

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

Aleksa Lj. Milovanović

Uticaj parametara aditivne proizvodnje na otpornost
na lom ortopedskih pločica od PLA polimera

doktorska disertacija

Beograd, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Aleksa Lj. Milovanović

Influence of additive manufacturing parameters on the
fracture resistance of PLA polymer orthopaedic plates

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026.

Mentor doktorske disertacije:

Dr Aleksandar Sedmak, profesor emeritus
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

Dr Nenad Milošević, docent
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Dr Mihajlo Popović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Dr Aleksandar Grbović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Dr Aleksandra Mitrović, docent
Kriminalističko-policijski univerzitet u Beogradu

Dr Aleksandra Čairović, docent
Univerzitet u Beogradu, Stomatološki fakultet

Datum odbrane:

Zahvalnica

Ovaj rad predstavlja rezultat višegodišnjeg istraživačkog rada realizovanog tokom mog angažovanja u Inovacionom centru Mašinskog fakulteta.

Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru, prof. dr Aleksandru Sedmaku, profesoru emeritusu, na strpljenju i nesebičnom doprinosu tokom izrade ove doktorske disertacije.

Zahvalan sam projektu SIRAMM (H2020-WIDESPREAD-2018-03, broj granta: 857124) i njegovim rukovodiocima, među kojima je i moj mentor, na mogućnosti realizacije osmišljenih istraživanja u okviru ove disertacije.

Zahvalnost za pomoć i sugestije pri realizaciji istraživanja dugujem kolegama sa Instituta za fiziku materijala u Brnu, pri Češkoj akademiji nauka (Češka Republika), dr Tomašu Babinskom, dr Ivi Šulaku, dr Janu Poduški i dr Lukašu Travničeku, te kolegici dr Tamaru Matić, docentu Tehnološko-metalurškog fakulteta, na zaista nesebičnom izdvajanju vremena za SEM snimanja prelomnih površina epruveta, što se može videti na slici 3.28b.

Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Mihajlu Popoviću i kolegi, naučnom savetniku dr Milošu Miloševiću, na nesebičnom ustupanju opreme i materijala za potrebe aditivne proizvodnje. Takođe, zahvalnost dr Milošu Miloševiću dugujem i na pomoći u realizaciji DIC metode, uključujući obezbeđivanje odgovarajuće opreme, kao i na korisnim sugestijama pri obradi i analizi dobijenih rezultata.

Veliku zahvalnost dugujem kolegama, naučnom savetniku dr Snežani Kirin i višem naučnom saradniku dr Simonu Sedmaku, na stručnoj pomoći i sugestijama u primeni statističkih metoda i numeričkih simulacija.

Ovu disertaciju posvećujem uspomeni na svoju majku, Olgu Golović, i svetlu pod kojim mi je čitala kada sam bio dete, kao trajnom simbolu njenog prisustva i neizbrisivog traga na mom životnom i profesionalnom putu.

Uticaj parametara aditivne proizvodnje na otpornost na lom ortopedskih pločica od PLA polimera

Sažetak

Aditivna proizvodnja donela je značajne novine u izradi delova, pre svega zbog mogućnosti proizvodnje predmeta složenijih geometrija i manipulisanja njihovom unutrašnjom strukturom. Upravo zahvaljujući ovim prednostima, ova tehnologija danas je široko rasprostranjena i pored svoje početne primene u izradi prototipova, sve više se razmatra i kao tehnologija za proizvodnju funkcionalnih delova. Tehnologije aditivne proizvodnje zasnivaju se na deponovanju materijala sloj po sloj, a postupci izrade delova obuhvataju širok spektar proizvodnih metoda koje uključuju ekstruziju, sinterovanje, topljenje, brizganje i druge načine pripreme i nanošenja materijala radi formiranja konačnog dela. Jedna od najzastupljenijih tehnika je modeliranje deponovanjem topljenog materijala (FDM), pri čemu se uglavnom koriste termoplastični materijali.

Jedan termoplastični materijal od posebnog je interesa, kako sa komercijalnog, tako i sa inženjerskog stanovišta, a to je polilaktid (PLA), koji je biokompatibilan i biodegradabilan. Savremena istraživanja razmatraju primenu PLA polimera i FDM tehnologije za izradu delova koji bi se implantirali u ljudsko telo, poput ortopedskih pločica. Naime, ova tehnologija omogućava prilagođavanje geometrije pločice individualnim karakteristikama pacijenta, dok se manipulacijom njenom unutrašnjom strukturom, pored nosivosti, mogu ostvariti i dodatne funkcionalne karakteristike, poput mogućnosti korišćenja unutrašnje strukture kao nosača lekova ili drugih sredstava koja bi mogla doprineti procesu lečenja.

Ipak, izazovi koje ova tehnologija sa sobom nosi vezani su za parametre aditivne proizvodnje, poput količine ispune i visine sloja, za koje je uočeno da značajno utiču na mehaničke osobine konačno izrađenog dela. Imajući u vidu da strukture tokom eksploatacije mogu sadržati defekte tipa prsline, primena principa mehanike loma od posebnog je značaja za procenu eksploatacionog ponašanja, kako kroz ispitivanja žilavosti loma, tako i kroz ispitivanja zamornog rasta prsline. Dodatne izazove predstavljaju anizotropija i nehomogenost termoplastičnih materijala, poput PLA, kao i nepravilnosti u unutrašnjoj strukturi koje mogu nastati tokom procesa aditivne proizvodnje. Stoga, ispitivanja žilavosti loma i zamornog rasta prsline, kao i procena primenljivosti odgovarajućih metoda ispitivanja, mogu značajno doprineti boljem razumevanju ponašanja aditivno proizvedenih delova i definisanju odgovarajućih pristupa za njihovu karakterizaciju.

U okviru primene principa mehanike loma mogu se koristiti i odgovarajuće tehnike, poput numeričkih metoda, optičkih tehnika za praćenje vrha prsline i statističkih metoda, koje mogu dopuniti dobijene rezultate i doprineti boljem razumevanju ponašanja materijala u eksploatacionim uslovima. Njihova primena može doprineti i razvoju novih pristupa i metoda ispitivanja u oblasti mehanike loma.

Ključne reči: aditivna proizvodnja, PLA polimer, ortopedske pločice, mehanika loma, žilavost loma, zamorni rast prsline, numeričke simulacije, korelacija digitalnih slika (DIC), statističke metode.

Naučna oblast: Mašinsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Tehnologija materijala

UDK:

Influence of additive manufacturing parameters on the fracture resistance of PLA polymer orthopaedic plates

Abstract

Additive manufacturing has introduced significant advances in part fabrication, primarily due to the possibility of producing components with more complex geometries and manipulating their internal structure. Owing to these advantages, this technology has become widely used and, in addition to its initial application in prototyping, is increasingly being considered for the production of functional components. Additive manufacturing technologies are based on the layer-by-layer deposition of material and include a wide range of manufacturing processes, such as extrusion, sintering, melting, injection moulding, and other methods of material processing and deposition used to produce the final component. One of the most widely used techniques is fused deposition modelling (FDM), which predominantly employs thermoplastic materials.

One thermoplastic material of particular interest from both commercial and engineering perspectives is polylactic acid (PLA), which is biocompatible and biodegradable. Recent research has explored the use of PLA and FDM technology for the fabrication of components intended for implantation in the human body, such as orthopaedic plates. This technology enables the geometry of the plate to be adapted to the individual characteristics of the patient, while manipulation of its internal structure can provide, in addition to load-bearing capacity, further functional characteristics, such as the potential use of the internal structure as a drug carrier or for the delivery of other agents that could contribute to the healing process.

However, the challenges associated with this technology are related to additive manufacturing parameters, such as infill density and layer height, which have been found to significantly affect the mechanical properties of the fabricated component. Considering that structures may contain crack-like defects during service, the application of fracture mechanics principles is of particular importance for assessing their service behaviour, both through fracture toughness testing and fatigue crack growth testing. Additional challenges arise from the anisotropy and heterogeneity of thermoplastic materials such as PLA, as well as irregularities in the internal structure that may develop during the additive manufacturing process. Therefore, fracture toughness and fatigue crack growth testing, together with the assessment of the applicability of appropriate testing methods, can significantly contribute to a better understanding of the behaviour of additively manufactured components and to defining appropriate approaches for their characterisation.

Within the framework of fracture mechanics, appropriate techniques, including numerical methods, optical techniques for monitoring the crack tip, and statistical methods, can also be employed to complement the obtained results and contribute to a better understanding of material behaviour under service conditions. Their application may also contribute to the development of new approaches and testing methods in the field of fracture mechanics.

Keywords: additive manufacturing, PLA polymer, orthopaedic plates, fracture mechanics, fracture toughness, fatigue crack growth, numerical simulations, digital image correlation (DIC), statistical methods.

Scientific field: Mechanical Engineering

Scientific subfield: Materials Technology

UDK:

Sadržaj

Spisak skraćenica i oznaka.....	ix
Spisak slika	xvi
Spisak tabela	xxiii
1. Uvod i pregled literature	1
1.1. Aditivna proizvodnja, ortopedske pločice i primena PLA polimera u biomedicini	1
1.2. Mehaničke osobine i struktura PLA polimera u aditivnoj proizvodnji	6
1.3. Mehanika loma u kontekstu aditivno proizvedenih struktura od PLA polimera.....	12
1.3.1. Principi mehanike loma pri dinamičkom opterećenju	21
1.3.2. Primena mehanike loma kod aditivno proizvedenih struktura od PLA polimera.....	23
1.4. Numeričke simulacije sa modeliranim defektom tipa prsline	29
1.5. Statističke metode pri analizi rezultata istraživanja	35
1.6. Definisanje problema, predmet, naučne hipoteze i ciljevi istraživanja	37
2. Analitičke osnove i pristupi ispitivanju otpornosti na lom aditivno proizvedenih delova.....	39
2.1. Principi LEML	39
2.2. Principi EPML.....	42
2.3. Zamorni rast prsline prema Parisovoj jednačini.....	48
2.4. Metoda korelacije digitalnih slika (DIC).....	49
2.5. Osnove MKE i xFEM.....	51
2.6. Osnove ANOVA, višestruke linearne regresije i Pearsonovog koeficijenta korelacije.....	57
2.6.1. ANOVA.....	57
2.6.2. Višestruka linearna regresija	58
2.6.3. Pearsonov koeficijent korelacije.....	59
3. Eksperimentalna i numerička metodologija istraživanja	60
3.1. Ispitivanje PLA epruveta na zatezanje	62
3.2. Ispitivanje žilavosti loma prema LEML.....	64
3.3. Ispitivanje žilavosti loma prema EPML	70
3.4. Ispitivanje zamornog rasta prsline kod PLA epruveta.....	74
3.5. Numeričke simulacije modela ortopedskih pločica.....	78
4. Eksperimentalni i numerički rezultati i diskusija.....	82
4.1. Rezultati ispitivanja PLA materijala na zatezanje.....	82
4.2. Rezultati ispitivanja žilavosti loma prema LEML	89
4.3. Rezultati ispitivanja žilavosti loma prema EPML.....	95
4.4. Rezultati ispitivanja zamornog rasta prsline PLA materijala	111

4.5. Rezultati numeričkih simulacija i statističke obrade podataka modela ortopedskih pločica	118
4.6. Diskusija rezultata	126
5. Zaključak.....	131
6. Literatura.....	136
Biografija autora	147
Izjava o autorstvu	148
Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	149
Izjava o korišćenju	150

Spisak skraćenica i oznaka

FDM	Modeliranje deponovanjem topljenog materijala (<i>engl. Fused Deposition Modelling</i>)
SLA	Stereolitografija (<i>engl. Stereolithography</i>)
DLP	Digitalna obrada svetlosti (<i>engl. Digital Light Processing</i>)
SLS	Selektivno lasersko sinterovanje (<i>engl. Selective Laser Sintering</i>)
SLM	Selektivno lasersko topljenje (<i>engl. Selective Laser Melting</i>)
EBM	Topljenje elektronskim snopom (<i>engl. Electron Beam Melting</i>)
DED	Direktno deponovanje materijala uz usmereni izvor energije (<i>engl. Directed Energy Deposition</i>)
PLA	Polilaktid
ABS	Akrilonitril-butadien-stiren
PP	Polipropilen
PETG	Polietilen-tereftalat glikol
TPU	Termoplastični poliuretan
PC	Polikarbonat
PEEK	Poli(eter-eter-keton)
PMMA	Polimetil-metakrilat
PVDF	Poliviniliden-fluorid
T_m	Temperatura topljenja
T_g	Temperatura staklastog prelaza
E	Modul elastičnosti
xFEM	Proširena metoda konačnih elemenata (<i>engl. eXtended Finite Element Method</i>)
CAD	Računarski podržano projektovanje (<i>engl. Computer-Aided Design</i>)
PE	Polietilen
LDPE	Polietilen niske gustine
ρ	Gustina
σ_m	Zatezna čvrstoća
ε_{max}	Maksimalna deformacija
σ_s	Savojna čvrstoća
E_f	Savojni modul
LEML	Linearno elastična mehanika loma
EPML	Elasto-plastična mehanika loma
CTOD	Otvaranje vrha prsline (<i>engl. Crack Tip Opening Displacement</i>)

σ	Normalni napon
τ	Smicajni napon
K_I	Faktor intenziteta napona (Mod I)
a	Dužina (ili poluduzina) prsline
Y	Geometrijski faktor
W	Širina tela (uzorka)
$C(T)$	Kompaktna epruveta za ispitivanje loma (<i>engl. Compact Tension</i>)
K_{IC}	Kritična vrednost faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacije (žilavost loma)
RSN	Ravno stanje napona
RSD	Ravno stanje deformacije
K_{krit}	Kritična vrednost faktora intenziteta napona
r_p	Irvinova korekcija poluprečnika plastične zone
CMOD	Otvaranje prsline na mestu vrha zareza epruvete (<i>engl. Crack Mouth Opening Displacement</i>)
J	Elasto-plastični parametar mehanike loma (Rajsov integral)
DIC	Optička metoda beskontaktnog merenja deformacija korelacijom digitalnih slika (<i>engl. Digital Image Correlation</i>)
δ	Alternativna formulacija otvaranja vrha prsline (CTOD)
V	Alternativna formulacija otvaranja prsline na mestu vrha zareza epruvete (CMOD)
da	Inkrementalni rast prsline
SSY	Ograničeno tečenje (<i>engl. Small Scale Yielding</i>)
J_{IC}	Kritična vrednost J integrala za oblik I opterećenja
$J-R$	Kriva otpornosti materijala na stabilni rast prsline, koja opisuje zavisnost J integrala od priraštaja dužine prsline
$J_{0.2}$	Vrednost J integrala koja odgovara dužini prsline od 0.2 mm
K_{JIC}	Ekvivalentna vrednost faktora intenziteta napona za kritičnu vrednost J_{IC}
J_{max}	Maksimalna dozvoljena vrednost J integrala
G	Geometrijska funkcija
H	Deformaciona funkcija
S_{pb}	Parametar razdvajanja opterećenja
v_{pl}	Plastično pomeranje
K_{min}	Minimalna vrednost faktora intenziteta napona K u ciklusu opterećenja
K_{max}	Maksimalna vrednost faktora intenziteta napona K u ciklusu opterećenja

da/dN	Brzina rasta prsline po ciklusu opterećenja
ΔK	Opseg faktora intenziteta napona K
R	Faktor asimetrije ciklusa opterećenja
ΔK_{th}	Granična vrednost opsega faktora intenziteta napona (tzv. prag zamora)
SENB	Epruveta sa jednostranim zarezom namenjena za savijanje u tri tačke pri određivanju žilavosti loma materijala (<i>engl. Single Edge Notch Bending</i>)
MKE	Metoda konačnih elemenata
ANOVA	Parametarska analiza varijanse
H_0	Nulta hipoteza
α	Nivo značajnosti
$r_{pearson}$	Pearsonov koeficijent korelacije (u statistici)
RMSE	Korenska srednja kvadratna greška (<i>engl. Root Mean Square Error</i>)
σ_{ij}	Tenzor napona
k	Konstanta
r	Radijus
θ	Polarni ugao
$f_{ij}(\theta)$	Bezdimenziona funkcija
t_{min}	Minimalna potrebna debljina uzorka za uspostavljanje RSD
K_Q	Uslovna vrednost faktora intenziteta napona K (prema standardu ASTM D5045)
a_{eff}	Efektivna dužina prsline
σ_{ys}	Napon tečenja
ρ	Dužina plastične zone
δ_t	Alternativna formulacija otvaranja vrha prsline (CTOD)
W	Gustina energije deformacije
T_i	Tenzor napona
Γ	Putanja integracije
ds	Inkrement dužine prsline
u_i	Pomeranje
n_i	Normala na konturu Γ
σ_0	Referentni napon
ε_0	Referentna deformacija
α	Bezdimenziona konstanta
n	Eksponent

ε_{ij}	Tenzor deformacije
I_n	Integraciona konstanta zavisna od n
B	Debljina uzorka
P	Sila
Δ	Pomeranje
ν	Poasonov koeficijent
J_{el}	Elastična komponenta J integrala
J_{pl}	Plastična komponenta J integrala
U_{pl}	Energija plastičnog dela ispod krive sila-pomeranje
η_{pl}	Faktor plastičnosti
b_0	Dužina ligamenta
J_0	Kritična vrednost J integrala u trenutku inicijacije prsline
η	Bezdimenzioni faktor
U	Ukupna energija potrebna za rast prsline korigovana za vrednost indentacije
a_0	Početna dužina prsline
U_{total}	Ukupna dobijena energija ispod krive sila-pomeranje
U_{ind}	Energija indentacije
Δa	Priраštaj dužine prsline
C_1	Bezdimenziona konstanta J - R krive (amplituda)
C_2	Bezdimenziona konstanta J - R krive (eksponent)
m	Konstanta
ν_{el}	Elastično pomeranje
C	Elastična komplijansa
K_{th}	Prag zamornog rasta prsline (<i>engl. threshold</i>)
C	Parisov koeficijent
m	Parisov koeficijent (eksponent)
N	Broj ciklusa (zamorni rast prsline)
a_f	Kritična dužina prsline (zamorni rast prsline)
NCC	Kriterijumi unakrsne korelacije (<i>engl. cross-correlation criterion</i>)
NR	Njutn-Rapsonove metode
2D DIC	Dvodimenzionalna DIC metoda
3D DIC	Trodimenzionalna DIC metoda
DVC	Digitalna korelacija zapremine (<i>engl. Digital Volume Correlation</i>)

ROI	Područje od interesa (<i>engl. Region of Interest</i>)
SSD	Kriterijum sume kvadratnih razlika (<i>engl. Sum of Squared Differences</i>)
NSSD	Normalizovani kriterijum sume kvadratnih razlika (<i>engl. Normalised SSD</i>)
ZNSSD	Nulto-normalizovani kriterijum sume kvadratnih razlika (<i>engl. Zero-Normalised SSD</i>)
COD	Otvaranje vrha prsline (<i>engl. Crack Opening Displacement</i>)
$[K]$	Globalna matrica krutosti
$\{U\}$	Globalni vektor pomeranja
$\{F\}$	Vektor opterećenja
u	Stepen slobode konačnih elemenata
N_i	Interpolacijske funkcije
v^j	Funkcija poboljšanja u j -tom čvoru
a_i^j	Dodatni stepeni slobode
$v_i^j(x)$	Vrednost j -te funkcije poboljšanja u i -tom čvoru
$V_i^j(x)$	Korigovana funkcija poboljšanja
n	Jedinični vektor pravca
x^*	Koordinata tačke preseka prsline i odgovarajućeg konačnog elementa
SMART	Metoda adaptivnog remeširanja i preoblikovanja mreže za simulaciju rasta prsline (<i>engl. Separation, Morphing, Adaptive Remeshing Technology</i>)
K_{eq}	Ekvivalentni faktor intenziteta napona
UHMWPE	Polietilen ultravisoke molekulske težine (<i>engl. Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i>)
F_A^e	Elastični (reverzibilni) deo ukupne deformacije mreže A
F_A^v	Viskoplastični (ireverzibilni) deo ukupne deformacije mreže A
μ_A	Početni modul smicanja
$\mathcal{L}^{-1}$	Inverzna Langevinova funkcija
$\overline{\lambda_A^{e*}}$	Efektivna vrednost istezanja polimernog lanca
λ_L	Granična deformacija istezanja polimernog lanca
J_A^e	Promena zapremine
θ	Temperatura
θ_0	Referentna temperatura
$\hat{\theta}$	Parametar temperature osetljivosti krutosti
$\mathbf{b}_A^{e*}$	Koši-Grinov tenzor deformacije
F_B^e	Elastični (reverzibilni) deo ukupne deformacije mreže B

F_B^v	Viskoplastični (ireverzibilni) deo ukupne deformacije mreže B
I_2	Druga invarijanta tenzora deformacije
q	Amplituda zavisnosti prvog reda od druge invarijante tenzora deformacije
TNM	Tro-mrežni konstitutivni model (<i>engl. Three-Network Model</i>)
TNV	Viskoplastični tro-mrežni konstitutivni model (<i>engl. Three-Network Viscoplastic Model</i>)
k	Kontrolisani eksperimentalni faktor (broj grupa)
SST	Ukupna suma kvadrata
SSB	Suma kvadrata između grupa
SSE	Suma kvadrata unutar grupa
n_i	Broj merenja u i -toj grupi
y_{ij}	j -ta opservacija u i -toj grupi
$\bar{y}_i$	Aritmetička sredina i -te grupe
$\bar{y}_..$	Ukupna aritmetička sredina svih opservacija
N	Ukupan broj sprovedenih merenja
F_0	Vrednost F -statistike
y_i	Zavisno promenljiva
$x_i (i=1,...,n)$	Nezavisne promenljive
β_0	Konstanta
$\beta_i (i=1,...,n)$	Regresioni koeficijenti
ε_i	Greška statističkog modela (rezidual)
R^2	Koeficijent determinacije
$y_{i, eks}$	Posmatrana vrednost dobijena eksperimentalnim ispitivanjem
$y_{i, num}$	Posmatrana vrednost dobijena numeričkom simulacijom
x_i, y_i	Pojedinačne vrednosti dve razmatrane nezavisno promenljive
$\bar{x}, \bar{y}$	Aritmetičke sredine dve razmatrane nezavisno promenljive
τ	Vreme relaksacije
LED	Svetleća dioda (<i>engl. Light Emitting Diode</i>)
P_Q	Uslovna vrednost sile pri proračunu na osnovu standarda ASTM D5045
P_{max}	Maksimalna vrednost sile dobijena ispitivanjem prema standardu ASTM D5045
$\sigma_{0.2}$	Konvencionalni napon tečenja
DSLR	Digitalni fotoaparati sa sistemom ogledala i promenljivim objektivima (<i>engl. Digital Single Lens Reflex</i>)
ΔU	Gustina energetske gubitke (<i>engl. Hysteresis loss density</i>)

d_{max}	Maksimalno pomeranje
U_{post}	Potencijalna energija nakon postignute maksimalne vrednosti sile (P_{max})
a_{max}	Maksimalna dužina prsline
a_{corr}	Korigovana maksimalna dužina prsline
$K_{I,max}$	Maksimalna vrednost faktora intenziteta napona u ciklusu za Mod I
C_{50}	Parisov koeficijent C izračunat metodom najmanjih kvadrata za srednju vrednost
C_{95}	Parisov koeficijent C izračunat kao konzervativna procena koja obuhvata 95% eksperimentalnih podataka
N_f	Broj ciklusa do loma
SIF	Faktor intenziteta napona (<i>engl. Stress Intensity Factor</i>)
α	Centralni ugao prsline

Spisak slika

Slika 1.1 Šematski prikaz uređaja: a) FDM [8]; b) DLP [9]; c) SLS [10] tehnologije.

Slika 1.2 Šematski prikaz principa rada FDM tehnologije.

Slika 1.3 Lom usled zamora na ortopedskoj pločici [37].

Slika 1.4 Tehnički crtež ortopedske pločice sa najdužim radnim vekom (dimenzije u mm) [36-40].

Slika 1.5 Bioresorptivne pločice na bazi PLA polimera, komercijalnog naziva Inion CPS® [41].

Slika 1.6 Tri osnovna tipa polimernih lanaca: a) linearni; b) razgranati; c) umreženi [42].

Slika 1.7 Prikaz: a) amorfni; b) idealno kristalni polimer [42].

Slika 1.8 Krezing kod polimera: epruveta (levo); šematski prikaz krezinga (desno) [42,45].

Slika 1.9 Izgled epruveta nakon ispitivanja zatezanjem: crvene epruvete (ukupno 3) – krt lom (levo); pink/magenta epruvete (ukupno 3) – duktilan lom [48].

Slika 1.10 Dijagrami inženjerski napon-inženjerska deformacija za: a) čist PLA polimer; b) kopolimer pod komercijalnim nazivom PLA-X [46].

Slika 1.11 Optička mikroskopija izrađenog dela sa prikazom uticaja temperature ekstruzije i brzine mlaznice [8].

Slika 1.12 Poprečni presek šest različitih kombinacija parametara aditivne proizvodnje sa prikazanim homogenim strukturama kod donje dve sličice pri ekstruziji od 250 °C [50].

Slika 1.13 Prikaz mogućnosti manipulacije redosleda niti i načina deponovanja sloja [50].

