz

literature. Nakon toga, određene su zamorne karakteristike feritne matrice sinteriranog čelika uslijed visokocikličkog zamora. Prikazan je postupak određivanja zamornih karakteristika metalne matrice pomoću numeričkih simulacija zamora na RVEu. U simulacijama su razmatrana dva slučaja: bez utjecaja srednjeg naprezanja i s utjecajem srednjeg naprezanja prema Goodmanu. Na temelju sličnosti statičkih mehaničkih karakteristika s čelikom Astaloy Mo+0,2C, iz literature su preuzete zamorne karakteristike sinteriranog čelika Distaloy AB na makrorazini, koje su predstavljale uprosječene vrijednosti bez razmatranja mikrostrukture. U svrhu potpunosti procjene visokocikličkog zamora, promatrani su slučajevi horizontalnog i vertikalnog opterećenja korištenjem programskog paketa *fe-safe*. Pokazano je kako je razlika rješenja u oba slučaja manja od 5% te su za zamorne karakteristike feritne matrice Astaloya uzete prosječne vrijednosti oba slučajeva opterećenja.

LITERATURA

- [1] Tsutsui, T. (2012). *Recent Technology of Powder Metallurgy and Applications*. Hitachi Chemical Technical Report No.54, (54), 12–20. Pristupljeno s: http://www.hitachi-chem.co.jp/english/report/054/54_sou2.pdf
- [2] Danninger, H. (2018). *What will be the future of powder metallurgy?* Powder Metallurgy Progress, 18(2), 70–79. <https://doi.org/10.1515/pmp-2018-0008>
- [3] Slokar, Lj. (2015). *Metalurgija praha i sinter materijali*. Metalurški fakultet, Sisak.
- [4] Cui, W. (2002). *A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures*. Journal of Marine Science and Technology, 7(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s007730200012>
- [5] Höganäs AB. (2015). *Compacting of Metal Powder*. Production of Sintered Materials - Höganäs Handbook for Sintered Components, 45–90.
- [6] Danninger, H., de Oro Calderon, R., & Gierl-Mayer, C. (2017). *Powder Metallurgy and Sintered Materials*. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (pp. 1–57). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a22_105.pub2
- [7] Chawla, N., Williams, J., Deng, X., & McClimon, C. (2009). *Three dimensional (3D) characterization and modeling of porosity in powder metallurgy (P/M) steels*. Int J Powder Metall, 45, 19–27.
- [8] Chawla, N., & Deng, X. (2005). *Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels*. Materials Science and Engineering A, 390(1–2), 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.046>
- [9] Bocchini, G. F. (1986). *The influences of porosity on the characteristics of sintered materials*. In SAE Technical Papers. SAE International. <https://doi.org/10.4271/860148>
- [10] Höganäs. (2015). *Sintered Iron-Based Materials*. Design and Mechanical Properties - Höganäs Handbook for Sintered Components, 45–90.
- [11] Höganäs. (2017). *Iron and Steel Powders for Sintered Components*. Höganäs Handbook for Sintered Components.
- [12] Sorić, J. (2004). *Metoda konačnih elemenata*. Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb.
- [13] Husnjak, M. (2009). *Mehanika loma*. Bilješke s predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [14] Fe-safe. (2002). *Volume 2 – Fatigue Theory Reference Manual*. ©safe technology limited

-
- [15] Kranjčević, N. (2012). *Elementi strojeva*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [16] Tonković, Z. (2015). *Zamor konstrukcije*. Podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [17] Kouznetsova, V., Brekelmans, W. A. M., & Baaijens, F. P. T. (2001). *Approach to micro-macro modeling of heterogeneous materials*. *Computational Mechanics*, 27(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s004660000212>
- [18] Kouznetsova, V., Brekelmans, W. A. M., & Baaijens, F. P. T. (2001). Approach to micro-macro modeling of heterogeneous materials. *Computational Mechanics*, 27(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s004660000212>
- [19] *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.14. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [20] Fe-safe. (2008). *Volume 1 – User Manual*. ©safe technology limited
- [21] Glodež, S., Vučković, K., Šori, M., Surjak, M., & Zupanič, F. (2019). *The influence of thermal treatment on the low-cycle fatigue behaviour of Cu-Ni-Mo sintered steel*. *Mechanics of Materials*, 129, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.11.001>