Slika 1.14 Uporedni prikaz dve srodne unutrašnje strukture ispune: a) heksagonalna (saće); b) trostruka heksagonalna (*Tri-hexagon*) [53].

Slika 1.15 Tri osnovna oblika razvoja prsline prema Orovanu [42,59].

Slika 1.16 Uporedni prikaz: a) telo beskonačnih dimenzija sa ivičnom prslinom; b) analogno telo konačnih dimenzija – $C(T)$ epruveta [58,60].

Slika 1.17 Prikaz: a) plastične oblasti ispred vrha prsline; b) zavisnost vrednosti K_{krit} od debljine uzorka; c) uticaj debljine uzorka na udeo ravnog preloma [42,58,59].

Slika 1.18 Prikaz: a) singularno dominantne zone oko vrha prsline; b) Irvinove korekcije poluprečnika plastične zone r_p ; c) procene plastične zone Dagdejljevom trakom popuštanja [42,59].

Slika 1.19 Prikaz: a) otvaranja vrha prsline CTOD (δ); b) alternativna definicija CTOD-a (δ); c) određivanja CTOD-a (δ) primenom analitičkih relacija na osnovu CMOD-a (V) [42,58].

Slika 1.20 Idealizovana kriva napon-deformacija pri opterećenju sa prikazom pravaca rasterećenja za nelinearno-elastični i elasto-plastični materijal [42].

Slika 1.21 Prikaz: a) putanje integracije oko vrha prsline za J integral; b) potrebne potencijalne energije za inkrementalni rast prsline da [58].

Slika 1.22 Prikaz naponskih stanja oko vrha prsline za slučaj: a) ograničenog tečenja; b) elasto-plastičnih uslova; c) opsežnog tečenja [42,64].

Slika 1.23 Grafički prikaz: a) izračunavanja J integrala na osnovu dostignute potencijalne energije uzorka; b) konstrukcija J - R krive [64].

Slika 1.24 J - R kriva za uporednim prikazom izgleda vrha prsline tokom faza zatupljenja i ranog stabilnog rasta [42].

Slika 1.25 Zavisnost parametra razdvajanja opterećenja S_{pb} od plastičnog pomeranja v_{pl} kod metode sa jednim uzorkom [64].

Slika 1.26 Prikaz amplitude opterećenja i naponskog stanja oko vrha prsline kod slučaja ograničenog tečenja (SSY) [42].

Slika 1.27 Kriva dvostruke logaritamske zavisnosti brzine rasta prsline da/dN od opsega ΔK [42].

Slika 1.28 Izgled jednog ciklusa opterećenja i rasterećenja kod polimernog materijala sa izraženim histerezisom [42].

Slika 1.29 Izgled SENB epruvete sa fokusom na oblast zareza, gde je prikazan hibridni način njegove izrade (aditivnim i konvencionalnim postupkom) [73].

Slika 1.30 Izgled SENB uzoraka nakon ispitivanja sa: a) tri ovojnice; b) dve ovojnice [77].

Slika 1.31 Mehanički odziv SENB uzoraka sa: a) tri ovojnice; b) dve ovojnice [77].

Slika 1.32 Grafički prikaz $C(T)$ i SENB uzoraka korišćenih u radu [85], sa pokazanim dimenzijama u mm.

Slika 1.33 Izgled J - R interpretacije sa vertikalnom linijom koja označava rast prsline od 0.2 mm iz rada [85].

Slika 1.34 Brzina rasta prsline prema Parisovom zakonu u radu [85].

Slika 1.35 Zavisnost parametara otvaranja prsline CTOD i CMOD radi verifikacije rezultata [80].

Slika 1.36 Prelomna površina SENB uzorka sa fokusom na bočnu stranu [80].

Slika 1.37 Prelomna površina SENB uzorka sa fokusom na sredinu uzorka [80].

Slika 1.38 Kombinovana analiza primenom: a) MKE; b) xFEM metode u istraživanjima [115,116].

Slika 1.39 a) xFEM analiza dizajna totalne proteze kuka; b) uveličan prikaz okoline modelirane prsline u radu [118].

Slika 1.40 Numerički modeli sa prikazanom mrežom konačnih elemenata: a) totalna proteza kuka; b) cement; c) femoralna kost; d) sklop iz [120].

Slika 1.41 MKE analiza naponskih stanja ortopedske pločice: a) prikaz modela sa odgovarajućim modelom kosti; b) pojedinačni prikaz iz [34].

Slika 1.42 Različiti modeli ortopedskih pločica sa odgovarajućim slovnim oznakama iz [36-40].

Slika 1.43 Broj ostvarenih ciklusa u zavisnosti od dužine rasta prsline za tri različita slučaja opterećenja [36-40].

Slika 1.44 Numerički model sa mrežom konačnih elemenata aditivno proizvedenog francuskog ključa sa odgovarajućim modelom glave zavrtnja iz [103].

Slika 1.45 Zavisnost maksimalne vrednosti faktora intenziteta napona K_I od dužine rasta prsline za razvijene 2D i 3D modele iz [103].

Slika 1.46 Praćenje razvoja oblika prsline od kružnog ka elipsastom obliku [103].

Slika 1.47 Proračunate vrednosti faktora intenziteta napona K_I duž fronta prsline [124].

Slika 1.48 Uticaj parametara aditivne proizvodnje analiziran primenom Tukey post hoc testa za: a) krutost; b) silu na mestu loma [55].

Slika 1.49 Izgled uzorka (dimenzije u mm) i šema uređaja za ispitivanje dinamičke izdržljivosti iz [88].

Slika 2.1 Komponente napona u okolini vrha prsline u odnosu na koordinatne ose [58].

Slika 2.2 Izgled SENB epruvete prema standardima ASTM D5045 i D6068 sa naglašenim karakterističnim geometrijskim parametrima [60,65].

Slika 2.3 Izgled epruveta za ispitivanje metodom sa jednim uzorkom: a) epruveta sa iniciranom prsline; b) epruveta sa zatupljenim vrhom zareza [64].

Slika 2.4 Predložena metoda određivanja trenutka početka stabilnog rasta prsline na osnovu dijagrama zavisnosti CMOD i CTOD.

Slika 2.5 Šematski prikaz: a) 2D DIC metode za ravne uzorke; b) 3D DIC metode za zakrivljene površine [152].

Slika 2.6 Primer referentnog (nedeformisanog) podskupa i odgovarajućeg deformisanog [150].

Slika 2.7 Konvergencija rešenja polja napona i pomeranja dobijenih putem MKE u zavisnosti od broja elemenata [148].

Slika 2.8 Prikaz H- i NT-čvorova pri modeliranju rasta prsline primenom xFEM-a [156].

Slika 2.9 Reološki prikaz konstitutivnog modela predloženog u [159].

Slika 3.1 Prikaz: a) FDM uređaja German RepRap x400; b) izrade serije SENB epruveta sa 10% količinom ispune.

Slika 3.2 Softverski prikaz rektilinearne orijentacije niti ($-45/45^\circ$) [55].

Slika 3.3 Prikaz kidalice Shimadzu AGS-X sa aksijalnim ekstenzometrom tokom ispitivanja na zatezanje, sa uvećanim prikazom epruvete nakon ispitivanja.

Slika 3.4 Izgled epruvete za zatezanje prema standardu ISO 527-2 [141] (dimenzije su u mm).

Slika 3.5 Šematski prikaz postupka ispitivanja: a) relaksacije; b) cikličnog opterećenja epruveta za zatezanje.

Slika 3.6 Šematski prikaz ispitivanja SENB epruvete na savijanje u tri tačke prema standardu ASTM D5045 [60].

Slika 3.7 Izgled SENB epruvete za procenu žilavosti loma prema standardu ASTM D5045 [60] (dimenzije su u mm).

Slika 3.8 Grafički crtež korišćenog žileta za formiranje inicijalne prsline (dimenzije su u mm).

Slika 3.9 Izgled svih epruveta nakon aditivne proizvodnje, korišćenih za ispitivanje žilavosti loma u ovom istraživanju.

Slika 3.10 Izgled SENB epruveta sa nanetom stohastičkom šarom za primenu DIC metode.

Slika 3.11 Kompletna eksperimentalna postavka za ispitivanje SENB epruvete uz primenu 3D DIC metode, sa uvećanim prikazom epruvete.

Slika 3.12 Izvod iz standarda ASTM D5045 sa vrednostima geometrijskog faktora $f(x)$ [60].

Slika 3.13 Određivanje validnosti ispitivanja prema kriterijumu sile [60].

Slika 3.14 Položaj virtuelnih mernih traka na SENB epruveti u okviru 3D DIC analize.

Slika 3.15 Dijagram von Misesovih deformacija duž virtuelnih mernih traka za određivanje pravca prostiranja prsline.

Slika 3.16 Softverski prikaz CTOD-a i CMOD-a primenom 3D DIC metode.

Slika 3.17 Prikaz korisnog dela krive sila-pomeranje izuzetog od dela gde ne važi J integral.

Slika 3.18 Izgled: a) postupka lomljenja epruveta u tečnom azotu (Stomatološki fakultet, Univerziteta u Beogradu); b) polomljenih epruveta.

Slika 3.19 Način izračunavanja dužine prsline prema standardu ASTM D6068 [65].

Slika 3.20 Numerički model SENB epruvete sa uvećanim prikazom područja inicijalne prsline u softveru Ansys Mechanical (Ansys, Kenonsburg, SAD) sa prikazanom mrežom konačnih elemenata.

Slika 3.21 Prikaz potencijalne energije predstavljene površinom ispod krive sila-pomeranje i energije indentacije za tačku maksimalne sile.

Slika 3.22 Pulzator Instron Electropulse E3000 tokom ispitivanja C(T) epruveta.

Slika 3.23 Prikaz: a) procesa aditivne proizvodnje C(T) epruveta; b) šeme procesa.

Slika 3.24 Softverski prikaz karakterističnih elemenata pri izradi dela: ovojnice, obod i pod.

Slika 3.25 Tehnički crtež C(T) epruveta: sa bočnim zarezima – levo; bez bočnih zareza – desno (dimenzije su u mm).

Slika 3.26 Izgled inicijalne prsline na C(T) epruveti.

Slika 3.27 Postavka eksperimenta za ispitivanje zamornog rasta prsline na C(T) epruvetama od PLA materijala.

Slika 3.28 SEM uređaji na kojima je rađeno snimanje prelomnih površina epruveta: a) Institut za fiziku materijala pri Češkoj akademiji nauka u Brnu; b) Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu.

Slika 3.29 Postupak izrade modela ortopedske pločice sa strukturom saća dobijenom u softveru Simplify3D sa geometrijom prenešenom u SolidWorks [30].

Slika 3.30 Primenjeno opterećenje i granični uslovi po pomeranju [30].

Slika 3.31 Izgled mreže konačnih elemenata sa uvećanim prikazom oblasti u kojoj se nalaze prsline [30].

Slika 3.32 Lokalna količina materijala oko prsline za različite razmatrane debljine: a) 0.2 mm; b) 0.5 mm; c) 1 mm; d) 2 mm; e) 3 mm; f) 4 mm; g) 5 mm.

Slika 3.33 Numerički modeli ortopedskih pločica u Ansys 2022 R2 softveru za: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100% količinu ispune [30].

Slika 4.1 Dijagram zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za jednu epruvetu visine sloja 0.1 mm i sa 100% količinom ispune.

Slika 4.2 Dijagrami zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za seriju epruveta sa 100% količinom ispune: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm; d) usrednjene krive [57].

Slika 4.3 Dijagram zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za epruvete ispitane pri kontroli pomeranja od 10 mm/min [57].

Slika 4.4 Prelomna površina epruvete za zatezanje sa 100% količinom ispune sa uveličanim prikazom područja oko ovojnice.

Slika 4.5 Kalibracija viskoelastičnog modela PLA materijala za različite visine sloja: a) model epruvete u programu Abaqus; b) 0.3 mm; c) 0.2 mm; d) 0.1 mm [57].

Slika 4.6 Rezultati relaksacije PLA materijala nakon dostizanja: a) 1.1% deformacije; b) 1.5% deformacije.

Slika 4.7 Histerezisne petlje pri uzastopnim ciklusima opterećenja i rasterećenja PLA materijala.

Slika 4.8 Gustina energetskog gubitka pri uzastopnim ciklusima opterećenja i rasterećenja PLA materijala.

Slika 4.9 Dijagram sila-pomeranje za jednu SENB epruvetu ispitanu prema standardu ASTM D5045 [60] sa ucrtanim linijama za evaluaciju.

Slika 4.10 Procena RSD stanja sa proračunatim vrednostima i ucrtanom graničnom vrednošću od 10 mm (crvena linija) na SENB epruvetama svih količina ispune za: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm visine sloja.

Slika 4.11 Kriterijum sile sa proračunatim vrednostima i ucrtanom graničnom vrednošću odnosa sila (1.1) na SENB epruvetama svih količina ispuna za: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm visine sloja.

Slika 4.12 Procenjene vrednosti žilavosti loma K_{IC} svih količina ispuna za: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm visine sloja.

Slika 4.13 SEM mikroskopija prelomne površine SENB epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm i količinom ispune od 100%, sa uveličanim prikazom dela u kojem je rasla prslina.

Slika 4.14 SEM mikroskopija prelomne površine SENB epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm i količinom ispune od 40%, sa uveličanim prikazom dela u kojem je rasla prslina.

Slika 4.15 Dijagram sila-pomeranje za reprezentativne rezultate svih količina ispune za visinu sloja od 0.1 mm.

Slika 4.16 Merenje karakterističnih dužina prsline na prelomnim površinama SENB epruveta prema standardu ASTM D6068 [65] za: a) visinu sloja 0.1 mm i količinu ispune 50%; b) visinu sloja 0.1 mm i količinu ispune od 20%.

Slika 4.17 Odnos CMOD – CTOD za serije sa visinom sloja od 0.1 mm: a) 80% količine ispune; b) 30% količine ispune.

Slika 4.18 Odnos CMOD – CTOD za 0.3 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.19 Odnos CMOD – CTOD za 0.2 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.20 Odnos CMOD – CTOD za 0.1 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.21 Verifikacija numeričke simulacije statičkog rasta prsline na modelima SENB epruvete za 0.1 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.22 Prikaz unutrašnje strukture saća na numeričkom modelu SENB epruvete.

Slika 4.23 Dijagrami priraštaja prsline u numeričkim simulacijama za 0.1 mm visinu sloja i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.24 Dijagrami sila-pomeranje sa označenim delom odziva koji odgovara rastu prsline od interesa za SENB epruvete sa 0.2 mm visinom sloja i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količinom ispune.

Slika 4.25 Dijagram J - R krivih sa vrednostima J_{IC} za visinu sloja od 0.3 mm i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.26 Dijagram J - R krivih sa vrednostima J_{IC} za visinu sloja od 0.2 mm i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.27 Dijagram J - R krivih sa vrednostima J_{IC} za visinu sloja od 0.1 mm i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Slika 4.28 Prelomna površina C(T) epruvete sa 0.3 mm visinom sloja, pogled sa bočne strane [79].

Slika 4.29 Karakteristične oblasti na prelomnoj površini C(T) epruvete [79].

Slika 4.30 Softverski prikaz stepenastog efekta kod aditivno proizvedenih bočnih zarezima sa označenom zonom za posmatranje rasta prsline [79].

Slika 4.31 Prikaz zaklonjenog rasta prsline u zoni bočnog zarezima zabeležen 2D DIC sistemom [79].

Slika 4.32 Prelomna površina C(T) epruvete sa visinom sloja od 0.3 mm i izrađenim bočnim zarezima: a) pogled sa bočne strane; b) pogled odozgo [79].

Slika 4.33 Prelomna površina C(T) epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm: a) pogled sa bočne strane; b) pogled odozgo [79].

Slika 4.34 Makroskopski izgled C(T) epruveta nakon završenog ispitivanja zamornog rasta prsline za: a) 0.3 mm (glatka epruveta); b) 0.3 mm sa bočnim zarezima; c) 0.1 mm visine sloja [79].

Slika 4.35 Dijagram brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za sve ispitane visine sloja.

Slika 4.36 Dijagram brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za 0.2 mm visinu sloja.

Slika 4.37 Dijagram brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za 0.1 mm visinu sloja.

Slika 4.38 Dijagram zamornog veka ispitanih C(T) epruveta ($N_f - K_{I,max}$).

Slika 4.39 Vrednosti SIF -a duž fronta rasta prsline za numeričke modele ortopedskih pločica sa: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100% ispune.

Slika 4.40 Evolucija oblika fronta prsline od kružnog ka eliptičnom za modele sa: a) 60%; b) 100% količinom ispune [30].

Slika 4.41 Prikaz centralnog ugla α u početnom trenutku prsline [30].

Slika 4.42 Dijagrami zavisnosti SIF -a, odnosno $K_{I,max}$, od centralnog ugla α za modele: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100% ispune.

Spisak tabela

Tabela 1.1 Raspon vrednosti odabranih mehaničkih osobina PLA polimera [16,46].

Tabela 3.1 Nepromenljivi parametri aditivne proizvodnje korišćeni u istraživanju.

Tabela 3.2 Konfiguracija 3D DIC sistema i podaci o kalibraciji.

Tabela 3.3 Rezultati analize konvergencije mreže za numerički model ortopedske pločice sa 80% količine ispune [30].

Tabela 4.1 Vrednosti zatezne čvrstoće σ_m za sve kombinacije količine ispune i visine sloja [57].

Tabela 4.2 Vrednosti modula elastičnosti E za sve kombinacije količine ispune i visine sloja [57].

Tabela 4.3 Vrednosti σ_m i E za epruvete ispitane pri kontroli pomeranja od 10 mm/min [57].

Tabela 4.4 Karakteristične tačke merene prema ASTM D6068 [65] za navedene epruvete.

Tabela 4.5 Statistički modeli višestruke linearne regresije za količine ispune od 30%, 40% i 50%.

Tabela 4.6 Početne (a_{max}) i korigovane (a_{corr}) vrednosti maksimalne dužine prsline.

Tabela 4.7 Vrednosti C_1 i C_2 , R^2 , J_{IC} i proračunatog K_{JIC} za sve razmatrane J - R krive.

Tabela 4.8 Poređenje vrednosti K_{IC} i K_{JIC} i njihovih odstupanja za verifikaciju hibridne metode.

Tabela 4.9 Vrednosti žilavosti loma prema LEML i EPML za različite količine ispune i visine sloja.

Tabela 4.10 Koeficijenti Parisove jednačine za razmatrane visine sloja i njihovu kombinaciju.

Tabela 4.11 Rezultati numeričkih simulacija zamornog rasta prsline za sve razmatrane modele [30].

Tabela 4.12 Površina poprečnog preseka i zapremina materijala u okolini prsline za različite debljine u rasponu $t = 0.2 - 5$ mm.

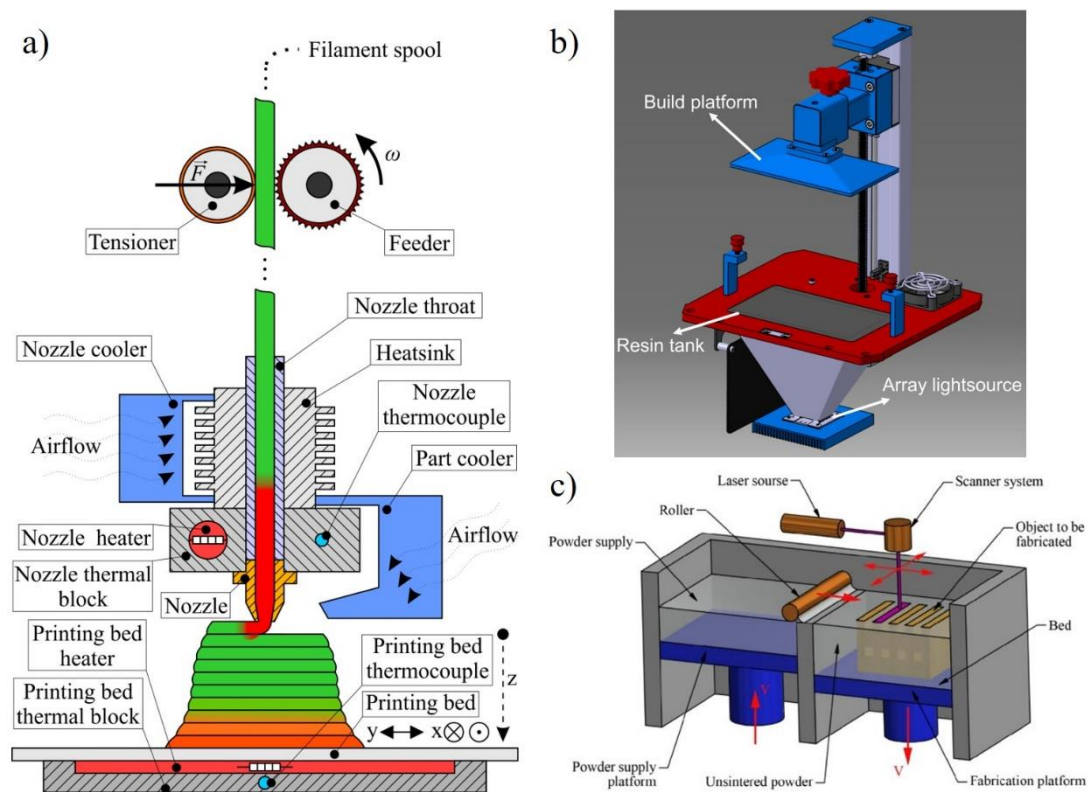
Tabela 4.13 Pearsonov koeficijent korelacije (r) i p -vrednost za sve modele izuzev 60% ispune.

1. Uvod i pregled literature

1.1. Aditivna proizvodnja, ortopedske pločice i primena PLA polimera u biomedicini

Aditivna proizvodnja predstavlja relativno nov pristup u poređenju sa tradicionalnim subtraktivnim proizvodnim tehnologijama. Za razliku od subtraktivnih postupaka, kod kojih se konačni deo dobija uklanjanjem viška materijala, aditivne tehnologije se zasnivaju na principu izgradnje odozdo-nagore (*engl. bottom-up*), gde se deo izrađuje sukcesivnim deponovanjem materijala, sloj po sloj [1]. Pored značajne uštede materijala, ovaj proizvodni postupak omogućava izradu delova složene geometrije, kao i kontrolu i optimizaciju njihove unutrašnje strukture, čime se ostvaruju značajne prednosti u različitim oblastima inženjerstva [2,3]. Navedene pogodnosti omogućile su aditivnim tehnologijama da pored izrade prototipova, što je bila njihova prvobitna namena, primene i u proizvodnji funkcionalnih delova. Najčešće navođene oblasti primene obuhvataju automobilsku industriju, vazduhoplovstvo i biomedicinsko inženjerstvo [4,5].

U zavisnosti od primenjene tehnologije aditivne proizvodnje, gradivni materijal se omekšava, topi, sinteruje ili izlaže dejstvu odgovarajućeg izvora energije radi formiranja konačnog dela. Kao gradivni materijali u ovim procesima najčešće se koriste metali i njihove legure, polimeri i njihovi kompoziti, kao i keramika, dok se u specifičnim oblastima primene koriste i drugi materijali, poput betona i cementnih kompozita. Među najzastupljenijim savremenim tehnologijama aditivne proizvodnje izdvajaju se modeliranje deponovanjem topljenog materijala (*engl. Fused Deposition Modelling – FDM*), stereolitografija (*engl. Stereolithography – SLA*), digitalna obrada svetlosti (*engl. Digital Light Processing – DLP*), selektivno lasersko sinterovanje (*engl. Selective Laser Sintering – SLS*), selektivno lasersko topljenje (*engl. Selective Laser Melting – SLM*), topljenje elektronskim snopom (*engl. Electron Beam Melting – EBM*), brizganje veziva (*engl. Binder Jetting*), kao i mlazno deponovanje materijala (*engl. Material Jetting*) [6,7]. Na slici 1.1 prikazane su šematske konfiguracije FDM, DLP i SLS uređaja.

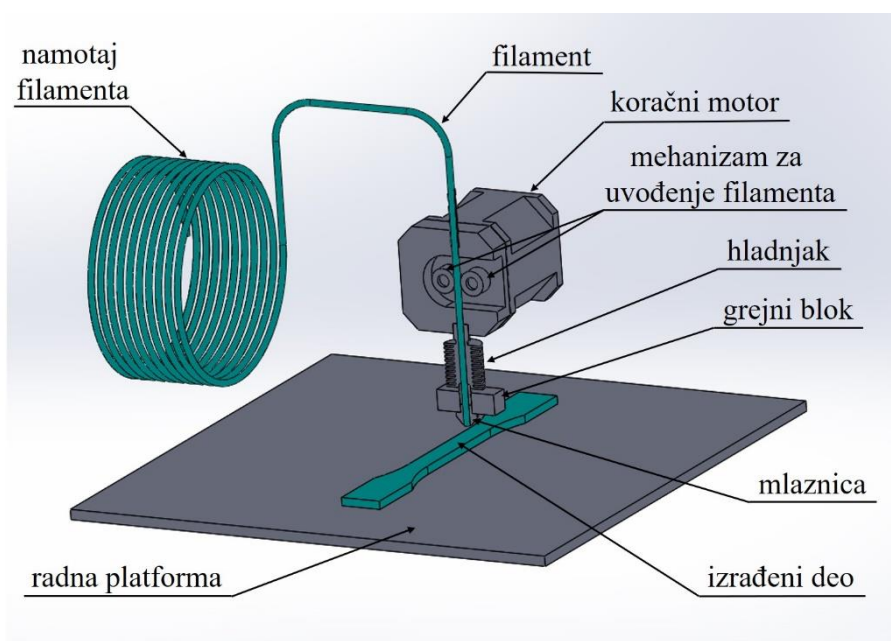


Slika 1.1 Šematski prikaz uređaja: a) FDM [8]; b) DLP [9]; c) SLS [10] tehnologije.

Tehnologije aditivne proizvodnje mogu se klasifikovati u nekoliko osnovnih grupa prema načinu izrade slojeva, među kojima se izdvajaju tehnologije zasnovane na ekstruziji topljenog termoplastičnog materijala, kojima pripada FDM, tehnologije zasnovane na fotopolimerizaciji smole, koje obuhvataju SLA i DLP, kao i tehnologije zasnovane na spajanju u sloju praha, u koje se svrstavaju SLS, SLM i EBM. Pored navedenih, izdvajaju se i tehnologije zasnovane na brizganju veziva i mlaznom deponovanju materijala, direktnom deponovanju materijala uz usmereni izvor energije (*engl. Directed Energy Deposition – DED*), kao i laminiranju listastog materijala (*engl. Sheet Lamination*) [1,6,7].

Princip rada FDM uređaja zasniva se na dovođenju termoplastičnog materijala u obliku filameta do dela uređaja u kojem se filament zagreva iznad temperature topljenja, nakon čega se istopljeni materijal istiskuje kroz mlaznicu i nanosi na radnu platformu sloj po sloj. Filament se najčešće isporučuje u obliku namotaja na koturu. Mehanizam za uvođenje filameta najčešće se sastoji od pogonskog zupčanika i potisnog točkića (ležaja). Na pogonskom zupčaniku nalaze se posebno profilisani, oštri zupci čija je namena da se usecaju u površinu filameta. Potisni točkić nalazi se nasuprot pogonskom zupčaniku, a njegova uloga je da ravnomerno pritiska filament uz zupčanik kako bi se obezbedio odgovarajući kontakt, bez deformisanja filameta. Celokupno kretanje mehanizma ostvaruje se pomoću koračnog motora.

Ispod mehanizma za uvođenje filameta nalazi se hladnjak, koji služi za odvođenje toplote koja potiče od mlaznice, kako ne bi došlo do zastoja u radu i zaglavljivanja uređaja usled preranog omekšavanja i topljenja filameta. Mlaznica se zagreva provođenjem toplote iz grejnog bloka, u kojem su ugrađeni električni grejač i temperaturni senzor. Pomoću temperaturnog senzora, koji šalje povratni signal kontroleru, tokom procesa izrade dela održava se konstantna radna temperatura grejnog bloka, čime se obezbeđuje stabilan protok istopljenog materijala i kontinualno deponovanje materijala na radnu platformu. Detaljan šematski prikaz FDM uređaja i njegovih osnovnih komponenti prikazan je na slici 1.2. Deo uređaja koji se sastoji od mehanizma za uvođenje filameta, koračnog motora, hladnjaka, grejnog bloka i mlaznice naziva se ekstruder. U najvećem broju slučajeva ekstruder se kreće u X-Y ravni, dok se radna platforma najčešće spušta nakon završetka izrade sloja, čime se omogućava kretanje i po Z osi. Radna platforma često poseduje sopstveni grejač čija se temperatura održava blizu temperature staklastog prelaza (T_g) termoplastičnog materijala, čime se sprečava skupljanje usled hlađenja i obezbeđuje zadovoljavajuće prijanjanje prvog sloja tokom procesa izrade dela. Takvim sukcesivnim deponovanjem materijala sloj po sloj nastaje izrađeni deo.



Slika 1.2 Šematski prikaz principa rada FDM tehnologije.

U okviru ovog istraživanja pažnja je posvećena FDM tehnologiji, koja koristi termoplastične materijale kao gradivno sredstvo, među kojima se najčešće komercijalno primenjuju polilaktid (PLA), akrilonitril-butadien-stiren (ABS), polipropilen (PP), polietilen-tereftalat glikol (PETG), termoplastični poliuretan (TPU), polikarbonat (PC), kao i njihovi kompoziti ojačani ugljeničnim i staklenim vlaknima [11-13]. Poseban značaj ove tehnologije ogleda se u mogućnosti njene primene u oblasti biomedicinskog inženjerstva, zahvaljujući upotrebi biokompatibilnih materijala sa odgovarajućim mehaničkim svojstvima, kao što su poli(eter-eter-keton) (PEEK), polimetil-metakrilat (PMMA), poliviniliden-fluorid (PVDF), kao i prethodno navedeni PLA, PP i PETG [14]. Naime, PLA je u oblasti aditivne proizvodnje prvobitno uveden kao materijal namenjen pre svega izradi prototipova [8,15]. Međutim, zahvaljujući povoljnim mehaničkim svojstvima u poređenju sa drugim termoplastičnim materijalima, PLA se danas svrstava u grupu materijala sa potencijalom za funkcionalne primene [5,16]. Pored mogućnosti primene u kontaktu sa hranom, koja je odobrena u skladu sa odgovarajućim regulatornim zahtevima, PLA je posebno interesantan za biomedicinske primene zbog kombinacije biokompatibilnosti i povoljnih mehaničkih svojstava [14,16].

Savremena istraživanja usmerena su ka primeni ovog materijala u različitim oblastima biomedicinskog inženjerstva, uključujući izradu barijernih membrana [17], sistema za isporuku lekova [18-20], nosača za regeneraciju kostiju [21-23], struktura koje se koriste u inženjerstvu tkiva [24,25], kao i primenama u ortopediji [26-28]. Važno je istaći da potencijal PLA materijala dodatno proizilazi i iz njegove mogućnosti recikliranja pod kontrolisanim uslovima, kao i iz njegove biodegradabilnosti i kompostabilnosti. Tokom procesa degradacije PLA se primarno razlaže do mlečne kiseline (laktata), jedinjenja koje je biokompatibilno i čiji lokalni biološki efekti zavise od brzine degradacije, kao i uslova primene [5,29]. Na taj način, PLA predstavlja materijal sa povoljnim ekološkim i biomedicinskim karakteristikama, budući da njegova degradacija ne dovodi do stvaranja štetnih nusproizvoda pri odgovarajuće kontrolisanim uslovima primene. Ova osobina posebno je značajna kod sistema za kontrolisanu isporuku lekova, gde se podešavanjem strukture i svojstava materijala može ostvariti produženo i kontrolisano oslobađanje terapijskih agenasa. Pored toga, potencijal PLA za primenu u nosivim biomedicinskim strukturama predstavlja dodatnu prednost, pri čemu njegova biodegradabilnost čini ovaj materijal posebno interesantnim za kratkotrajne ortopedске implante, kao što su pločice za fiksaciju kostiju, kod kojih je poželjna postepena degradacija nakon završetka procesa zarastanja kosti [14,30-32].

Ortopedski implantati se i danas gotovo isključivo izrađuju od metalnih materijala, pre svega od legura titanijuma, kao što je Ti-6Al-4V, Co-Cr legura i nerđajućih čelika. U ortopediji postoji širok spektar pločica u zavisnosti od lokacije i vrste preloma, čija je osnovna namena postizanje stabilne fiksacije koštanih fragmenata. Njihova primarna uloga jeste obezbeđivanje stabilnosti na mestu preloma, čime se omogućava pravilno srastanje koštanih fragmenata, uključujući i osteoporotične prelome [33,34]. Jedan od glavnih nedostataka metalnih ortopedskih pločica jeste pojava efekta zaštite od opterećenja (*engl. stress shielding*), koji nastaje usled znatno veće krutosti metala u odnosu na koštano tkivo. Takva razlika u mehaničkim svojstvima može dovesti do smanjenog prenosa opterećenja na kost, što može negativno uticati na proces njenog zarastanja. U tom kontekstu, titanijumske legure se, zahvaljujući nižoj krutosti ($E \approx 110 \text{ GPa}$), smatraju pogodnijim materijalom za izradu ortopedskih pločica u poređenju sa nerđajućim čelicima ($E \approx 200 \text{ GPa}$) [35].

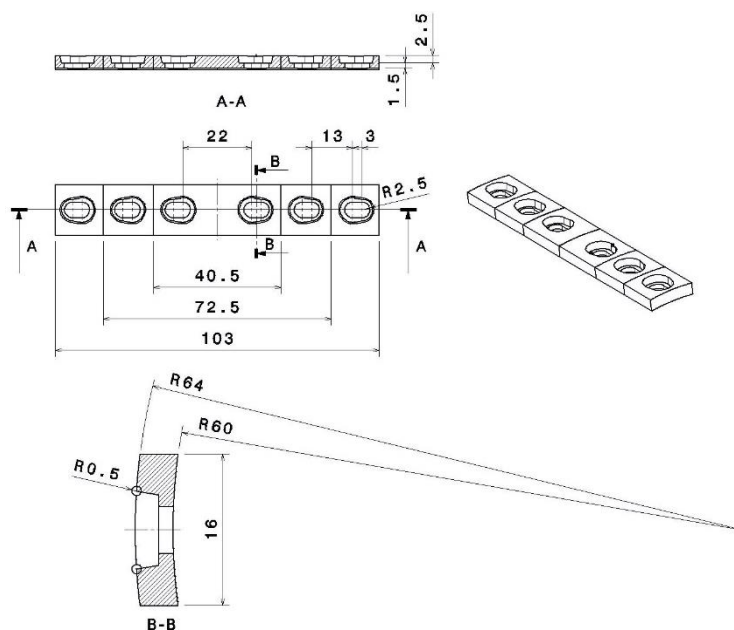
Najčešći uzrok otkaza ortopedskih pločica predstavlja zamor materijala, koji nastaje kao posledica akumulacije oštećenja, počev od inicijacije prsline, preko njenog rasta (propagacije), pa sve do konačnog loma. Pored zamora, značajan uzrok otkaza ortopedskih implanata predstavljaju i greške tokom hirurške implantacije, uključujući prekomerno savijanje ortopedskih pločica primenom specijalnih alata za njihovo oblikovanje. Takve plastične deformacije mogu dovesti do pojave lokalnih koncentracija napona i oštećenja materijala, čime se smanjuje nosivost implanata i povećava verovatnoća njegovog prevremenog otkaza nakon ugradnje u ljudski organizam [33,36].

Lom usled zamora ortopedskih pločica najčešće nastaje u zonama smanjenog poprečnog preseka, odnosno u blizini otvora, gde usled koncentracije napona dolazi do inicijacije prsline. Primer zamornog loma ortopedske pločice prikazan je na slici 1.3.



Slika 1.3 Lom usled zamora na ortopedskoj pločici [37].

Geometrijski dizajn ortopedskih pločica ima značajan uticaj na njihovo mehaničko ponašanje i otpornost prema zamornom lomu. Istraživanja su pokazala da se efekat zaštite od opterećenja može smanjiti primenom pločica manje debljine [35], dok je najduži preostali radni vek, određen numeričkom analizom propagacije inicijalne prsline, zabeležen kod pločica sa većom kontaktnom površinom sa kosti, odnosno kod pločica veće širine [36-40]. Tehnički crtež ortopedske pločice sa najdužim preostalim radnim vekom prikazan je na slici 1.4.



Slika 1.4 Tehnički crtež ortopedske pločice sa najdužim radnim vekom (dimenzije u mm) [36-40].

Procena preostalog radnog veka ortopedskih pločica izvršena je primenom proširene metode konačnih elemenata (*engl. eXtended Finite Element Method – xFEM*), kojom je omogućeno modeliranje propagacije unapred definisane prsline kroz strukturu iz [36-40].

Kod polimernih materijala efekat zaštite od opterećenja znatno je manje izražen, što predstavlja jednu od njihovih potencijalnih prednosti u odnosu na metalne implante. Međutim, zbog niže krutosti polimera, neophodna je primena ortopedskih pločica veće debljine kako bi se obezbedile odgovarajuća nosivost i stabilnost koštanih fragmenata. Jedna od značajnih prednosti biodegradabilnih materijala u ortopediji ogleda se u njihovom postepenom smanjenju krutosti tokom vremena, čime se omogućava sukcesivno preuzimanje opterećenja od strane zarasle kosti sve do degradacije implantata. Na taj način može se izbeći potreba za naknadnim hirurškim uklanjanjem pločice [35]. Jedan od primera komercijalno dostupnih biodegradabilnih ortopedskih pločica na bazi PLA polimera jeste Inion CPS® (Inion Oy, Tampere, Finska), prikazan na slici 1.5 [41].



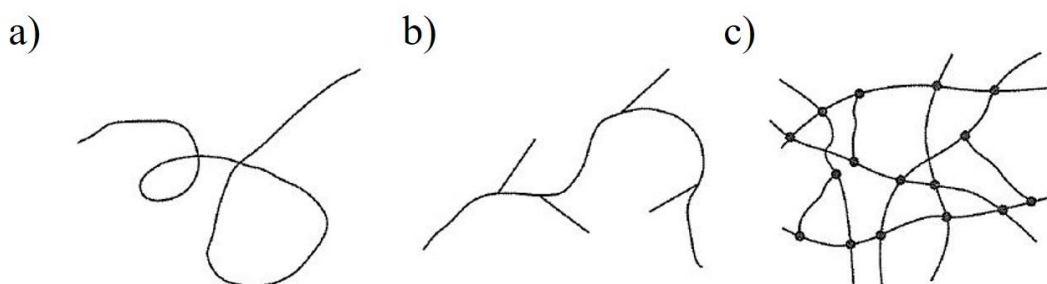
Slika 1.5 Bioresorptivne pločice na bazi PLA polimera, komercijalnog naziva Inion CPS® [41].

Dodatno, aditivne tehnologije pružaju mogućnost projektovanja struktura poput ortopedskih pločica primenom CAD (*engl. Computer-Aided Design*) softvera, na osnovu podataka dobijenih rendgenskim snimanjem ili drugim metodama, čime se može ostvariti geometrija prilagođena anatomskim karakteristikama pojedinačnog pacijenta. Na taj način izbegava se naknadno savijanje pločice od strane hirurga radi prilagođavanja njene geometrije anatomiji kosti, što može dovesti do neželjenih promena u raspodeli napona i pojave lokalnih koncentracija napona. Individualizovani dizajn implantata može doprineti povoljnijoj raspodeli opterećenja i produženju njegovog radnog veka [33,35].

Uprkos širokoj komercijalnoj primeni PLA materijala u FDM tehnologiji, kompleksna priroda aditivne proizvodnje i njenih parametara, kao i anizotropija materijala i nedovoljno istraženi mehanizmi loma usled njihove složene strukture, koja prvenstveno obuhvata deponovane slojeve i druge neregularnosti, zahtevaju dublje razumevanje mikrostrukturnih karakteristika i mehaničkog odziva ovog materijala. Stoga će u narednim podpoglavljima fokus biti usmeren na detaljniju analizu mehaničkih svojstava PLA materijala, uticaj parametara aditivne proizvodnje na ponašanje delova izrađenih FDM tehnologijom, kao i samog mehanizma loma, uz osvrt na dosadašnja naučna dostignuća u oblasti tehnologije materijala i mehanike loma. Ključni aspekt za razmatranje primene ovog materijala u izradi funkcionalnih delova ne ogleda se samo u karakterizaciji njegovih mehaničkih svojstava, već pre svega u razumevanju njegovog ponašanja u prisustvu defekta, kao i pojava koje prethode nastanku loma.

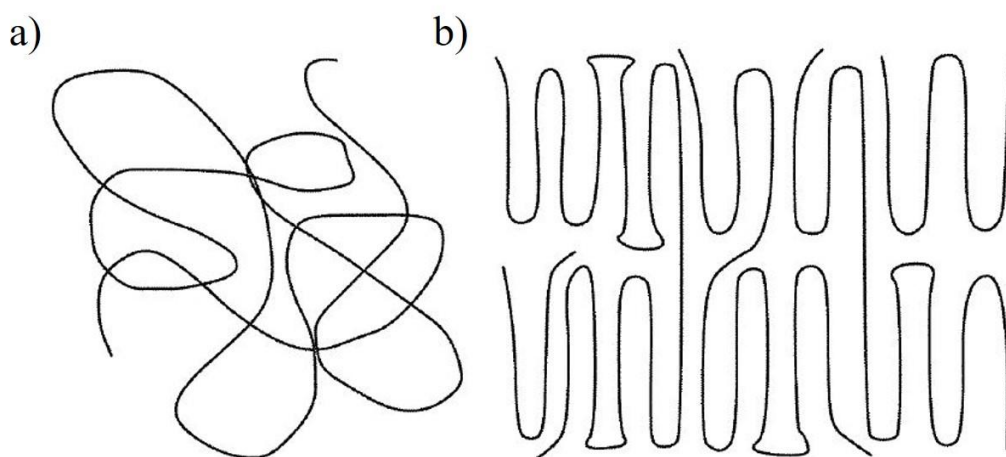
1.2. Mehaničke osobine i struktura PLA polimera u aditivnoj proizvodnji

Osnovnu strukturnu jedinicu polimernih materijala čini makromolekul, odnosno polimerni lanac. Njegova topologija, prostorna orijentacija i međusobna organizacija lanaca u velikoj meri određuju makroskopski odziv i mehaničke osobine samog materijala. U zavisnosti od topologije makromolekulskih lanaca polimeri se u osnovi dele na linearne, razgranate i umrežene (slika 1.6). Linearni polimeri obuhvataju većinu termoplasta, u koju spada i PLA, dok su razgranati polimeri najčešće zastupljeni kod pojedinih tipova polietilena (PE), poput polietilena niske gustine (LDPE). Umreženi polimeri karakteristični su za duromere i pojedine elastomere, kod kojih su makromolekulski lanci međusobno povezani trajnim kovalentnim vezama. Linearni polimerni lanci nisu potpuno pravolinijski, već se sastoje od niza ugljenikovih atoma povezanih u dugačke makromolekulske lance [42].



Slika 1.6 Tri osnovna tipa polimernih lanaca: a) linearni; b) razgranati; c) umreženi [42].

Polimerni lanci mogu biti gusto pakovani u pravilno uređenoj strukturi ili nasumično raspoređeni. U prvom slučaju formiraju se kristalne oblasti koje, zajedno sa amorfnim oblastima, grade semikristalne polimere, dok se polimeri sa nasumično raspoređenim lancima nazivaju amorfnim polimerima (slika 1.7). Unutar polimernog lanca atomi su povezani jakim kovalentnim vezama, dok između susednih lanaca deluju međumolekulske sile, pre svega van der Valsove interakcije, koje održavaju njihovu međusobnu povezanost i određuju njihov prostorni raspored. Važno je napomenuti da nijedan polimer nije potpuno kristalan, već uvek sadrži određeni udeo amorfne faze, zbog čega se takvi materijali nazivaju semikristalnim [16,42].



Slika 1.7 Prikaz: a) amorfni; b) idealno kristalni polimer [42].

U čvrstom stanju, PLA može biti semikristalan ili amorfan, u zavisnosti pre svega od stereochemijskog sastava, a zatim i od termalne istorije materijala. Naime, kod PLA postoji prostorni raspored D- i L-laktidnih jedinica, koje imaju istu hemijsku formulu, ali ih odlikuje različita prostorna orijentacija unutar polimernog lanca [16]. Kontrolom stereochemijskog sastava moguće je

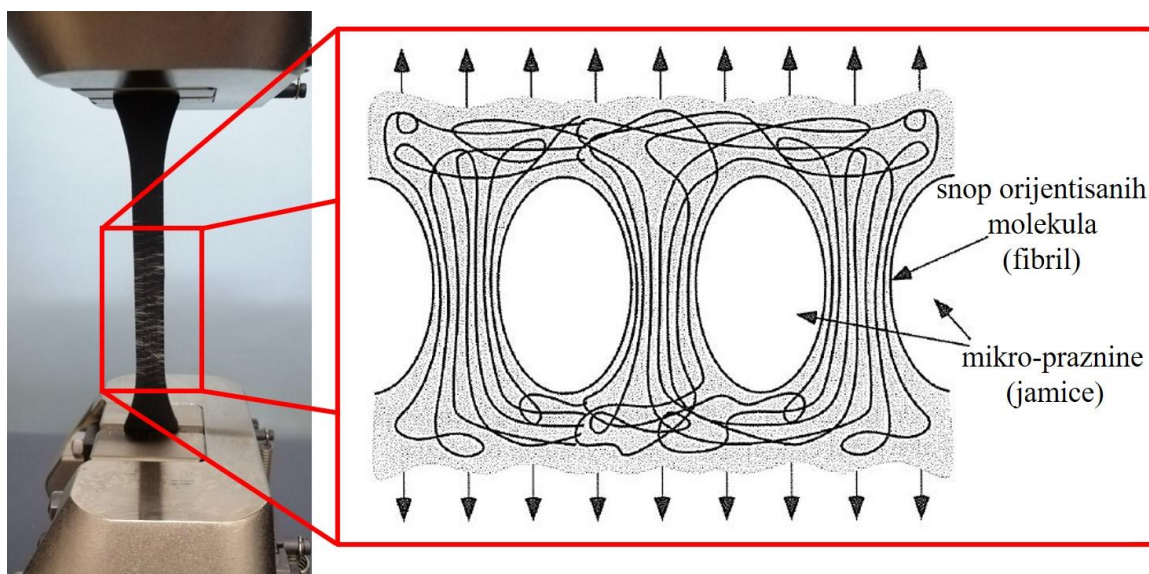
precizno uticati na brzinu i stepen kristalizacije, mehaničke osobine, kao i karakteristične temperaturne vrednosti polimera.

Udeo D-jedinica predstavlja važan parametar za podešavanje mehaničkih osobina PLA polimera, budući da njegovo povećanje može smanjiti brzinu kristalizacije i posledično sniziti temperaturu topljenja. Pored kontrole stereoheimijskog sastava, kristalnost PLA je moguće dodatno povećati primenom plastifikacije ili mešanjem sa drugim polimerima i aditivima [42-45].

Svi termoplasti, uključujući i PLA, osetljivi su na promenu radne temperature, pri čemu se posebno izdvajaju dve karakteristične temperaturne vrednosti:

- Temperatura staklastog prelaza (T_g): predstavlja gornju granicu primene amornog PLA u komercijalnim uslovima. Ispod temperature od približno 45 °C PLA se ponaša kao krut i krt, odnosno staklast materijal. Prekoračenjem T_g dolazi do prelaska polimera iz staklastog u gumasto, odnosno viskoelastično stanje, što za posledicu ima značajno smanjenje modula elastičnosti i nosivosti materijala. Za PLA se T_g najčešće nalazi u opsegu od približno 55 do 65 °C;
- Temperatura topljenja (T_m): predstavlja temperaturu pri kojoj dolazi do gubitka uređene kristalne strukture, odnosno prelaska polimera u stanje rastopa. Iznad ove temperature makromolekulski lanci postaju visoko pokretni, što dovodi do značajnog smanjenja mehaničkih osobina materijala. U tehnologiji aditivne proizvodnje primenom FDM tehnologije, grejni blok ekstrudera podešava se na vrednost iznad T_m , najčešće opseg od 190 do 230 °C, kako bi se smanjila viskoznost rastopa i omogućilo nesmetano istiskivanje i deponovanje materijala kroz mlaznicu. Za PLA se T_m najčešće nalazi u opsegu od približno 150 do 180 °C.

Mehanizam plastične deformacije polimera značajno se razlikuje od mehanizma plastične deformacije metala. Kod metala plastičnoj deformaciji prethodi kretanje dislokacija kroz ravni kristalne rešetke, dok kod polimera takav mehanizam ne postoji. Umesto toga, pri većim opterećenjima dolazi do grupisanja susednih, slično orijentisanih makromolekulskih lanaca u snopove, pri čemu se između njih formiraju mikro-praznine, odnosno jamice. Ova pojava naziva se krezing (*engl. crazing*) i termin je široko prihvaćen u domaćoj terminologiji. Mikrošupljine nastale usled krezinga golim okom se uočavaju kao bele linije upravne na pravac delovanja opterećenja, što je posledica rasipanja i prelamanja svetlosti na njihovim površinama [42,46]. Primer razvoja krezinga prikazan je na slici 1.8.



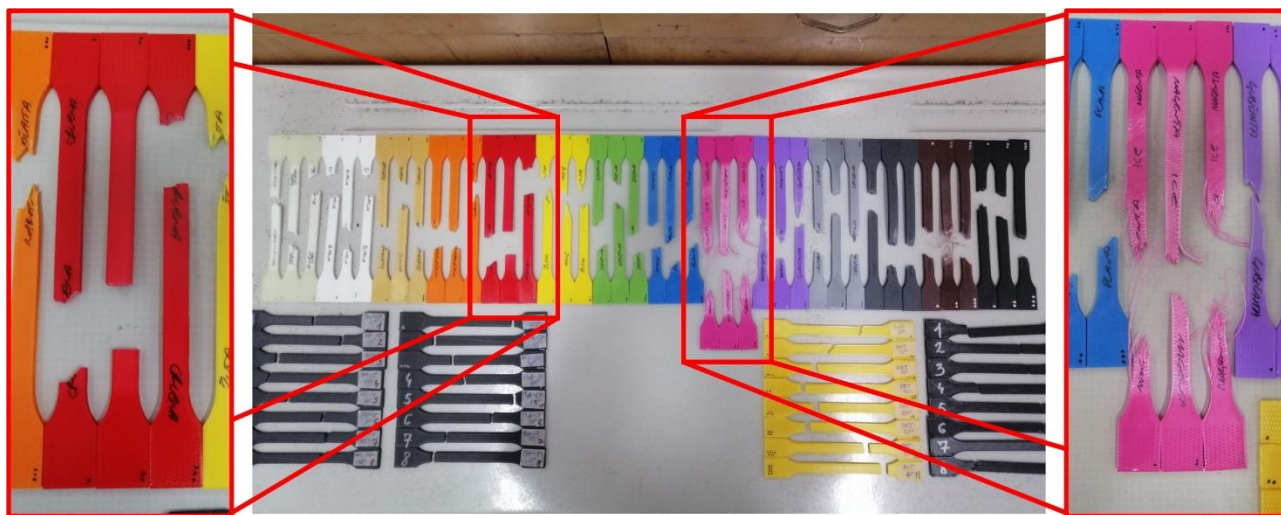
Slika 1.8 Krezing kod polimera: epruveta (levo); šematski prikaz krezinga (desno) [42,46].

Mehaničke osobine PLA polimera mogu značajno varirati, od relativno mekih materijala, preko elasto-plastičnih, do krutih materijala sa visokom čvrstoćom. U slučajevima kada se zahtevaju poboljšane mehaničke osobine, semikristalni PLA se uglavnom smatra povoljnijim u odnosu na amorfni oblik, zahvaljujući većoj krutosti i čvrstoći koje proizlaze iz prisustva uređenih kristalnih oblasti [16]. Raspon osnovnih mehaničkih osobina PLA polimera je dat u tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Raspon vrednosti odabranih mehaničkih osobina PLA polimera [16,47].

Mehaničke osobine	Opseg vrednosti
Gustina ρ [g/cm ³]	1.21 – 1.25
Zatezna čvrstoća σ_m [MPa]	21 – 60
Modul elastičnosti E [GPa]	0.35 – 3.5
Maksimalna deformacija ε_{max} [%]	2.5 – 6
Savojna čvrstoća σ_s [MPa]	100 – 120
Savojni modul E_f [GPa]	3.0 – 3.5

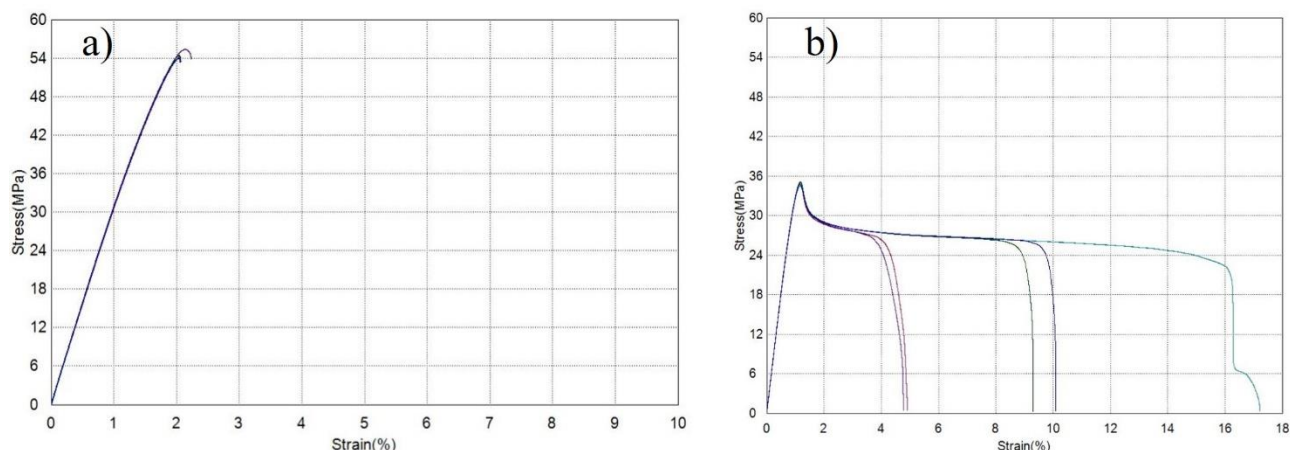
Izuzev parametara aditivne proizvodnje u FDM tehnologiji, uočeno je da i male promene u sastavu materijala mogu značajno uticati na njegove mehaničke osobine. Tako je u istraživanju [48] ispitivan na zatezanje isti komercijalni PLA materijal različitih boja (ukupno 14). Rezultati su pokazali značajne razlike u mehaničkim osobinama, pri čemu se zatezna čvrstoća (σ_m) kretala u rasponu od 35 do 46 MPa, modul elastičnosti E od oko 2.7 do 3.4 GPa, dok je maksimalna deformacija pri lomu (ε_{max}) varirala od 7 do čak 108%. Krajnje vrednosti ovih raspona dosledno su odgovarale crvenim i pink (magenta) uzorcima. Pored razlika u mehaničkim osobinama, i izgled epruveta nakon loma ukazivao je na različite mehanizme loma. Crveni uzorci ispoljili su pretežno krto ponašanje, bez vidljivog krezinga, dok su pink uzorci pokazivali izraženu plastičnu deformaciju pre loma [48,49]. Navedene razlike pripisuju se sastavu i karakteristikama pigmenta, odnosno punioca, koji utiču na mikrostrukturu materijala i mehanizme deformacije, uključujući nastanak i razvoj krezinga, što se može odraziti na povećanu sposobnost plastične deformacije i duktilnost PLA delova [42].



Slika 1.9 Izgled epruveta nakon ispitivanja zatezanjem: crvene epruvete (ukupno 3) – krto lom (levo); pink/magenta epruvete (ukupno 3) – duktilan lom [48].

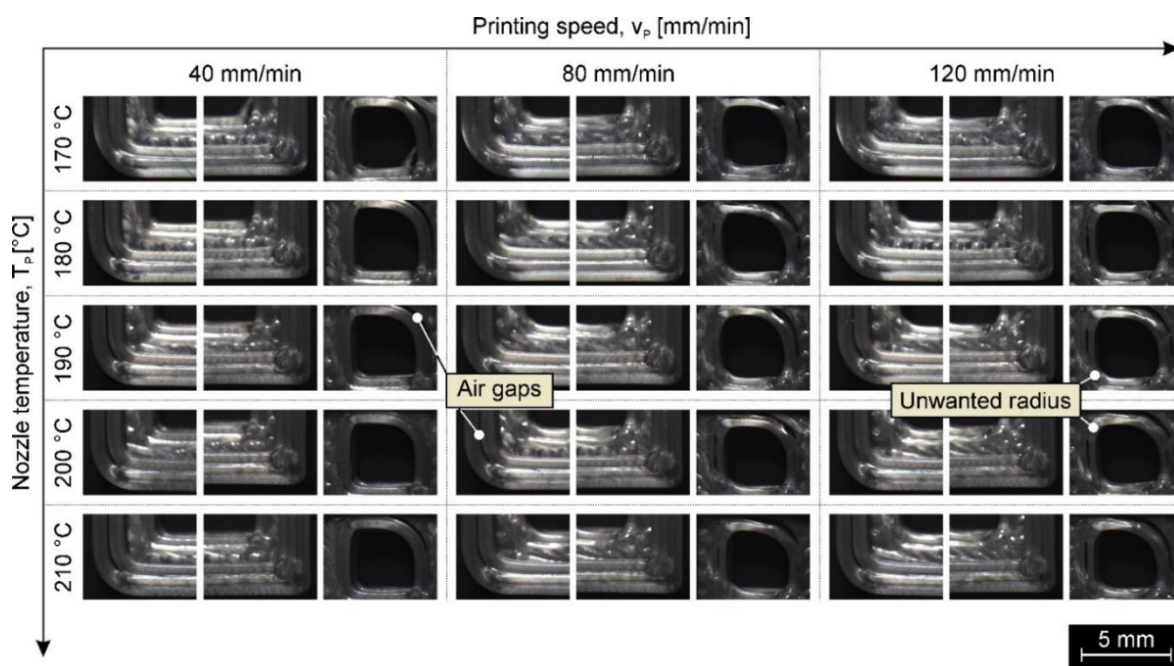
Sličan efekat onom opisanom u radu [42] postignut je uvođenjem sekundarnih čestica (punioca) u matricu komercijalnog PLA-X polimera (proizvođača Mitsubishi Chemical, Japan) [11,46]. Poređenjem sa čistim PLA materijalom istog proizvođača, uočeno je da se dodatkom ovih čestica pretežno krto PLA transformiše u materijal sa izraženu plastičnu deformacijom pre loma. Ova promena mehanizma deformisanja rezultirala je značajnim povećanjem maksimalne deformacije (ε_{max}), ali uz istovremeno smanjenje zatezne čvrstoće (σ_m), što je jasno prikazano na

dijagramima na slici 1.10. Dodatno, u radu je izvršena komparacija deformacionog rada, odnosno površine ispod krive sila-pomeranje normalizovane po zapremini uzorka i izražene u $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$, čime je kvantitativno potvrđeno povećanje žilavosti modifikovanog materijala.



Slika 1.10 Dijagrami inženjerski napon-inženjerska deformacija za: a) čist PLA polimer; b) kopolimer pod komercijalnim nazivom PLA-X [46].

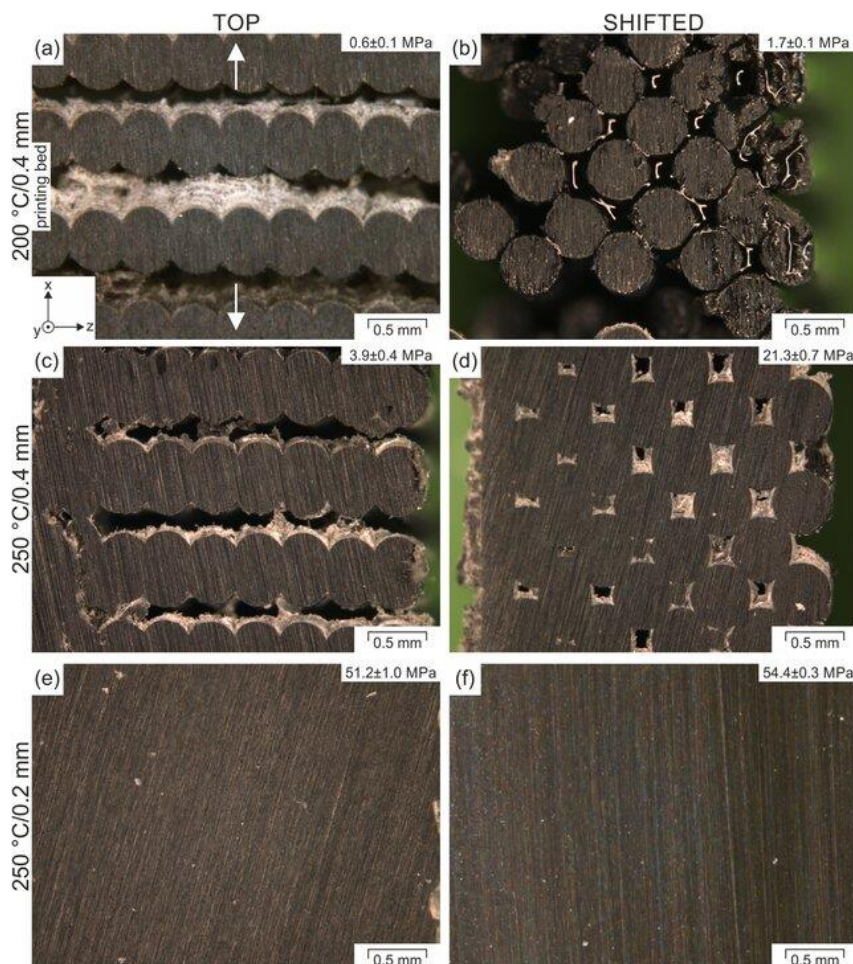
Jedan od ključnih nedostataka FDM aditivne tehnologije jeste pojava vazdušnih šupljina (*engl. air gaps*) između susednih slojeva, kao i između pojedinačnih deponovanih niti unutar istog sloja. Iako su ovi defekti gotovo inherentni za ovaj proces proizvodnje, neadekvatan izbor parametara, pre svega neprilagođeno visoka brzina kretanja mlaznice i nedovoljan protok materijala usled niske temperature ekstruzije utiču na slabiju adheziju između niti i slojeva. Takođe, tokom promene pravca kretanja mlaznice ovaj efekat je izraženiji (slika 1.11) [8].



Slika 1.11 Optička mikroskopija izrađenog dela sa prikazom uticaja temperature ekstruzije i brzine mlaznice [8].

Pri analizi uticaja pojedinačnih parametara aditivne proizvodnje potrebno je uzeti u obzir njihovu međusobnu zavisnost, odnosno činjenicu da efekat jednog parametra često zavisi od vrednosti drugih parametara. Recimo, pri višim temperaturama ekstruzije dolazi do smanjenja viskoznosti deponovanog polimera, zbog čega promena brzine kretanja mlaznice može direktno uticati na smanjenu adheziju između slojeva i niti [8].

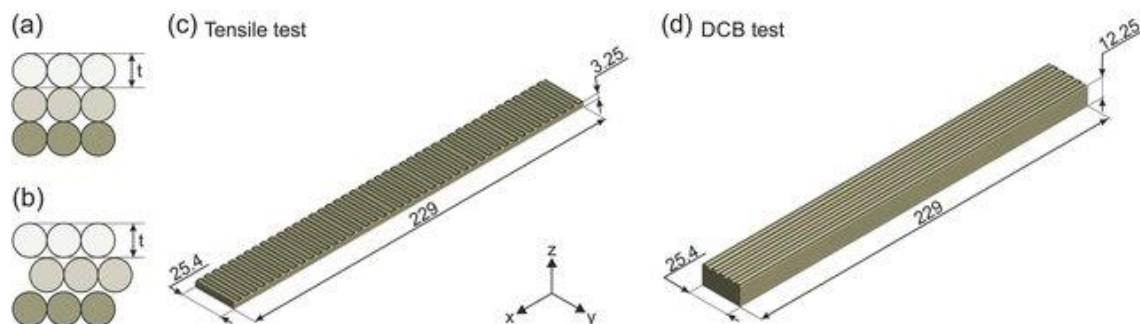
Povećanjem visine sloja očekuje se i povećanje udela vazdušnih šupljina, čime se naglašava važnost korišćenja manjih visina sloja, ali uz važnu napomenu da je potrebno izbeći prekomernu kompresiju slojeva, koja može negativno uticati na mehaničke osobine i geometrijsku tačnost izrađenih delova. Zatim, veće temperature ekstruzije pospešuju povoljnu fuziju između slojeva i niti. U istraživanju [50], sa 250 °C je postignuta gotovo idealno homogena struktura na visini sloja od 0.2 mm (slika 1.12). Iz iskustva autora, temperature ekstruzije takve visine pri procesima izrade dela koji traju više sati neminovno dovode do zaglavlivanja filameta iznad grejnog bloka, čime je sprečen dalji rad uređaja.



Slika 1.12 Poprečni presek šest različitih kombinacija parametara aditivne proizvodnje sa prikazanim homogenim strukturama kod donje dve sličice pri ekstruziji od 250 °C [50].

Rad [50] sadrži još dva interesantna zapažanja, prikazana na slici 1.13. Naime, manipulacijom redosleda deponovanja niti može se poboljšati adhezija između slojeva, tako što se sukcesivni sloj blago pomera u odnosu na prethodni. Na taj način ovalni poprečni presek deponovane niti efikasnije ispunjava prostor koji bi u suprotnom ostao vazдушna šupljina. Pored toga, način deponovanja niti može doprineti poboljšanju mehaničkih osobina izrađenog dela. Kraće putanje mlaznice (slika 1.13, levo) omogućavaju brže prekrivanje prethodno deponovanog sloja dok je on još uvek zagrejan. Time se smanjuje odvođenje toplote neophodne za ostvarivanje kvalitetne fuzije između susednih slojeva i niti. Način kretanja mlaznice pri deponovanju sloja materijala definiše se parametrom poznatim kao ugao rastera. U primeru prikazanom u radu [50] (slika 1.13) razmatrani su raster uglovi 0° i 90°.

Pored ugla rastera, ranija istraživanja [49,51-53] razmatrala su i uticaj prostorne orijentacije dela na radnoj platformi. Međutim, u slučaju epruveta za mehanička ispitivanja nameće se logičan zaključak da ih treba orijentisati tako da njihova najveća ravna površina bude oslonjena na radnu platformu, kao što je prikazano na slikama 1.2 i 1.13, a potvrđeno i u radu [54].



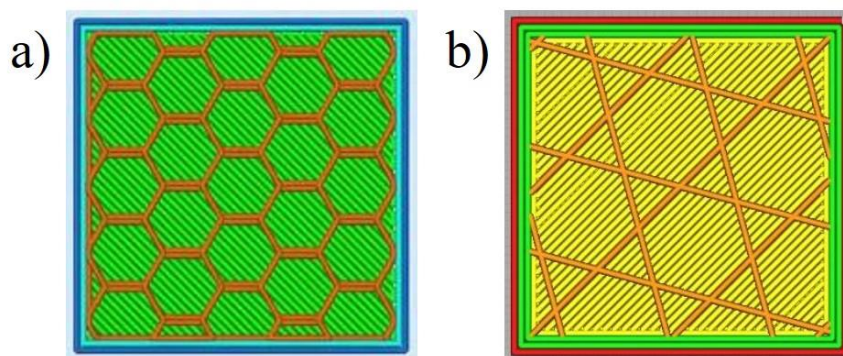
Slika 1.13 Prikaz mogućnosti manipulacije redosleda niti i načina deponovanja sloja [50].

Nasuprot povoljnim rezultatima usled veće temperature ekstruzije i male brzine kretanja mlaznice, suprotni parametri (170 °C; 120 mm/min) rezultuju najnepovoljnijim mehaničkim osobinama u [8]. U istraživanju je zaključeno da je najbolji opseg temperatura ekstruzije u rasponu 190 – 210 °C pri brzini kretanja mlaznice od 40 mm/s. Pri donošenju ovog zaključka uzeta je u obzir i retko razmatrana mehanička osobina koja je u [55] dokazana kao izrazito najosetljivija na promenu parametara aditivne proizvodnje – krutost.

Iako više temperature ekstruzije doprinose poboljšanju mehaničkih osobina, ne treba zanemariti njihov uticaj na geometrijsku tačnost izrađenog dela, a koja se postiže u rasponu temperatura ekstruzije od 170 do 190 °C. Sve vrednosti iznad ovog opsega dovode do primetne deformacije izrađenih delova. Na osnovu prethodno navedenih tvrdnji može se zaključiti da temperatura ekstruzije od 200 °C predstavlja optimalan kompromis između postizanja povoljnih mehaničkih osobina i očuvanja geometrijske tačnosti delova izrađenih od PLA polimera.

Jedna od najznačajnijih prednosti aditivne proizvodnje jeste mogućnost upravljanja unutrašnjom strukturom izrađivanog dela, pri čemu se mogu precizno kontrolisati kako obrazac deponovanja materijala, tako i sam stepen ispunjenosti unutrašnjosti. U istraživanju [3] analizirano je 13 različitih obrazaca unutrašnje strukture pri gustinama ispune u rasponu od 10 do 90%. Kod većine ispitivanih konfiguracija uočen je progresivan porast mehaničkih osobina sa povećanjem udela materijala, dok kod pojedinih geometrija ova zavisnost nije bila jednako izražena.

Epruvete za ispitivanja zatezanjem pripremljene su primenom softvera za slajsovanje UltiMaker Cura (Ultimaker B.V., Holandija). Prilikom poređenja generisanih geometrija uočeno je da trostrukom heksagonalnom obrascu (*Tri-hexagon*) iz softvera Cura konceptijski i strukturno najviše odgovara sačasti obrazac (*Hexagonal*) iz licenciranog softvera Simplify3D (Simplify3D, Sinsinati, SAD), što je prikazano na slici 1.14. Treba istaći da se sačasta struktura ispune dobro pokazala u pogledu mehaničkih osobina u više funkcionalnih primena [21,56].



Slika 1.14 Uporedni prikaz dve srodne unutrašnje strukture ispune: a) heksagonalna (saće); b) trostruka heksagonalna (*Tri-hexagon*) [57].

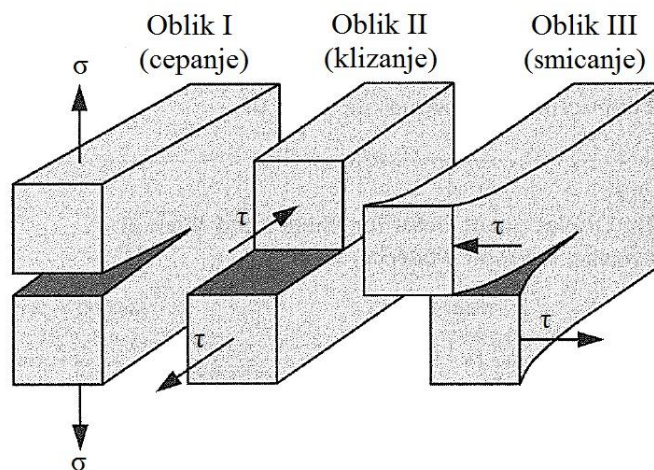
1.3. Mehanika loma u kontekstu aditivno proizvedenih struktura od PLA polimera

Od postavljanja prvih teorijskih postavki početkom XX veka do danas, mehanika loma se razvila u ključnu naučnu disciplinu za analizu uticaja prslina i drugih defekata na ponašanje materijala i konstrukcija, prateći čitav proces od inicijacije i propagacije prsline do konačnog loma. Razvoj mehanike loma započinje radovima Inglisa (Inglis) o koncentraciji napona, koji su poslužili kao osnova za Grifitov (Griffith) energetski kriterijum nestabilnog rasta prsline. Grifit je pokazao da do propagacije prsline u materijalu dolazi kada brzina oslobađanja energije dostigne kritičnu vrednost, koja predstavlja meru otpornosti materijala prema (nestabilnom) rastu prsline.

Sredinom veka, Irvin (Irwin) postavlja temelje linearno elastične mehanike loma (LEML) uvođenjem faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti, čime je analiza usmerena na lokalno naponsko polje u neposrednoj okolini vrha prsline. Dalji razvoj mehanike loma obuhvatio je proširenje na elasto-plastičnu mehaniku loma (EPML) kroz analizu plastične zone ispred vrha prsline i uvođenje dva ključna parametra: otvaranja vrha prsline (CTOD, *engl. Crack Tip Opening Displacement*), za koji je zaslužan Vels (Wells), i J-integrala, koji je uveo Rajs (Rice). Pored statičkih opterećenja, mehanika loma je značajno proširena i na analizu dinamičkih fenomena, pre svega zamornog rasta prsline [42,58].

Pri definisanju faktora intenziteta napona razlikuju se tri osnovna vida ovog parametra, u zavisnosti od načina pomeranja površina prsline usled različitih naponskih stanja (slika 1.15), odnosno primenjenih opterećenja, i to na:

- Oblik I (Mod I) – simetrično otvaranje površina prsline usled dejstva normalnog napona (σ);
- Oblik II (Mod II) – klizanje površina prsline u jednoj ravni usled dejstva napona smicanja (τ);
- Oblik III (Mod III) – smicanje površina prsline u međusobno različitim ravnima usled dejstva napona smicanja (τ).



Slika 1.15 Tri osnovna oblika razvoja prsline prema Orovanu [42,59].

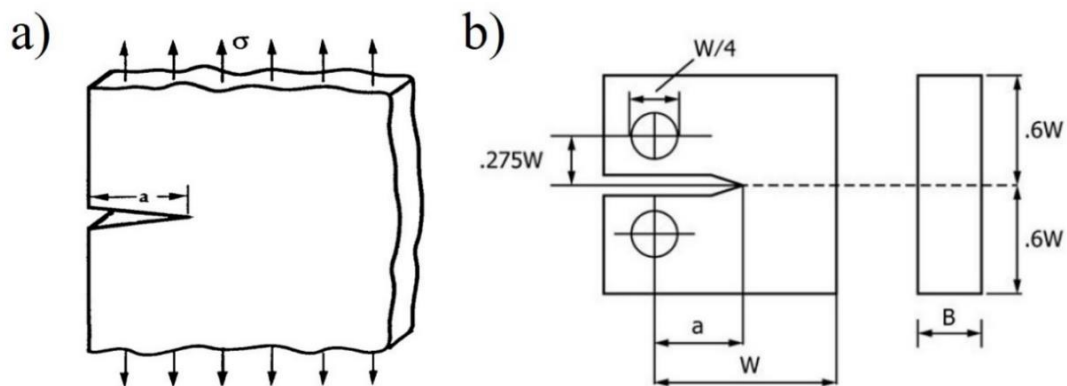
Najopasniji lomovi nastaju pri opterećenju u obliku I, odnosno pri takozvanom cepanju. Sledeći po značaju je oblik II, a zatim oblik III. Pod pretpostavkom da je materijal linearno-elastičan i izotropan, faktor intenziteta napona K_I može se u svom najjednostavnijem obliku izraziti kao (1.1):

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.1)$$

Pri čemu je a karakteristična dužina (ili poludužina) prsline, a Y geometrijski faktor koji opisuje uticaj geometrije tela i konfiguracije prsline. Faktor intenziteta napona K_I predstavlja osnovni parametar LEML-a, jer objedinjuje uticaj nominalnog napona, geometrije tela i dužine prsline, te

definiše raspodelu napona, deformacija i pomeranja oko vrha prsline. Njegova dimenzija je $\text{napon} \cdot (\text{dužina})^{1/2}$ [42,58].

Za slučaj kada su dimenzije tela znatno veće od dužine prsline, u literaturi se često koristi idealizacija poznata kao „telo beskonačnih dimenzija”. Primer tela beskonačnih dimenzija sa ivičnom prslineom prikazan je na slici 1.16a. U tom slučaju geometrijski faktor Y zavisi samo od vrste i položaja prsline i usvaja se kao konstanta. Kod tela konačnih dimenzija, što je najčešći slučaj u realnim inženjerskim problemima, geometrijski faktor Y dodatno zavisi od odnosa dužine prsline a i merodavne dimenzije tela, najčešće širine W (a/W). Ova zavisnost se najčešće opisuje polinomskom funkcijom. Primer tela konačnih dimenzija, analognog telu sa ivičnom prslineom, prikazan je na slici 1.16b ($C(T)$ epruveta). Vredi istaći da je predmet ove disertacije eksperimentalno i numeričko istraživanje uticaja upravo ivične prsline na mehaničko ponašanje ortopedске pločice, aditivno proizvedene od PLA polimera [58].



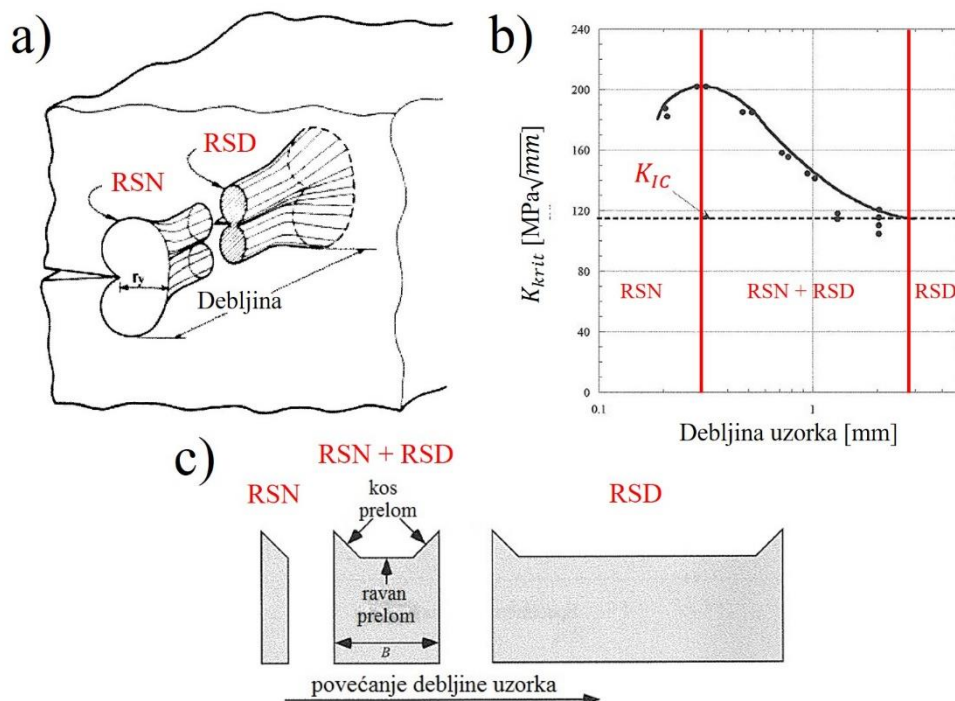
Slika 1.16 Uporedni prikaz: a) telo beskonačnih dimenzija sa ivičnom prslineom; b) analogno telo konačnih dimenzija – $C(T)$ epruveta [58,60].

Faktor intenziteta napona K_I predstavlja silu rasta prsline u telu, a njegova kritična vrednost je osobina materijala i naziva se žilavost loma (K_{IC}). Samo u uslovima ravnog stanja deformacije (RSD) ova vrednost je jednoznačno definisana. Naime, ispred vrha prsline postoje oblasti ravnog stanja napona (RSN) i ravnog stanja deformacije (RSD). Oblasti RSN nalaze se na površini tela (uzorka), dok je u unutrašnjosti dominantno RSD (slika 1.17a).

Odnos RSN i RSD zavisi od debljine tela (uzorka) kroz koje prsline propagira. Na osnovu ove zavisnosti mogu se izdvojiti tri karakteristična slučaja:

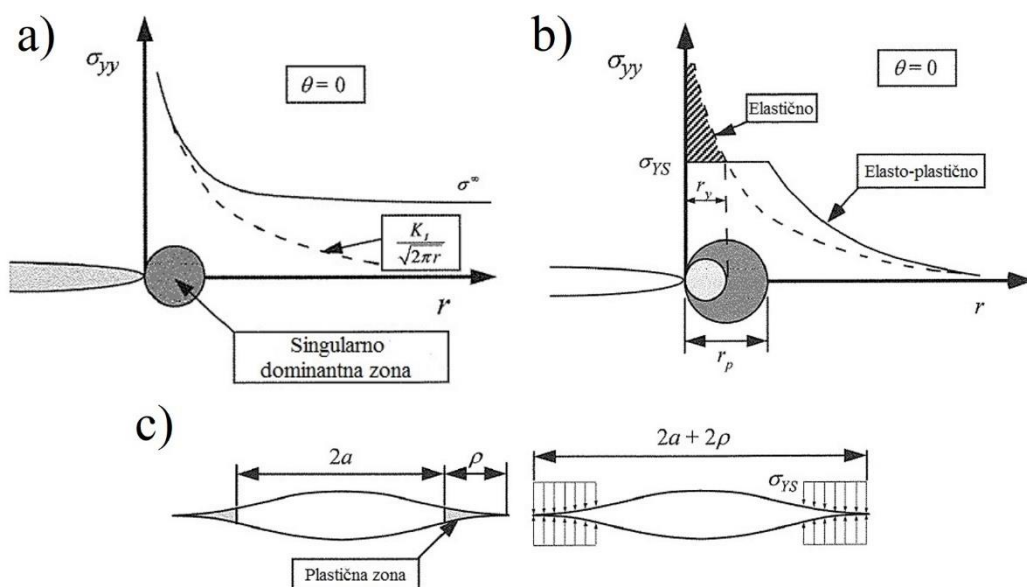
- Male debljine tela (uzorka): RSN je dominantno u odnosu na RSD. U ovom slučaju, na prelomnoj površini biće uočljiv kosi prelom, a sa povećanjem debljine raste i kritična vrednost faktora intenziteta napona (K_{krit});
- Srednje debljine tela (uzorka): Prisutan je uticaj RSN na bočnim površinama i RSD u unutrašnjosti. Prelom je delimično ravan, dok su krajevi preloma kosi. K_{krit} u ovom slučaju počinje da opada sa povećanjem debljine tela (uzorka);
- Velike debljine tela (uzorka): RSD je dominantno stanje, vrednost K_{krit} postaje konstantna i dostiže vrednost žilavosti loma K_{IC} , na koju više ne utiče dalje povećanje debljine. Prelomna površina je gotovo ravna.

Značaj uspostavljanja dominantnog RSD ogleda se u tome što plastične deformacije u oblasti oko vrha prsline postaju približno ravnomerno raspoređene duž celog preseka, budući da izostaje nagli prelaz iz RSN u RSD. U takvim uslovima plastična deformacija ostaje ograničena na neposrednu okolinu vrha prsline, tako da se njeno ponašanje može sa dovoljnom tačnošću opisati primenom LEML, uz dominantan udeo ravnog preloma. Tada kritična vrednost faktora intenziteta napona K_{krit} postaje parametar koji karakteriše osobinu materijala – žilavost loma (K_{IC}). Na slici 1.17b dat je grafički prikaz kritičnih vrednosti K_{krit} u zavisnosti od debljine tela (uzorka), dok je na slici 1.17c dat pojednostavljeni prikaz izgleda prelomnih površina za ova tri karakteristična slučaja [42,58].



Slika 1.17 Prikaz: a) plastične oblasti ispred vrha prsline; b) zavisnost vrednosti K_{krit} od debljine uzorka; c) uticaj debljine uzorka na udeo ravnog preloma [42,58,59].

Dakle, faktor intenziteta napona K_I veoma dobro opisuje raspodelu napona u okolini vrha prsline kada su plastične deformacije relativno male. U tim uslovima ovaj parametar predstavlja amplitudu naponskog singulariteta $1/\sqrt{r}$ (slika 1.18a). Prvi pokušaji opisivanja relativno veće plastične zone oko vrha prsline zasnivali su se na proširenjima LEM-a, među kojima su najpoznatiji Irvinova korekcija poluprečnika plastične zone (slika 1.18b) i Dagejlov model trake popuštanja (slika 1.18c). Međutim, i u tim slučajevima plastično deformisana zona mora ostati unutar oblasti u kojoj dominira naponski singularitet. Ukoliko plastična zona postane prevelika, raspodela napona više se ne može opisati singularnim naponskim poljem, te faktor intenziteta napona K_I , kao ni njegovi korigovani oblici, više nisu validni parametri za opisivanje naponskog stanja u okolini vrha prsline [42,58].

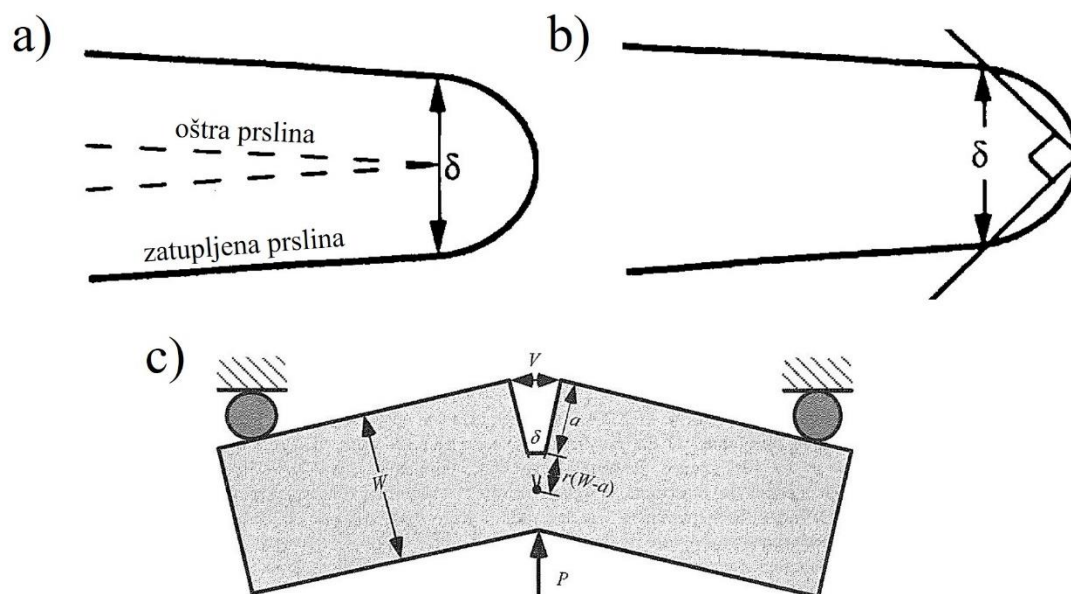


Slika 1.18 Prikaz: a) singularno dominantne zone oko vrha prsline; b) Irvinove korekcije poluprečnika plastične zone r_p ; c) procene plastične zone Dagejlljevom trakom popuštanja [42,59].

Za razliku od LEML-a, elasto-plastična mehanika loma (EPML) koristi parametre koji ostaju validni i u uslovima izraženih plastičnih deformacija, pri čemu su najznačajniji parametri otvaranje vrha prsline (CTOD) i J-integral. Sam koncept otvaranja vrha prsline (CTOD) nastao je na osnovu zapažanja Velsa (Wells) da plastična deformacija kod žilavih konstrukcionih čelika dovodi do zatupljenja vrha prsline (slika 1.19a), pri čemu veličina tog zatupljenja direktno odgovara žilavosti materijala, kao i da konačnom lomu prethodi odvajanje površina prsline. Pored toga, u slučaju malih plastičnih deformacija postoje analitičke relacije između CTOD-a i K_I , što dodatno potvrđuje primenljivost ovog parametra za karakterizaciju otpornosti materijala na lom. Kasnije su uspostavljene i relacije između CTOD-a i J-integrala, čime je dodatno potvrđena primena ovog parametra u okviru EPML-a.

Pored klasične definicije CTOD-a, u literaturi se sreću i alternativne definicije ovog parametra. Jedna od njih zasniva se na geometrijskoj aproksimaciji, pri kojoj se otvaranje vrha prsline određuje na mestu preseka sa linijama koje zaklapaju pravi ugao sa konturom zatupljenog vrha prsline (slika 1.19b). Druga značajna alternativa jeste Švalbeova definicija δ_5 , koja predstavlja parametar određen u neposrednoj blizini vrha prsline. Iako ova metoda u izmerenu vrednost uključuje i deo plastične deformacije okolnog materijala, ostvarila je široku primenu u praksi zahvaljujući jednostavnosti određivanja i visokoj pouzdanosti procene žilavosti materijala.

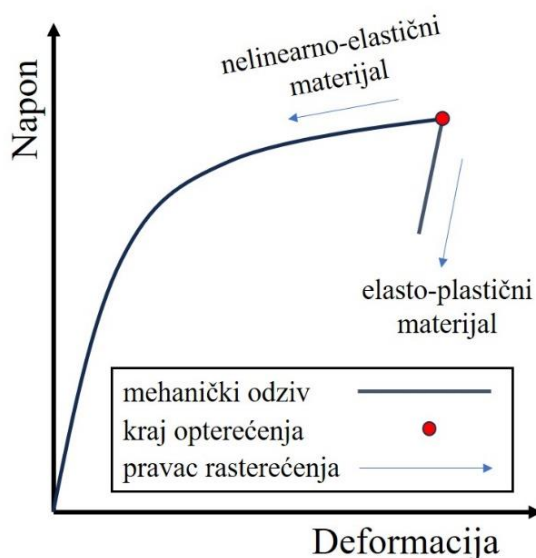
Pre šire primene savremenih optičkih metoda beskontaktnog merenja deformacija korelacijom digitalnih slika – DIC (*engl. Digital Image Correlation*), direktno merenje otvaranja vrha prsline bilo je praćeno brojnim eksperimentalnim poteškoćama. Rani pokušaji merenja pomoću kontaktnih mehaničkih senzora često su bili neuspešni zbog njihovog uticaja na samo otvaranje prsline ili usled nemogućnosti razdvajanja lokalnog otvaranja vrha prsline od šire plastične deformacije okolnog materijala. Iz tih razloga, kao standardni pristup prihvaćeno je merenje otvaranja na vrhu zareza epruvete – CMOD (*engl. Crack Mouth Opening Displacement*), nakon čega se CTOD procenjivao analitičkim putem. Analitičko prevođenje CMOD-a u CTOD prvobitno se zasnivalo na pretpostavci o krutom ponašanju materijala i primeni metoda šarke, pri čemu se vrednost CTOD-a određivala na osnovu proporcionalnosti sličnih trouglova (slika 1.19c). Radi povećanja tačnosti, ovaj metod je kasnije modifikovan razdvajanjem ukupnog otvaranja na elastičnu i plastičnu komponentu [42,58]. U savremenim istraživanjima, analiza odnosa CMOD i CTOD i dalje ima značajnu ulogu u detaljnom procenjivanju mehaničkog ponašanja i otpornosti materijala na rast prsline [61].



Slika 1.19 Prikaz: a) otvaranja vrha prsline CTOD (δ); b) alternativna definicija CTOD-a (δ); c) određivanja CTOD-a (δ) primenom analitičkih relacija na osnovu CMOD-a (V) [42,58].

Uprkos činjenici da je CTOD široko prihvaćen kao jedan od ključnih parametara elasto-plastične mehanike loma, njegova teorijska osnova nije dovoljno razvijena. Pravi proboj u razvoju elasto-plastične mehanike loma ostvario je Rajs (Rice), koji je nezavisno od prethodnih autora (posebno G.Čerepanova), formulisao J integral, prvi prepoznao njegov značaj i razvio analitički i eksperimentalni postupak za njegovo određivanje [58,62,63].

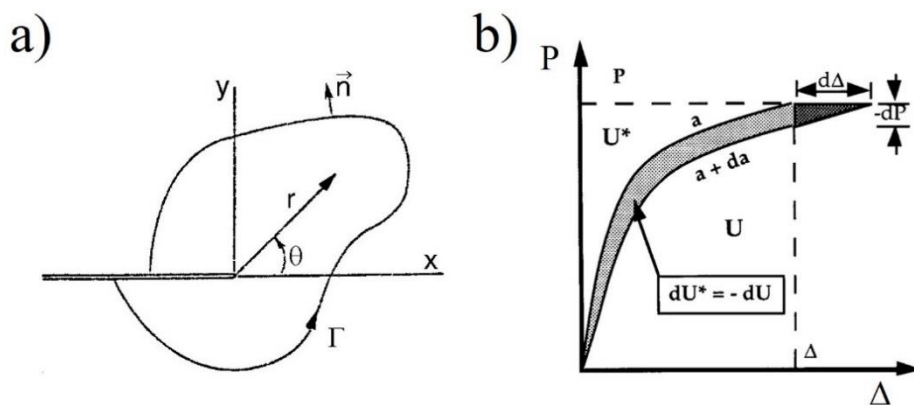
Polazeći od idealizacije elasto-plastičnog materijala kao nelinearno-elastičnog, Rajs je postavio teorijske temelje za proširenje mehanike loma izvan okvira LEML. Ovakav pristup zasniva se na deformacionoj teoriji plastičnosti, prema kojoj se pri monotonom opterećenju ponašanje elasto-plastičnog materijala može aprkosimirati ponašanjem nelinearno-elastičnog materijala. Naime, dijagram napon-deformacija pri opterećivanju je identičan za oba tipa materijala, dok se razlika javlja tek pri rasterećenju (slika 1.20). Elasto-plastični materijal prati približno linearnu putanju rasterećenja sa nagibom jednakim modulu elastičnosti, dok se nelinearno-elastični materijal rasterećuje duž iste putanje kojom je prethodno bio opterećen. Zbog toga je pri ispitivanjima zasnovanim na određivanju J integrala važno obezbediti monotono opterećenje, bez pojave efekata rasterećenja koji bi doveli do odstupanja od pretpostavki deformacione teorije plastičnosti [42].



Slika 1.20 Idealizovana kriva napon-deformacija pri opterećenju sa prikazom pravaca rasterećenja za nelinearno-elastični i elasto-plastični materijal [42].

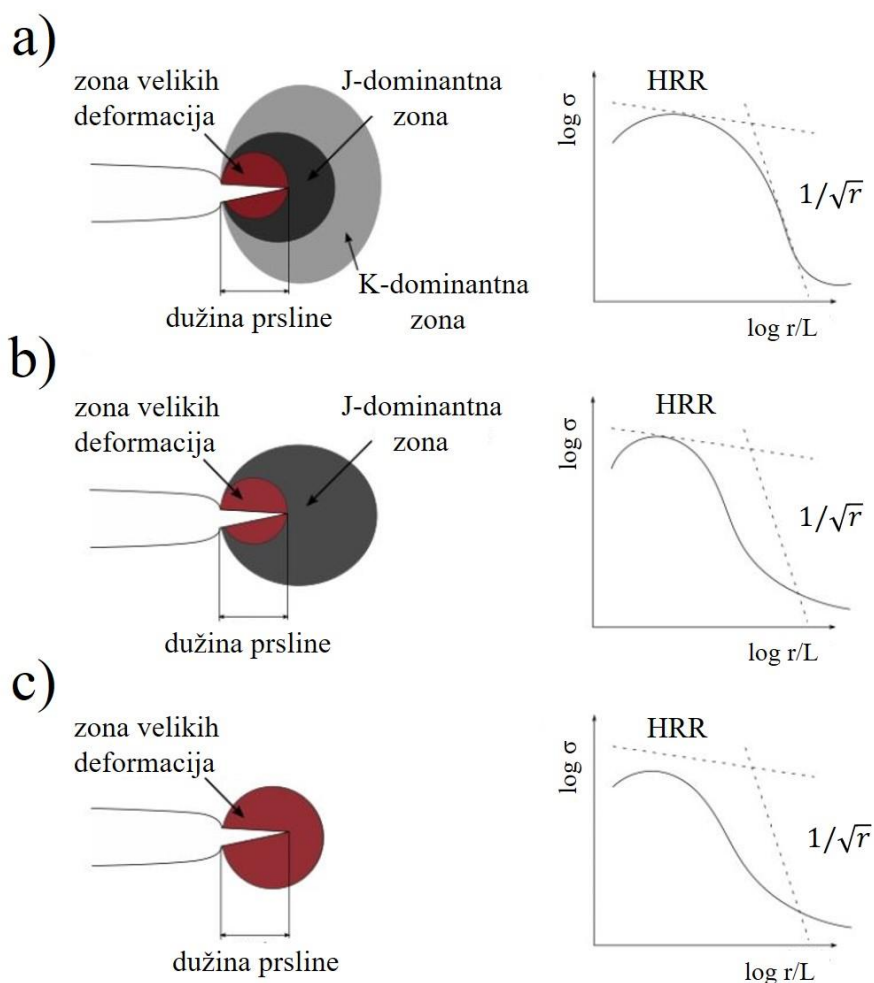
Jedinstvenost J integrala u mehanici loma ogleda se u njegovom značaju kao energetskog parametra, ali i kao lokalnog parametra koji opisuje naponsko i deformaciono stanje u okolini vrha prsline kod elasto-plastičnih materijala. Kao lokalni parametar, Rajs je definisao linijski integral koji okružuje vrh prsline zatvorenom konturom (slika 1.21a), pri čemu je njegova vrednost nezavisna od izbora integracione konture za 2D probleme [42,58]. Međutim, pri ispitivanjima polimera neophodno je održavati radnu temperaturu konstantnom zbog njihove osetljivosti mehaničkog odziva na uticaj toplote. Promenom temperature narušava se pretpostavka o jedinstvenom potencijalu deformacione energije, čime J integral gubi nezavisnost od integracione konture [62,64].

Za razliku od linearno-elastičnih materijala, kod elasto-plastičnih materijala značajan deo deformacione energije utroši se na razvoj plastične deformacije i ne oslobađa se tokom propagacije prsline. Zbog toga se energetski kriterijum kod elasto-plastičnih materijala razlikuje od odgovarajuće interpretacije u LEML (misli se na brzinu oslobađanja energije). Energetski kriterijum EPML zasniva J integral na razlici potencijalnih energija između dva susedna stanja sa neznatno različitim dužinama prsline (slika 1.21b) i predstavlja meru energije povezane sa njenim rastom [42].



Slika 1.21 Prikaz: a) putanje integracije oko vrha prsline za J integral; b) potrebne potencijalne energije za inkrementalni rast prsline da [58].

Za interpretaciju J integrala kao lokalnog kriterijuma, odnosno parametra koji jednoznačno određuje naponsko i deformaciono polje u okolini vrha prsline kod nelinearno-elastičnih materijala, ključni doprinos dali su Hačkinson (Hutchinson), Rajs (Rice) i Rozengrin (Rosengren) razvojem HRR polja, koji se zasniva na konstitutivnom opisu materijala pomoću Ramberg-Osgoodove relacije. Detaljniji prikaz ove relacije i njena primena biće razmatrani u narednim poglavljima. Dakle, J integral predstavlja parametar koji određuje amplitudu HRR polja u okolini vrha prsline kod nelinearno-elastičnih materijala, analogno ulozi K_I u LEML (slika 1.22) [42,58,62].



Slika 1.22 Prikaz naponskih stanja oko vrha prsline za slučaj: a) ograničenog tečenja; b) elasto-plastičnih uslova; c) opsežnog tečenja [42,64].

U uslovima ograničenog tečenja (*engl. Small Scale Yielding – SSY*) izdvajaju se dve oblasti dominantnog ponašanja (slika 1.22a). U oblasti izvan plastične zone prisutno je linearno-elastično singularno polje $1/\sqrt{r}$, čiju amplitudu opisuje K_I (odnosno uz pomoć LEML). U neposrednoj okolini vrha prsline dominira HRR polje, čiju amplitudu određuje J integral. Razvojem plastične zone dolazi do potiskivanja linearno-elastično singularnog polja $1/\sqrt{r}$ iz okoline vrha prsline, usled čega J integral postaje odgovarajući parametar za opisivanje ponašanja materijala pri elasto-plastičnom lomu (slika 1.22b). Ograničenje primene HRR polja, odnosno J integrala, ogleda se u činjenici da njihova formulacija ne uzima u obzir velike deformacije koje mogu imati značajan uticaj na ponašanje materijala u okolini vrha prsline (slika 1.22c) [42,64]. Eksperimentalna iskustva pokazuju da HRR polje daje zadovoljavajuće rezultate samo do približno 10% deformacije [58]. Recimo, pri konstrukciji J - R krivih porast prsline ograničava se na 10% dužine ligamenta uzorka (eprovete), dok se vrednosti iznad ove granice ne uzimaju u obzir [65].

Kao dodatak slici 1.22, prikazane su i logaritamске zavisnosti napona od rastojanja od vrha prsline (r/L), koja ilustruje karakter singularnog naponskog polja u okolini vrha prsline za ova tri navedena slučaja [42,64].

Kao i faktor intenziteta napona K , i J integral zavisi od načina pomeranja površina prsline, te se definiše za sva tri oblika opterećenja. Najveća pažnja posvećuje se obliku I (J_I), jer opisuje otvaranje prsline koje je povezano sa najopasnijim oblikom loma (slika 1.15). Dalje, kritična vrednost J integrala za oblik I označava se kao J_{IC} .

Najčešće eksperimentalne metode za određivanje kritične vrednosti J integrala (J_{IC}) razlikuju se prvenstveno po broju uzoraka potrebnih za konstrukciju krivih na osnovu kojih se određuje vrednost J_{IC} i dele se na:

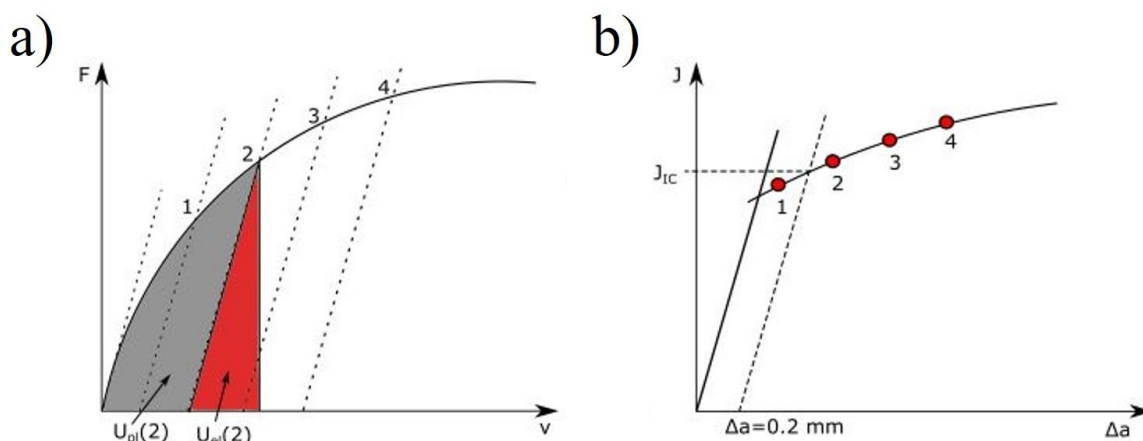
- Metodu sa više uzoraka (*engl. multi-specimen method*);
- Metodu sa jednim uzorkom (*engl. single-specimen method*).

Metoda sa više uzoraka predstavljena je na sastanku ESIS TC4 (*engl. European Structural Integrity Society Technical Committee 4*), posvećenom temi „Polimeri i polimerni kompoziti”. Metoda se zasniva na višestrukim ispitivanjima uzoraka sa sukcesivnim povećanjem konačnog pomeranja. Cilj je da se na svakom uzorku odredi dužina propagacije prsline, pri čemu najveći izazov predstavlja obezbeđivanje da svaki naredni uzorak ima što sličniji mehanički odziv prethodnom [64].

Za svaki uzorak analitički se određuje vrednost J integrala na osnovu dostignute potencijalne energije (slika 1.23a), dok se dužina propagirane prsline procenjuje na prelomnoj površini uzorka. U tu svrhu uzorak se prethodno hladi u tečnom azotu, a zatim lomi udarcem čekića. Na taj način omogućava se jasno razlikovanje dela prelomne površine nastalog propagacijom prsline pri radnoj temperaturi od dela nastalog usled trenutnog loma u kriogenim uslovima.

Jedan ispitani uzorak time predstavlja jednu tačku pri konstrukciji J - R krive (slika 1.23b). J - R kriva predstavlja krivu otpornosti materijala na stabilni rast prsline, budući da celokupan opseg dobijenih vrednosti obuhvata isključivo stabilan rast prsline, od njenog početka do samog kraja. Radi konstrukcije J - R krive potrebno je najmanje sedam ispravno ispitanih uzoraka, tako da se bar tri tačke nalaze u prvom kvartalu vrednosti. Na osnovu tih tačaka formira se eksponencijalna zavisnost, koja će biti detaljno objašnjena u poglavlju posvećenom analitičkom prikazu metode.

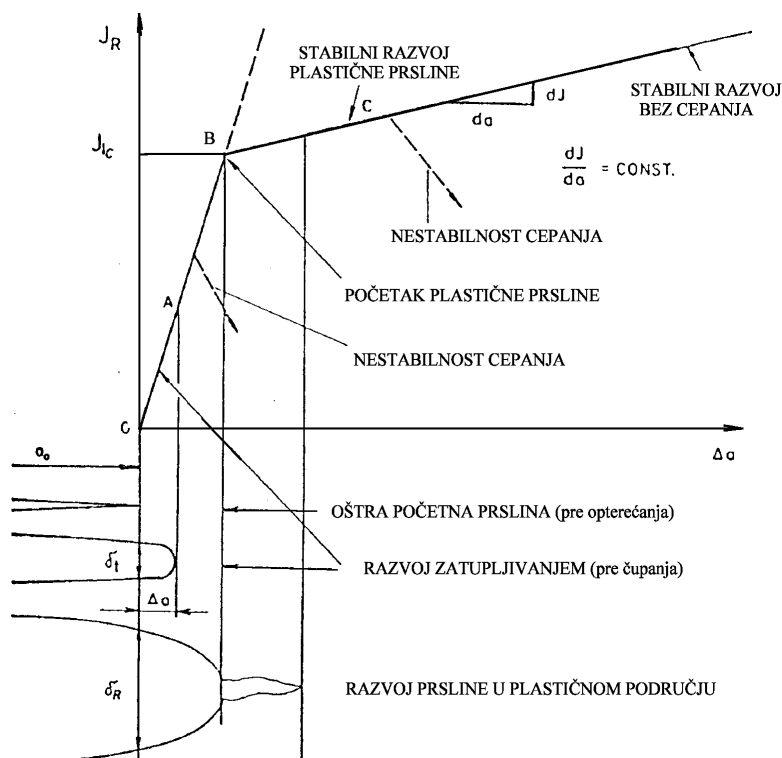
Pored ovih ispitivanja, potrebno je istaći da kod polimernih materijala dolazi do disipacije energije koja nije izazvana rastom prsline. Naime, usled opterećenja dolazi do uleganja uzorka u kontaktnim tačkama sa alatom. Zbog toga se sprovede dodatna ispitivanja na nezarezanim uzorcima, kako bi se ovaj doprinos odvojio od ukupne vrednosti potencijalne energije. Ovaj postupak biće objašnjen u poglavlju posvećenom materijalima i metodama sprovedenih eksperimenata [58,62,65].



Slika 1.23 Grafički prikaz: a) izračunavanja J integrala na osnovu dostignute potencijalne energije uzorka; b) konstrukcija J - R krive [64].

Stabilnom rastu prsline prethodi razvoj plastične zone, odnosno zatupljenje vrha prsline. Na J - R dijagramu efekat zatupljenja opisuje se linijom koja se analitički određuje. Kritična vrednost J_{IC} dobija se kao vrednost u preseku J - R krive i linije zatupljenja pomerene za 0.2 mm. Zatupljenje vrha prsline prethodi stabilnom rastu i mora se uzeti u obzir pri konstrukciji J - R krive. J_{IC} time predstavlja otpornost materijala na stabilan rast prsline. Ova veličina se takođe označava kao $J_{0.2}$, kada je primenjen kriterijum presecanja J - R krive sa linijom zatupljenja pomerenom za 0.2 mm.

Vrednost pomeranja od 0,2 mm utvrđena je empirijski, jer predstavlja dovoljno malu vrednost da može biti eksperimentalno izmerena, a istovremeno dovoljno veliku vrednost da se nalazi u oblasti stabilnog rasta prsline. Najmanja izmerena dužina prsline ne sme biti manja od 0.05 mm niti veća od 10% dužine ligamenta uzorka. Vrednosti dužine prsline veće od 10% izlaze iz validnog domena za određivanje J integrala [58,65].



Slika 1.24 J - R kriva za uporednim prikazom izgleda vrha prsline tokom faza zatupljenja i ranog stabilnog rasta [42].

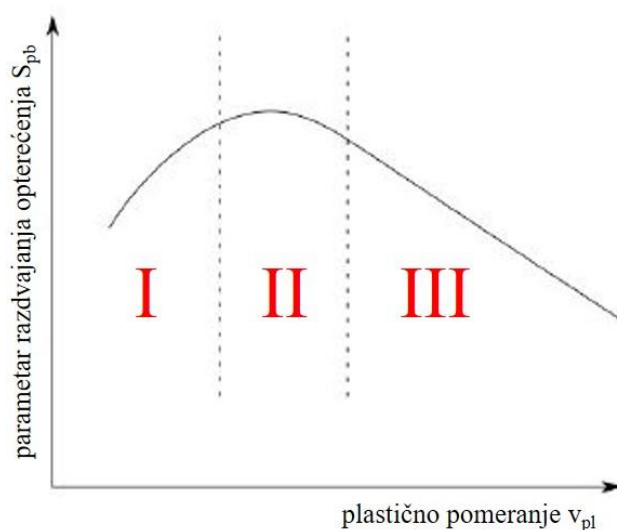
Iako K_{IC} i J_{IC} predstavljaju fizički različite parametre, pri čemu prvi pripada LEML, a drugi EPML, važno je naglasiti da se K_{IC} određuje za stanje neposredno pre nestabilnog rasta prsline, dok se J_{IC} određuje na osnovu vrednosti koje odgovaraju početku stabilnog rasta prsline. Ipak, postoji analitička relacija koja u praksi pokazuje veoma dobro slaganje i omogućava povezivanje ove dve veličine. Reč je o ekvivalentnom faktoru intenziteta napona određenom na osnovu vrednosti J_{IC} , označenom kao K_{JIC} [58].

Glavni nedostatak metode sa više uzoraka je potreba za velikim brojem uzoraka kako bi se konstruisala validna J - R kriva. Naime, zahteva se najmanje sedam identičnih uzoraka, pri čemu, ukoliko se uzme u obzir anizotropija polimera, broj potrebnih uzoraka može biti i znatno veći. Zatim, priprema uzoraka je zahtevna, s obzirom na to da i zarez i sama inicijalna prsline moraju biti što je moguće sličniji. Imajući u vidu veliki broj ponavljanja ispitivanja, ne treba zanemariti ni vremensko trajanje ovakvog postupka. Najvažnije, precizna procena dužine prsline u velikoj meri zavisi od iskustva ispitivača, jer naročito kod polimernih materijala, teško je tačno odrediti dužinu prsline, posebno pri najmanjim priraštajima [58,62,64].

Neki od značajnijih nedostataka ove metode retko se navode u literaturi. Jedan od njih je teškoća određivanja početnog rasta prsline, nakon zatupljenja vrha prsline. S obzirom na to da je upravo ovaj deo rasta prsline najkritičniji, jer direktno utiče na određivanje parametra J_{IC} , njegova pouzdana procena predstavlja poseban izazov. Drugi, manje razmatran nedostatak odnosi se na određivanje vrednosti J_{max} . Iako ova vrednost nije od značaja za određivanje parametra J_{IC} , ona se ne može pouzdano odrediti ovom metodom, jer bi opterećenje moralo biti zaustavljeno tačno u trenutku dostizanja maksimalne sile.

Metoda sa jednim uzorkom zasniva se na ispitivanju uzorka koji sadrži inicijalnu prsline, uz dodatno ispitivanje uzorka sa zatupljenim vrhom zareza. Ovu metodu je prvi predložio Ernst, dok su je Sharobeam i Landes dalje razvili i uveli u široku primenu. Metoda se zasniva na pretpostavci da je opterećenje povezano sa veličinom dužine prsline i plastične deformacije, preko funkcija geometrije G i deformacije H . Analitički proračun se sprovodi za oba tipa uzoraka, pri čemu se iz njihovog odnosa dobija parametar razdvajanja opterećenja S_{pb} . Iz zavisnosti ovog parametra i plastičnog pomeranja v_{pl} identifikuju se tri karakteristične oblasti (slika 1.25).

Prva oblast nije od značaja za određivanje, drugu oblast karakteriše plato vrednosti i odgovara fenomenu zatupljenja oko vrha prsline. U trećoj oblasti dolazi do opadanja vrednosti, što odgovara početku stabilnog rasta prsline [64,66].



Slika 1.25 Zavisnost parametra razdvajanja opterećenja S_{pb} od plastičnog pomeranja v_{pl} kod metode sa jednim uzorkom [64].

Navedena metoda predstavlja eksperimentalno jednostavniju alternativu prethodnoj metodi i omogućava određivanje trenutka početka stabilnog rasta prsline. Međutim, njena analitička složenost predstavlja ograničenje prvenstveno u pogledu preciznosti određivanja parametara. Stoga se u literaturi navodi da ovu metodu treba uporediti sa metodom sa više uzoraka kako bi se potvrdila tačnost dobijenih rezultata [64,66]. Analitičke osnove ove metode biće detaljnije objašnjene u narednom poglavlju, iako ona nije u fokusu ovog istraživanja.

1.3.1. Principi mehanike loma pri dinamičkom opterećenju

Pored statičkih ispitivanja, mehanika loma obuhvata i ispitivanja pri dinamičkom dejstvu sile, pri čemu se posebno izdvaja ciklično opterećenje, odnosno zamor. Principi mehanike loma u ovom slučaju najviše su razvijani za metalne materijale, ali se principi koji se koriste za njih mogu primeniti i na druge tipove materijala.

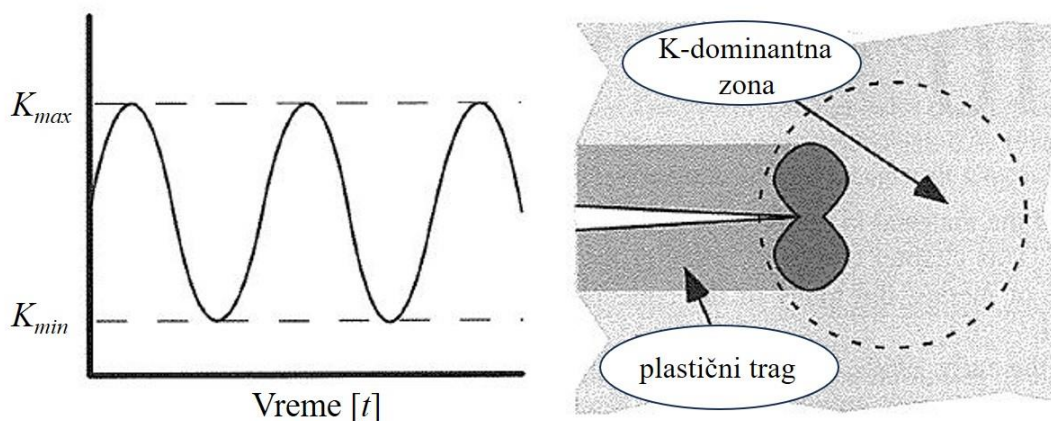
Pre svega, naučnim radom Parisa iz 1960-ih godina prošlog veka [67] utemeljena je primena mehanike loma i pri ovom tipu opterećenja. Prva osnovna pretpostavka pri opisivanju dinamičkog ponašanja materijala je da se parametri određeni statičkim ispitivanjima mogu koristiti i u ovom slučaju. Naime, naponsko stanje u okolini vrha prsline pri dinamičkom opterećenju može se opisati jedinstvenim parametrom, poput već navedenog faktora intenziteta napona K ili J integrala. Ukoliko u okolini vrha prsline važi singularitet napona $1/\sqrt{r}$, materijal će teoretski pri dostizanju vrednosti žilavosti loma (K_{IC}) doživeti lom [42].

Pri rastu zamorne prsline pod dejstvom cikličnog opterećenja, koje ima definisane minimalne i maksimalne vrednosti, u okolini vrha prsline se formira zona plastične deformacije. Kako prsline propagira, ona za sobom ostavlja plastični trag (slika 1.26). Ukoliko je plastična zona dovoljno mala u odnosu na K -dominantnu zonu, faktor intenziteta napona K predstavlja validan parametar za procenu ponašanja zamorne prsline. U tom slučaju, rast prsline karakterišu granične vrednosti K_{min} i K_{max} . Brzina rasta prsline po ciklusu opterećenja da/dN opisuje se pomoću opsega vrednosti K (ΔK) i faktora asimetrije ciklusa opterećenja R ($R=K_{min}/K_{max}$), koja ima oblik dat relacijom (1.2):

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (1.2)$$

Uticaj plastične zone i plastičnog traga određen je vrednostima K_{min} i K_{max} . Pri izraženoj plastičnosti usled zamornog opterećenja, K više nije dovoljan parametar, već se može koristiti J integral, koji se takođe pokazao kao validan parametar u istraživanjima [68,69] i daje zavisnost sličnog oblika, datu relacijom (1.3) [42]:

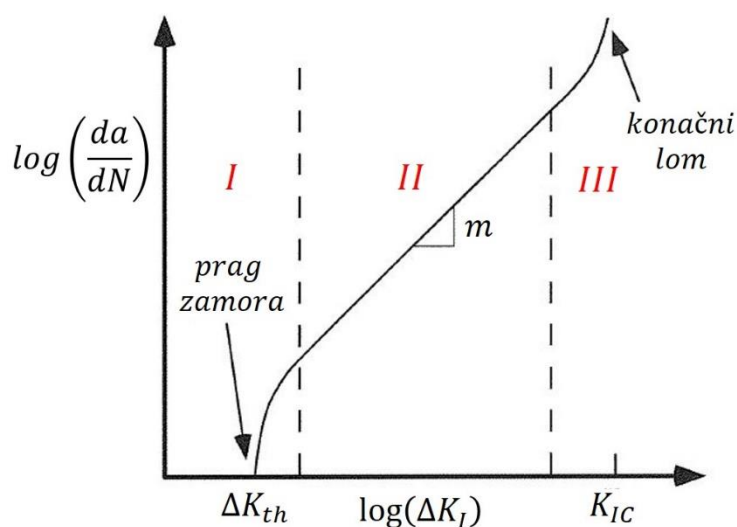
$$\frac{da}{dN} = f(\Delta J, R) \quad (1.3)$$



Slika 1.26 Prikaz amplitude opterećenja i naponskog stanja oko vrha prsline kod slučaja ograničenog tečenja (SSY) [42].

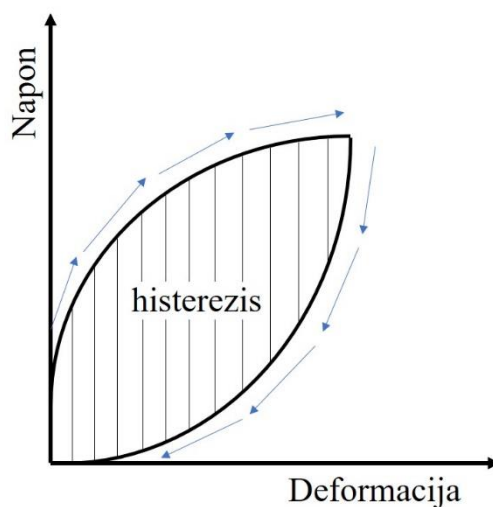
Ipak, jedno od značajnijih ograničenja primene J integrala predstavlja trenutak rasterećenja, jer kako je već naglašeno, gubitkom monotonosti opterećenja nelinearno-elastični principi na kojima se zasniva J integral više ne daju adekvatan opis elasto-plastičnog ponašanja materijala. Zbog toga se J integral i dalje smatra nedovoljno pouzdanim parametrom za opisivanje zamornog rasta prsline. Stoga K_I , pri kojem se najčešće razmatra kritično stanje materijala, i dalje predstavlja standardni parametar za interpretaciju zamornog rasta prsline.

Na dijagramu dvostruke logaritamske zavisnosti brzine rasta prsline da/dN od opsega ΔK uočavaju se tri karakteristične oblasti (slika 1.27). Prva oblast definiše prag zamora (ΔK_{th}), ispod kojeg ne dolazi do rasta zamorne prsline, dok treća oblast karakteriše ubrzan, nestabilan rast prsline koji prethodi lomu. Druga oblast je od posebnog značaja za mehaniku loma, jer se u njoj vrše proračuni na osnovu zavisnosti date relacijom (1.2) [42].



Slika 1.27 Kriva dvostruke logaritamske zavisnosti brzine rasta prsline da/dN od opsega ΔK [42].

Takođe, frekvenciju opterećenja potrebno je ograničiti ili uvesti periode rasterećenja između ciklusa kako bi se sprečilo lokalno zagrevanje polimernog materijala usled mehaničkog histereza (slika 1.28), odnosno akumulacije toplote tokom cikličnog opterećenja, što može dovesti do prevremenog loma [42].



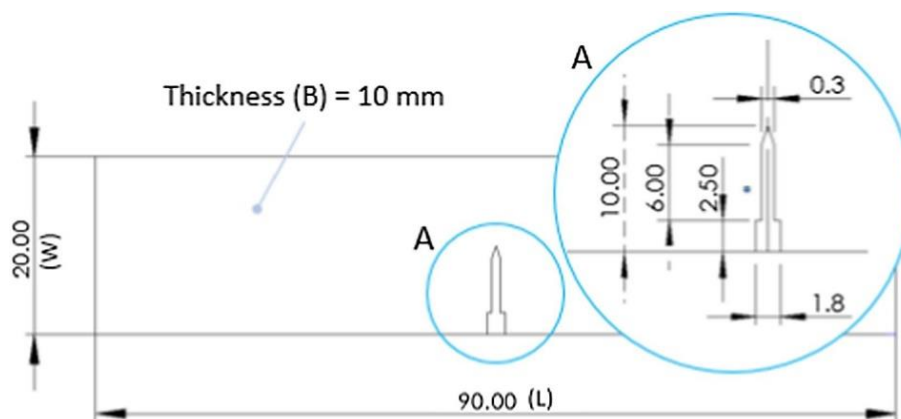
Slika 1.28 Izgled jednog ciklusa opterećenja i rasterećenja kod polimernog materijala sa izraženim histerezisom [42].

1.3.2. Primena mehanike loma kod aditivno proizvedenih struktura od PLA polimera

Na isti način na koji parametri aditivne proizvodnje utiču na mehaničko ponašanje polimernih materijala, oni utiču i na njihovo mehaničko ponašanje u prisustvu defekta, odnosno prsline.

Uz pomoć mehanike loma može se pristupiti proceni ponašanja delova izrađenih aditivnim tehnologijama, pri čemu se koriste postojeći utemeljeni principi, koji daju dobre rezultate za delove izrađene konvencionalnim tehnologijama izrade, mahom od metalnih materijala. Isto tako, standardi poput ASTM D5045 [60], za određivanje linearno-elastične žilavosti loma, i ASTM D6068 [65], za procenu elasto-plastičnih parametara, koji uključuju i konstrukciju J - R krivih sa procenom vrednosti J_{IC} , proistekli su iz odgovarajućih standarda, pre svega namenjenih metalnim materijalima, kao što su ASTM E399 [70] i ASTM E1820 [71], koji su komparativni sa prethodno pomenutim standardima, respektivno. Dalje, procena rasta zamorne prsline do sada je retko primenjivana kod polimernih materijala izrađenih aditivnim tehnologijama, ali postoje zabeleženi rezultati koji mogu poslužiti za poređenje sa rezultatima dobijenim u ovom istraživanju.

U radu [72] kao važan preduslov za ispitivanje žilavosti loma K_{IC} , prema standardu ASTM D5045 [60], istaknuto je da je strategija izrade zareza kod epruveta, u ovom slučaju SENB (*engl. Single Edge Notch Bending*), od velike važnosti za tačnost rezultata. Na slici 1.29 je prikazana SENB epruveta izrađena SLS tehnologijom, čiji je zarez direktno aditivno proizveden, ali sa zatvorenim ulazom zareza. Ideja je bila da se fine konture zareza bliže vrhu prsline izrade aditivnim postupkom, dok bi se ulaz naknadno isekao konvencionalnim postupkom. Time bi se, prema ideji autora, sprečilo spajanje krajeva zareza pri SLS aditivnoj proizvodnji.

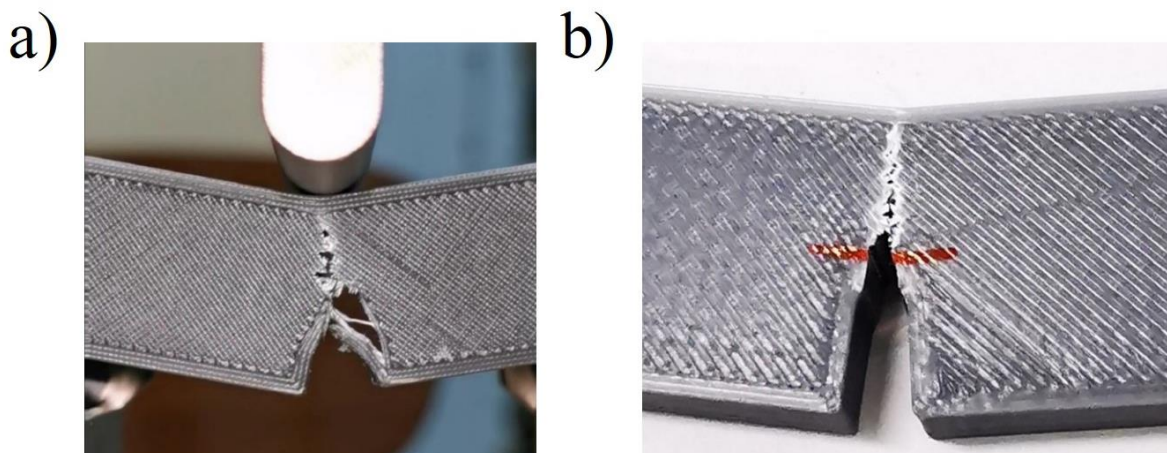


Slika 1.29 Izgled SENB epruvete sa fokusom na oblast zareza, gde je prikazan hibridni način njegove izrade (aditivnim i konvencionalnim postupkom) [72].

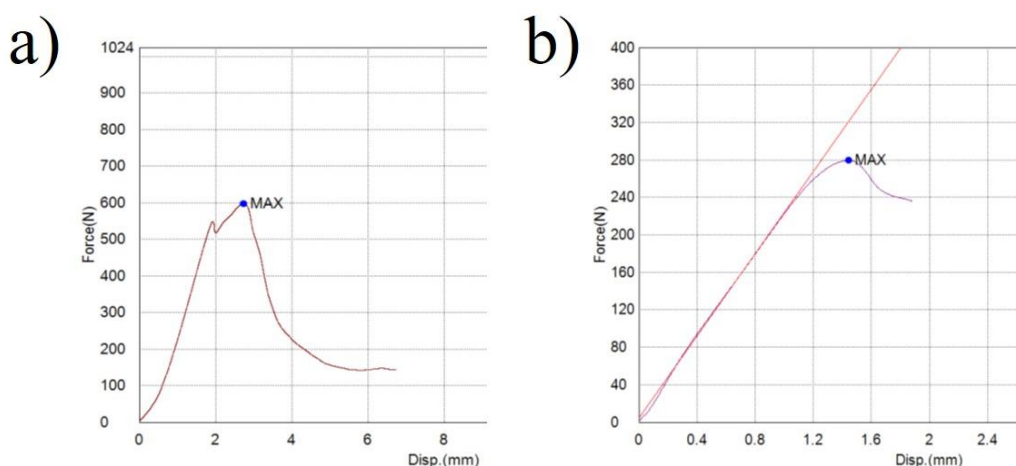
Ista strategija izrade zareza korišćena je i u radovima [73-75], dok je u radu [76] prvi put razmatrana strategija izrade zareza kod FDM tehnologije. Naime, uzeta je u obzir direktna aditivna proizvodnja celog zareza, kao i postupak mašinske obrade na strugu. Pri ispitivanju SENB uzoraka u režimu savijanja u četiri tačke, radi dobijanja vrednosti K_{IC} i K_{IIC} , jasno se uočava da je kod uzoraka sa aditivno proizvedenim zarezima prisutno manje rasipanje rezultata, čime je potvrđena i utemeljena direktna aditivna proizvodnja zareza kao neophodan postupak. Ovakav način proizvodnje zareza na SENB i C(T) uzorcima je primenjivan u radovima [77-81].

Takođe, budući da se kod FDM tehnologije prilikom izrade sloja materijala unutrašnja struktura ovičava spoljašnjim linijama (*engl. outlines*), treba imati u vidu da pri izradi inicijalne prsline nije potrebno samo voditi računa da se ne ošteti materijal ispred vrha prsline, već i da inicijalna prsline bude duža od tih spoljašnjih linija, koje će se u daljem tekstu nazivati ovojnice. Ukoliko je inicijalna prsline kraća, početni rast prsline neće biti zadovoljavajući (slika 1.30a), a linearnost mehaničkog odziva neće biti ispoštovana u skladu sa zahtevima standarda ASTM D5045 [60], te će odziv biti

nepovoljan, sa nejasnim pikovima (slika 1.31a). Nepovoljni slučaj je u istraživanju [77] imao tri ovojnice, a povoljni, koji je prikazan na slikama 1.30b i 1.31b, samo dve ovojnice. Zaključci iz rada [77] korišćeni su u radu [49].



Slika 1.30 Izgled SENB uzoraka nakon ispitivanja sa: a) tri ovojnice; b) dve ovojnice [77].



Slika 1.31 Mehanički odziv SENB uzoraka sa: a) tri ovojnice; b) dve ovojnice [77].

Iako je inženjerski zahtev da se utvrde najbolji parametri aditivne proizvodnje, različiti tipovi opterećenja, kao i način ispitivanja, pri čemu se pre svega misli na razliku između standardnih ispitivanja pri određivanju mehaničkih osobina materijala i principa mehanike loma, ukazuju na to da nije moguće pronaći jedinstvene najbolje parametre koji bi zadovoljili sve tipove ispitivanja.

U istraživanju [82] uočeno je da se pri ispitivanju SENB uzoraka, radi određivanja žilavosti loma PLA materijala, najveća dobijena vrednost K_{IC} dobija za uzorke koji imaju orijentaciju ugla rastera od $-45/45^\circ$. Na primer, kod slučaja ispitivanja na zatezanje [11] najpovoljniji slučaj ugla rastera je kada su niti paralelne sa pravcem delovanja opterećenja, odnosno 0° . Međutim, kod orijentacija 0° i 90° vrednosti K_{IC} su bile najniže. Takođe, u istraživanju [83] dokazana je slična tvrdnja, ali na C(T) uzorcima.

Međutim, u istraživanju [49] dobijen je suprotan zaključak. Naime, u tom istraživanju orijentacije 0° i 90° daju najbolje vrednosti, dok je $-45/45^\circ$ najnepovoljnija. Stoga, treba imati u vidu da različiti istraživači ne koriste samo različite materijale u formi filameta, već i različite FDM uređaje, te sve ovo kumulativno utiče na razlike u zaključcima različitih autora.

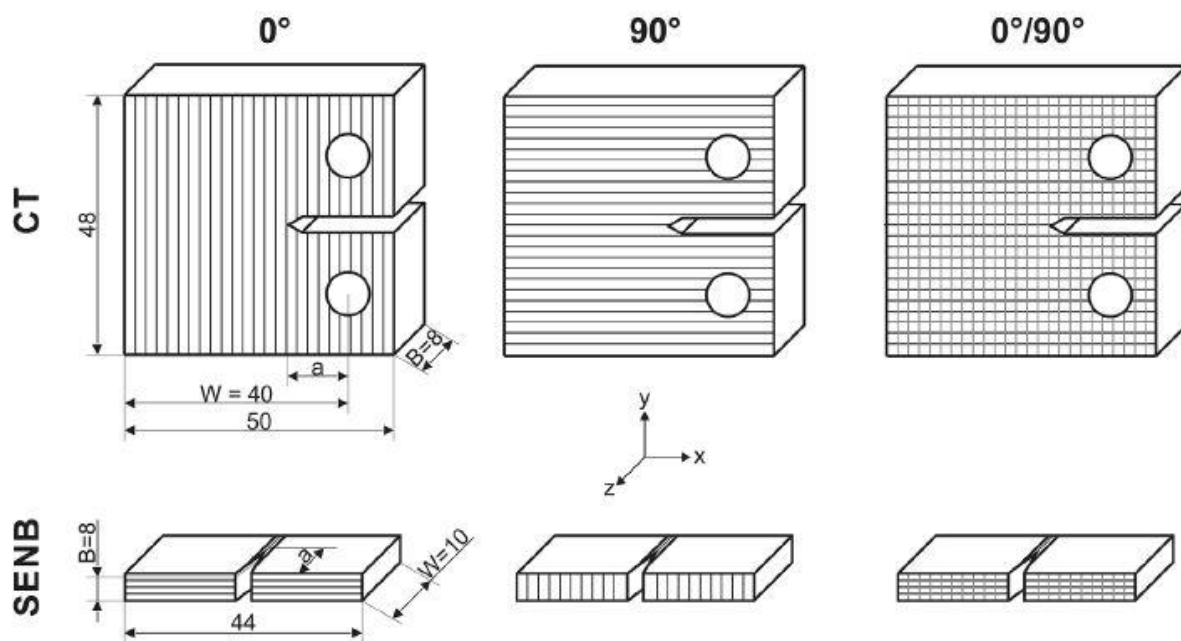
Važno je istaći i sledeći zaključak iz istraživanja [49]: razmatrani su uzorci različitih debljina i utvrđeno je da uzorak debljine 10 mm daje manju vrednost K_{IC} od uzorka debljine 4 mm. Ako se ima u vidu dijagram na slici 1.17b, može se zaključiti da je uzorak debljine 10 mm značajno bliži

karakteristici materijala koju određuje K_{IC} , odnosno da materijal definiše RSD, za razliku od uzorka debljine 4 mm, gde je verovatno RSN dominantno, što može objasniti tako visoke vrednosti K_{IC} .

Važni rezultati postignuti su u radu [84], gde su za čisti PLA polimer punog preseka dobijene vrednosti K_{IC} u opsegu od $2.69 \pm 0.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Ovi rezultati su uporedivi sa vrednostima dobijenim u ovom istraživanju.

Jedan od verovatno najinteresantnijih radova na ovu temu obradila je grupa autora u [85], razmatrajući zaključke u vezi sa aditivnom proizvodnjom uzoraka iz rada [50]. Naime, u radu [50] je uz pomoć visokih temperatura ekstruzije postignuta skoro homogena struktura PLA polimera (slika 1.12), čime su rezultati dobijeni pri različitim parametrima aditivne proizvodnje objedinjeni u karakterizaciji materijala. Ispitana je žilavost loma sa stanovišta LEML na C(T) uzorcima i pokazano je da oni ne zadovoljavaju zahteve standarda ASTM D5045 [60] u pogledu potrebnih uslova za opterećenje. C(T) uzorci bili su debljine 8 mm, što je prema nekim istraživanjima [77,80,81] vrednost koja bi verovatno bila ispod zahteva za RSD. Dodatno u prilog ovoj tvrdnji ide činjenica da su dobijene vrednosti K_I u opsegu 5-7 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, što su slične vrednosti onima dobijenim u istraživanjima [49,76].

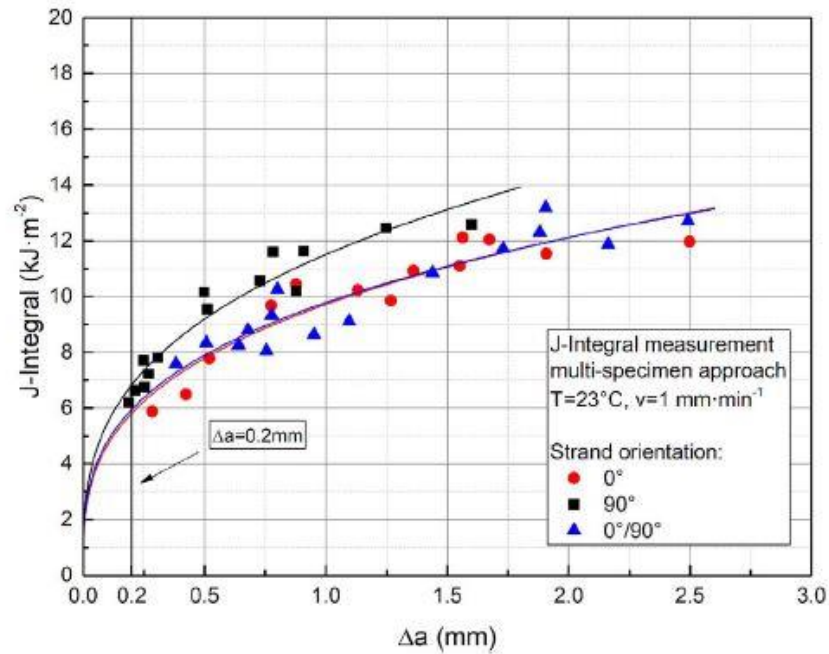
Zatim, u radu [85] je nastavljeno ispitivanje PLA materijala prema postupcima EPML, pri čemu su na SENB uzorcima izrađeni bočni zarezi kako bi se obezbedila vertikalna putanja propagacije prsline. Oba tipa uzorka korišćena u [85] su prikazana na slici 1.32.



Slika 1.32 Grafički prikaz C(T) i SENB uzoraka korišćenih u radu [85], sa pokazanim dimenzijama u mm.

Kao rezultat ispitivanja postupcima EPML dobijene su J - R krive na velikom broju uzoraka, ali pri određivanju J_{IC} , odnosno $J_{0.2}$, nije uzeta u razmatranje linija zatupljenja. Izgled J - R krivih iz rada [85] prikazan je na slici 1.33. Vrednosti J_{IC} za sve parametre aditivne proizvodnje nalaze se u opsegu od 5.75 do 6.79 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Važno je istaći, što se vidi na slici 1.33, da su ispitivanja rađena na sobnoj temperaturi i pri brzini opterećenja od 1 mm/min.

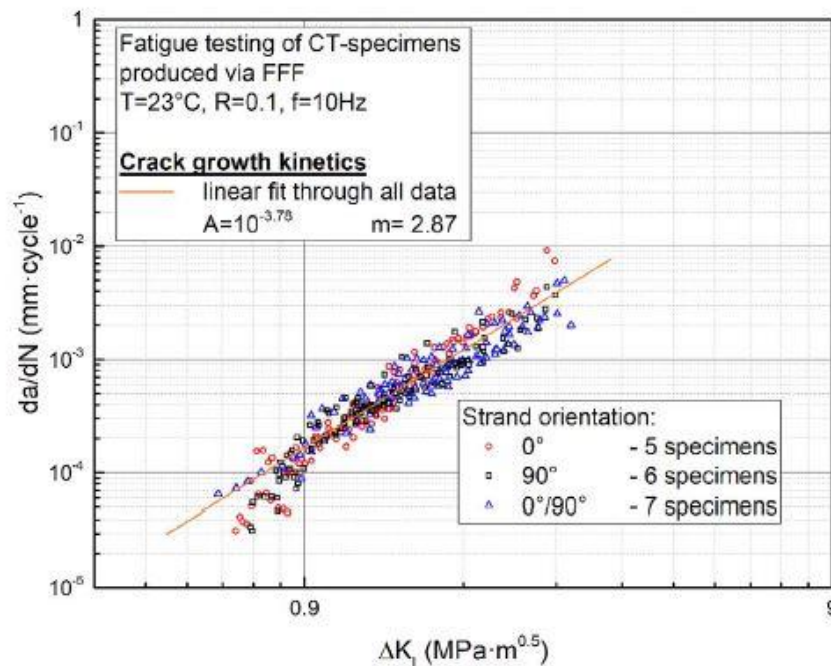
Ono što je neobično, a može se zaključiti sa slika 1.32 i 1.33, jeste da su za J - R krive uzimane vrednosti do oko 2.5 mm rasta prsline, iako je dužina ligamenta svega 5 mm. Kako je prethodno navedeno, vrednosti za J - R krivu uzimaju se do 10% dužine ligamenta, nakon čega nastupa zona velikih deformacija, gde J ne opisuje amplitudu singulariteta HRR polja.



Slika 1.33 Izgled J - R interpretacije sa vertikalnom linijom koja označava rast prsline od 0.2 mm iz rada [85].

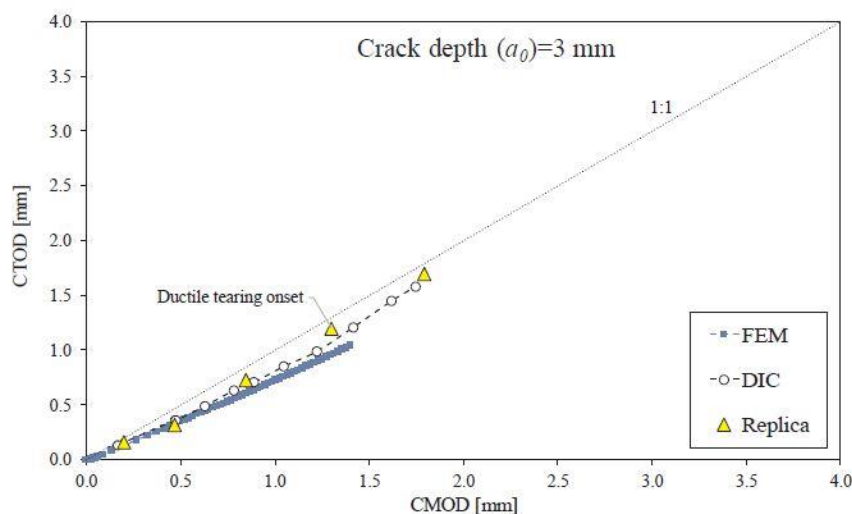
Na kraju, u radu [85] izvršena je procena brzine rasta prsline na C(T) uzorcima u zavisnosti od opsega faktora intenziteta napona ΔK . Dobijeno je poklapanje vrednosti veće od 93% ($R^2 > 0.93$). Prikaz dijagrama brzine rasta prsline u zavisnosti od ΔK dat je na slici 1.34.

Sam rad [85] predstavlja veliku bazu podataka za upoređivanje sa rezultatima dobijenim u ovom istraživanju, ali treba imati u vidu da su PLA uzorci u ovom istraživanju vrlo verovatno izrađeni na sofisticiranim FDM uređajima, s obzirom na to da su obezbeđene temperature ekstruzije od oko 250 °C. Prava linija na slici 1.34 predstavlja linearnu aproksimaciju kroz podatke za sve grupe uzoraka.



Slika 1.34 Brzina rasta prsline prema Parisovom zakonu u radu [85].

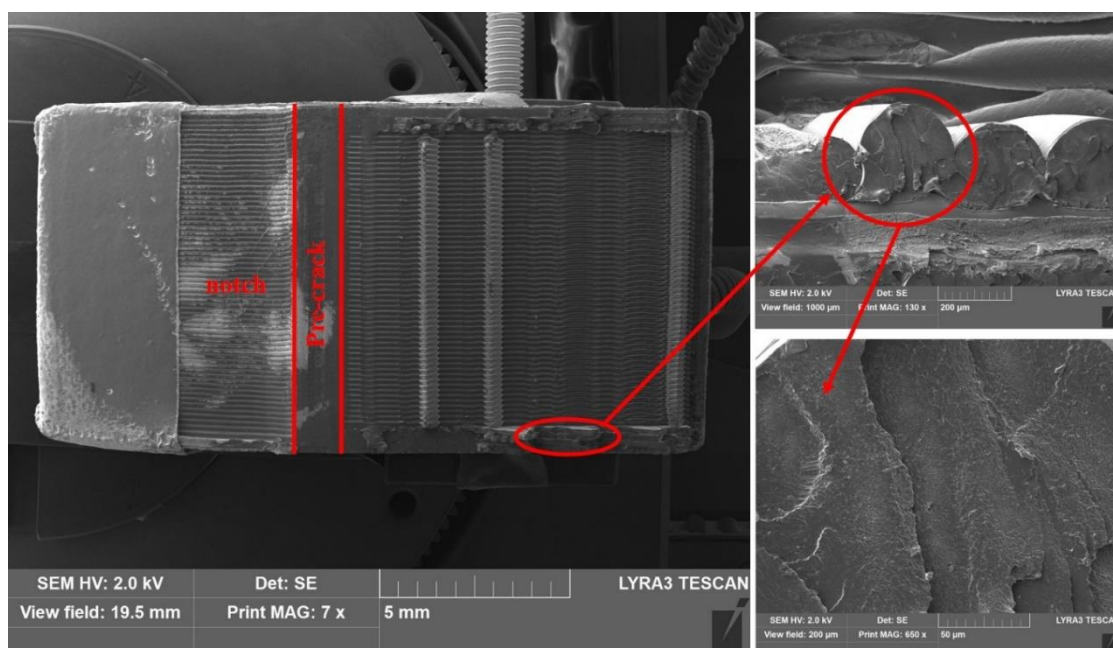
S druge strane, u radu [61] data je interesantna interpretacija rezultata u cilju verifikacije numeričke simulacije na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih DIC metodom. Naime, korišćena je zavisnost između dva parametra otvaranja prsline, CTOD i CMOD. Budući da su polimerni materijali viskoplastični, promena stanja u vrhu prsline mogla bi se više odraziti na CTOD nego na CMOD, što bi se moglo tumačiti na osnovu ovakve zavisnosti između parametara.



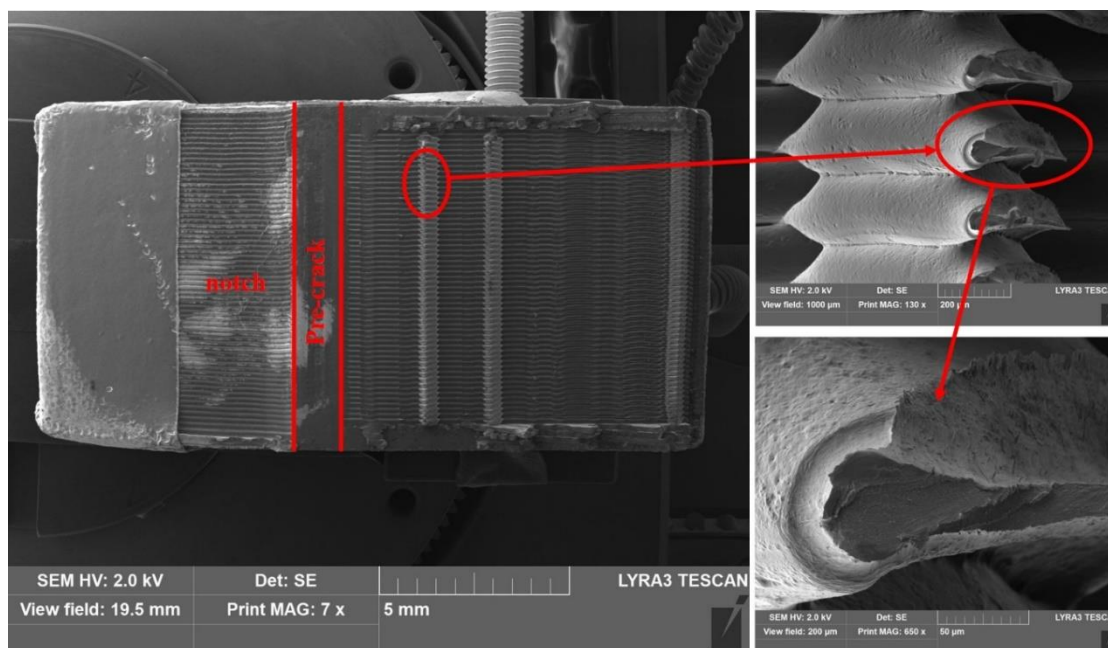
Slika 1.35 Zavisnost parametara otvaranja prsline CTOD i CMOD radi verifikacije rezultata [80].

Glavni problem FDM aditivne tehnologije je formiranje šupljina (*engl. air gap*) nastalih usled nepotpunog spajanja niti u okviru sloja i susednih slojeva. Ove šupljine smanjuju efektivni poprečni presek i dovode do stvaranja mesta koncentracije napona, čime značajno utiču na mehaničke osobine dobijenog dela [86,87]. Dodatna pogodnost aditivne proizvodnje uopšte je mogućnost manipulacije količinom materijala koji se koristi za unutrašnju strukturu.

Interesantno zapažanje može se izvesti sa slika 1.35 i 1.36 iz rada [80], na kojima su prikazane prelomne površine celog SENB uzorka sa fokusom na bočnu stranu, gde se odvijao kvazi-krti lom kod PLA polimera (slika 1.35), kao i zona primetne plastične deformacije u neposrednoj blizini zareza i inicijalne prsline. Dakle, na slici 1.36 vidi se da je PLA materijal ostvario značajnu plastičnost, što se manifestuje kao istegnuti deo sa naglašenom fibrilacijom prelomne površine.



Slika 1.36 Prelomna površina SENB uzorka sa fokusom na bočnu stranu [80].



Slika 1.37 Prelomna površina SENB uzorka sa fokusom na sredinu uzorka [80].

Najvažniji aspekt za funkcionalne primene FDM delova od PLA polimera jeste procena njihovih zamornih karakteristika. U radu [88] izvršena je procena zamornog veka, pri čemu je pokazano da količina ispune ima najveći uticaj na zamorni vek, zatim visina sloja, a potom ostali parametri. U radu [79] dokazano je da visina sloja od samo 0.1 mm može da obezbedi stabilan rast prsline, bez pojave njene angulacije. Pored radova [79,85,88], istraživanja zamornog veka, odnosno dinamičke izdržljivosti, i procene brzine rasta prsline veoma su retka za PLA materijal, jer se u čistom obliku smatra nedovoljno pogodnim za samostalno podnošenje opterećenja. Zbog toga se u većini savremenih istraživanja razmatraju smeše ovog polimernog materijala sa staklenim i ugljeničnim vlaknima, kao i sa drugim puniocima [86,89-95].

Međutim, iako se PLA polimer smatra kvazi-krtim materijalom [49,76-85], on je pre svega termoplastični materijal sposoban za značajnu plastičnu deformaciju. Ovu osobinu može ispoljiti naročito kod aditivno proizvedenih struktura, koje pre svega treba posmatrati kao konstrukciju, a ne samo kao jedan materijal. Dakle, čak i isti uzorak može imati zone u kojima je došlo do krtog loma, ali i zone u kojima se javlja značajna plastičnost usled lokalne koncentracije napona [80,81].

Ipak, plastičnosti PLA polimera nije posvećeno dovoljno pažnje, što se može uočiti u dostupnoj literaturi, gde se u radovima koji se bave upotrebom metode sa jednim uzorkom uglavnom pominju duktilniji polimeri, poput PP-a ili ABS-a [66,96,97].

Iako je ovaj fenomen nedovoljno istražen, različiti procenti ispune mogu uticati ne samo na količinu upotrebljenog materijala za izradu dela već i na način ponašanja linija i niti u unutrašnjosti aditivno proizvedenog dela. Zbog toga se PLA označava kao kvazi-krt materijal, jer je u većini slučajeva na sobnoj temperaturi pre svega podložan krtom lomu, iako pri velikoj lokalnoj koncentraciji napona, kakva bi se mogla javiti pri malim količinama ispune, može doći do izražene plastične deformacije [81]. Stoga se može smatrati da manipulacija količinom ispune nije samo jedna od odlika same aditivne tehnologije već i mogućnost za dodatno istraživanje ovog fenomena.

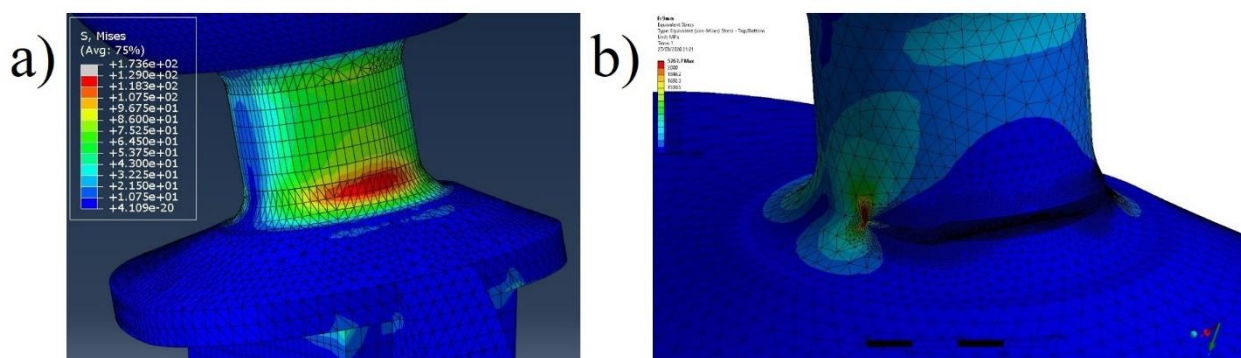
1.4. Numeričke simulacije sa modeliranim defektom tipa prsline

Metoda konačnih elemenata (MKE) ima široku primenu u numeričkim simulacijama inženjerskih delova i pokazala se pogodnom za procenu naponsko-deformacionih stanja i uopšte ponašanja delova pod dejstvom opterećenja i pri zadatim graničnim uslovima [98-102]. Na taj način, ukoliko je model verifikovan eksperimentalnim rezultatima, može se pristupiti detaljnijoj analizi posmatranog dela, odnosno konstrukcije.

Kao što je poznato, MKE koristi konačne elemente koji sadrže čvorove i zajedno formiraju mrežu kojom se diskretizuje struktura koja se u mehanici posmatra kao kontinuum. U tim čvorovima se proračunavaju naponska stanja i deformacije, čime se preko ekvivalentnih napona dobijaju podaci o naprezanju u strukturi analiziranog dela. Radi uključivanja kompleksnije analize ponašanja inženjerskog dela u eksploataciji, mora se imati u vidu i inženjerski pristup zasnovan na toleranciji oštećenja (*engl. Damage tolerance-based methodology*) [103], radi procene preostalog radnog veka dela ili konstrukcije. U tom smislu, konvencionalna MKE ne daje dobre rezultate, jer bi za svako širenje prsline morala da se formira nova mreža konačnih elemenata, što bi, pored utrošenog vremena, uticalo i na tačnost dobijenih rezultata.

Jedan od prvih koraka bio je uključivanje takozvane proširene metode konačnih elemenata, odnosno xFEM metode (*engl. eXtended Finite Element Method*), koja je danas u širokoj primeni [104-111]. Kod ove metode, čvorovi konačnih elemenata u okolini modelirane prsline imaju dodatne stepene slobode primenom odgovarajućih funkcija poboljšanja (*engl. enrichment functions*) [112]. Na taj način omogućava se da se tokom rasta prsline čvorovi prilagođavaju njenom položaju, pri čemu se zadržava postojeća mreža, ali se i dalje dovoljno dobro diskretizuje okolina prsline tokom njene propagacije [113].

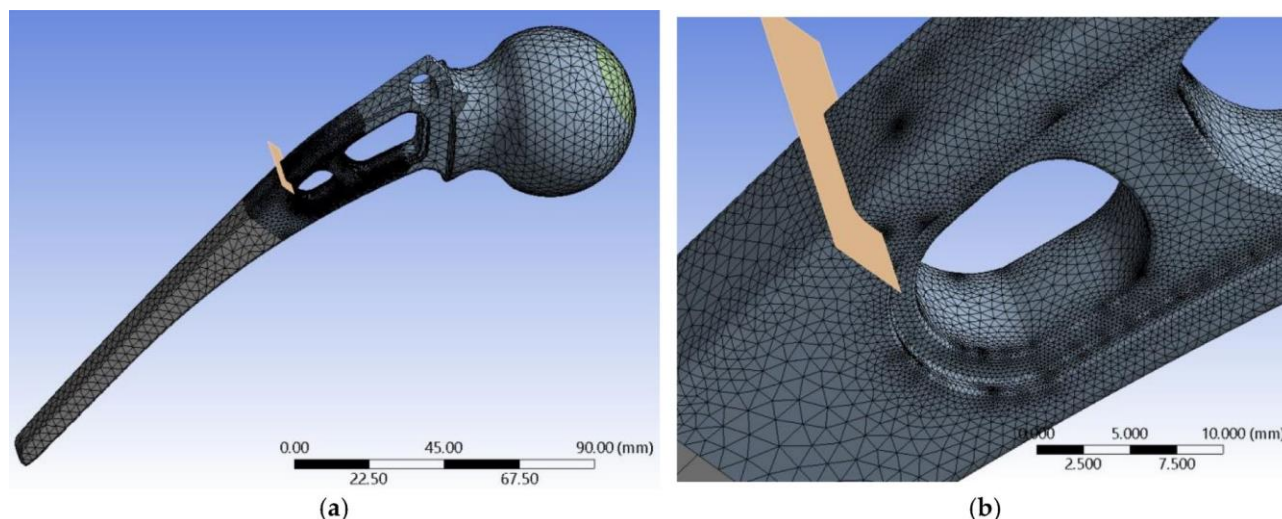
Ipak, uz pretpostavku da prsline nastaju na mestima najveće koncentracije napona u strukturi [114], najbolja praksa je da svakoj xFEM metodi prethodi konvencionalna MKE analiza, pomoću koje se utvrđuju najpogodnija mesta za analizu moguće prsline [115,116]. Primer jednog takvog uparenog istraživanja prikazan je na slici 1.38.



Slika 1.38 Kombinovana analiza primenom: a) MKE; b) xFEM metode u istraživanjima [115,116].

Obe metode su pronašle široku primenu u istraživanjima biomedicinskih implantata, odnosno njihovih dizajna [34,36-40,113-121]. Naime, totalne proteze kuka [113-121] i ortopedske pločice [34,36-40] spadaju među najanaliziranije strukture primenom MKE i xFEM metoda uopšte, pre svega zbog velikih amplituda opterećenja i verovatnoće otkaza implantata usled mehaničkog loma.

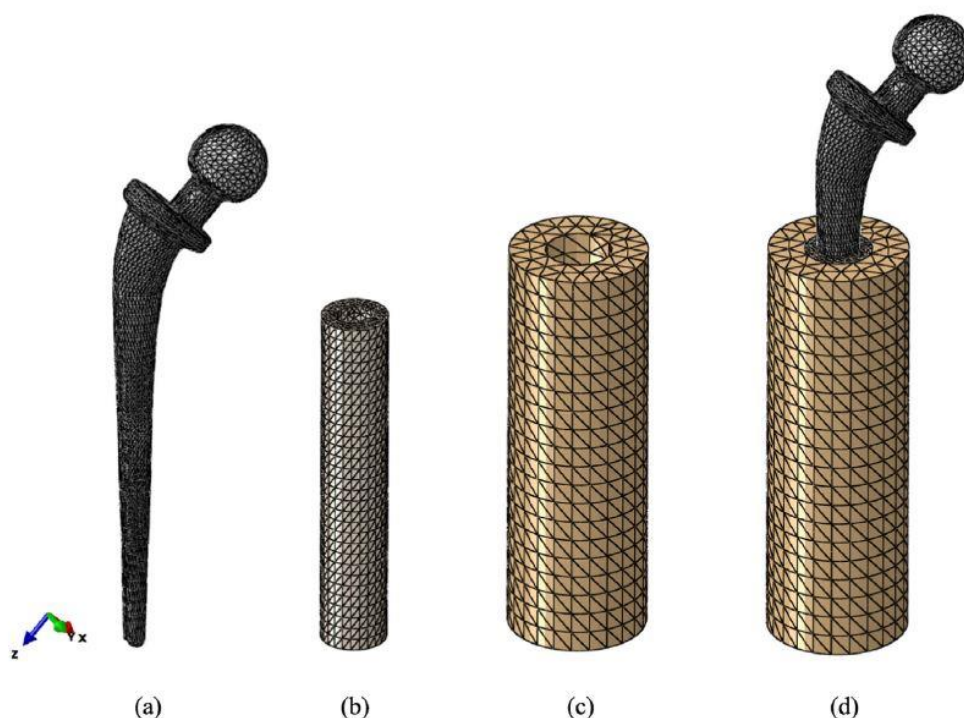
Primer jednog istraživanja na modelu totalne proteze kuka dat je na slici 1.39 [118]. U ovom slučaju, prsline je modelirana na mestu najužeg preseka. Prikazani dizajn omogućava rasterećenje koncentracije napona u predelu vrata proteze, ali time kritičan postaje presek sa manjom količinom materijala. Ovaj koncept dizajna detaljno je objašnjen u radu [114].



Slika 1.39 a) xFEM analiza dizajna totalne proteze kuka; b) uvećan prikaz okoline modelirane prsline u radu [118].

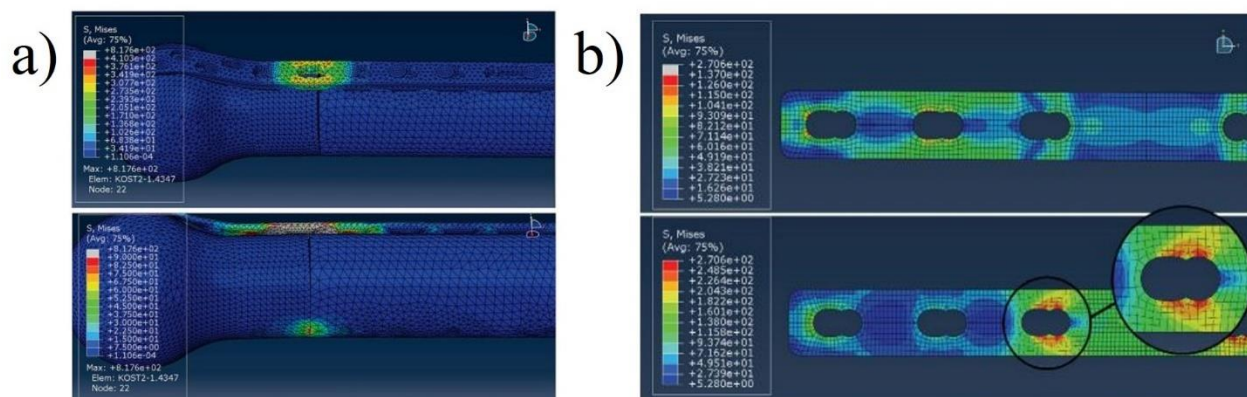
Važno je istaći da je u radu [118] proračun rasta zamorne prsline izvršen na osnovu podataka dobijenih sa krive brzine rasta zamorne prsline prema Parisovom zakonu, koja je teorijski prikazana na slici 1.27, dok je jedan praktičan primer njene primene na PLA polimernom materijalu ranije prikazan na slici 1.34. Ovim se naglašava da, pored karakteristika materijala, moraju da se definišu i koeficijenti rasta zamorne prsline iz Parisove jednačine [67], koji će biti objašnjeni u analitičkom delu.

Sledeće istraživanje [120,121] naglašava upotrebu više struktura radi opisa ponašanja zamorne prsline u strukturi totalne proteze kuka sa defektom tipa prsline (slika 1.40). Naime, pored modela implantata sa modeliranom prslinom, u xFEM analizi nalaze se i odgovarajući modeli femoralne kosti i cementa (najčešće od PMMA materijala), koji služi kao adheziv između kosti i implantata. Time je naglašeno da pored opterećenja i graničnih uslova pri analizi treba imati u vidu i širi geometrijski aspekt, odnosno strukture i delove koji su u kontaktu sa analiziranim delom.



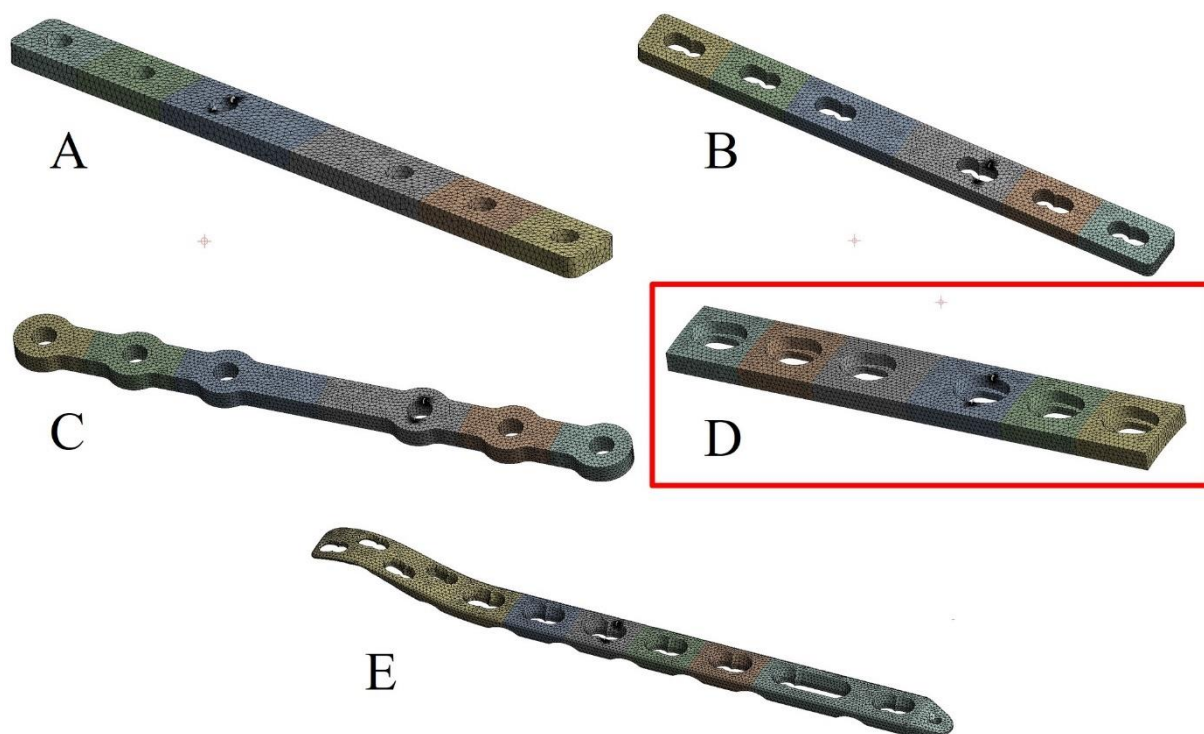
Slika 1.40 Numerički modeli sa prikazanom mrežom konačnih elemenata: a) totalna proteza kuka; b) cement; c) femoralna kost; d) sklop iz [120].

Analiza naponskih stanja primenom MKE u radu [34] pokazala je da ortopedske pločice uopšte imaju najviša naponska stanja u okolini otvora (slika 1.41), te da je to najverovatnije mesto iniciranja prsline. Otvori na ortopedskim pločicama služe za smeštanje vijaka za fiksaciju, ali predstavljaju kritične zone zbog najmanje površine poprečnog preseka.



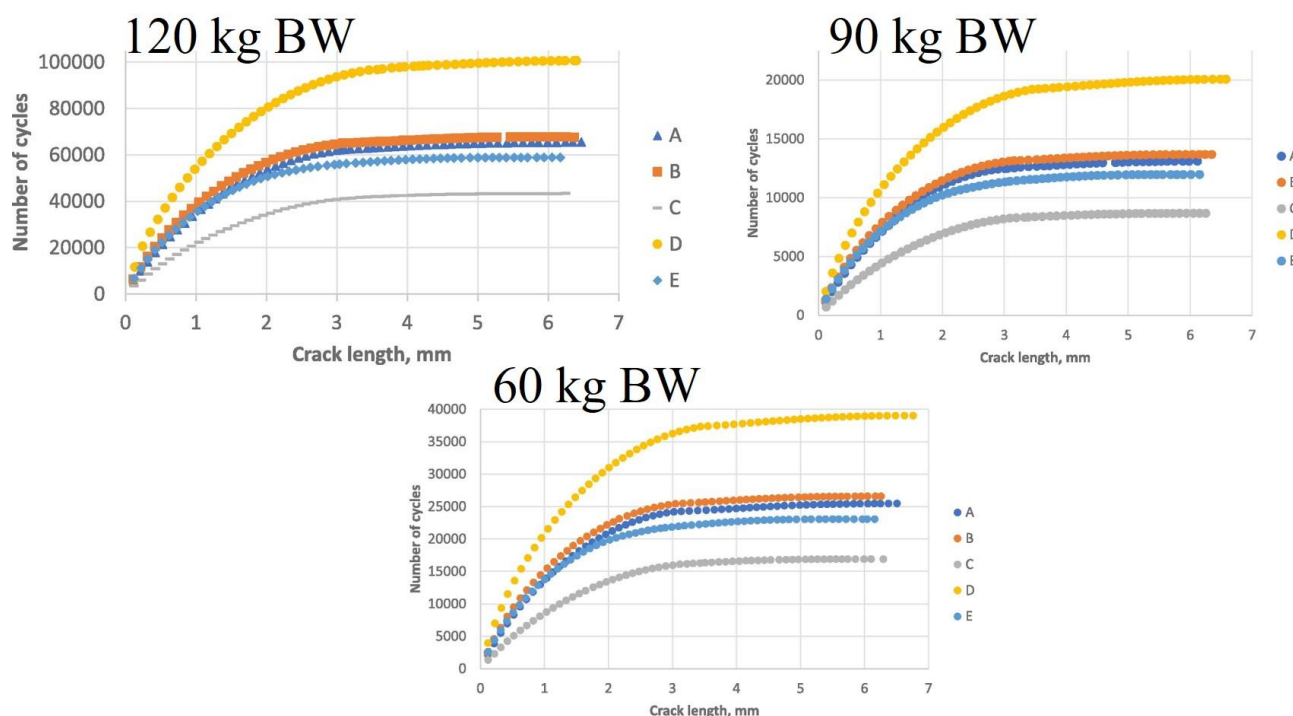
Slika 1.41 MKE analiza naponskih stanja ortopedske pločice: a) prikaz modela sa odgovarajućim modelom kosti; b) pojedinačni prikaz iz [34].

Istraživanje [34] poslužilo je kao polazni osnov za radove autora [36-40], u kojima je na osnovu njegovih zaključaka sprovedena xFEM analiza ponašanja zamorne ivične prsline na mestu odabranog otvora na modelima ortopedskih pločica. Naime, analizirano je pet različitih modela (slika 1.42), pri čemu je ustanovljeno da dizajn sa najvećom površinom kontakta sa kosti (odnosno najvećom širinom) ima i najduži preostali radni vek, odnosno da je izdržao najveći broj ciklusa opterećenja sa defektom tipa prsline. Na slici 1.42 crvenom bojom je označen dizajn ortopedske pločice od interesa za ovo istraživanje, s obzirom na to da je utvrđeno da predstavlja najbolji dizajn od navedenih. Ovo predstavlja jednu od polaznih tačaka ovog istraživanja.



Slika 1.42 Različiti modeli ortopedskih pločica sa odgovarajućim slovnim oznakama iz [36-40].

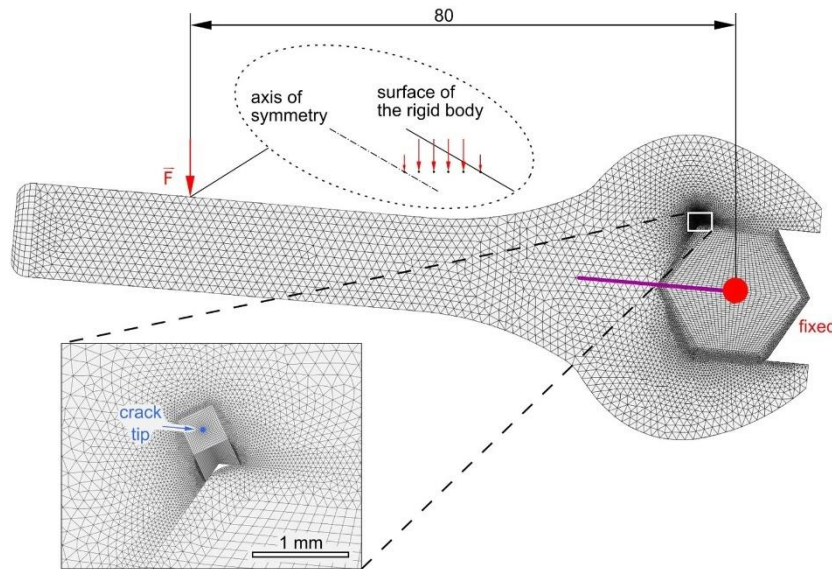
Sledeće, na slici 1.43 su prikazani rezultati broja ostvarenih ciklusa u zavisnosti od dužine rasta prsline za sva tri razmatrana slučaja opterećenja u [36-40]. Još jednom, vredi naglasiti da je „D” dizajn ortopedске pločice dao ubedljivo najbolje rezultate u pogledu preostalog radnog veka u odnosu na svih pet razmatranih dizajna, za sve tri analizirane vrste opterećenja. Naime, uzeto je u obzir opterećenje koje bi delovalo na telo pacijenta mase 60, 90 i 120 kg (slika 1.43). Izraz BW označava težinu koju stvara telo odgovarajuće mase (*engl. Body Weight*). Takođe, ortopedске pločice su proračunate primenom xFEM-a bez modela kosti, pri čemu je simulirano odgovarajuće ispitivanje prema standardu ASTM F382 [122] savijanjem pločice u četiri tačke, sa dva simetrična oslonca i dva simetrična opterećenja.



Slika 1.43 Broj ostvarenih ciklusa u zavisnosti od dužine rasta prsline za tri različita slučaja opterećenja [36-40].

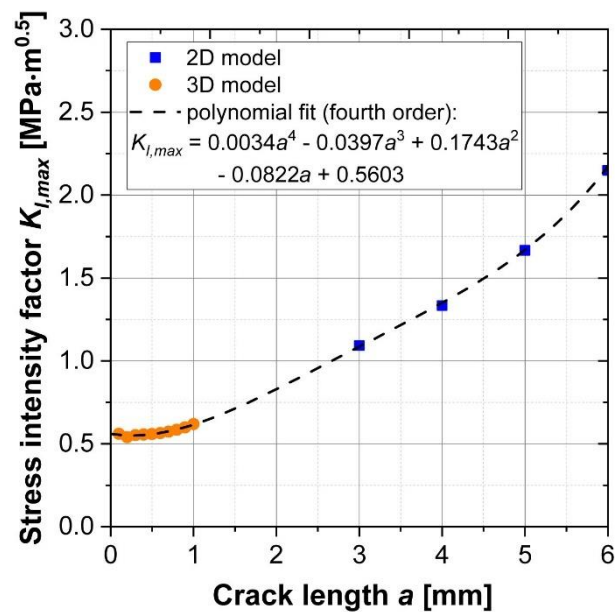
Analiza pomoću xFEM metode nije novina ni za aditivno proizvedene delove, a uticaj zamorne prsline na mehaničko ponašanje jedne komponente stajnog trapa aviona istraživao je u radu [123]. Naime, sprovedena su ciljana ispitivanja brzine rasta prsline prema Parisovom zakonu pomoću servo-pulzatora na odgovarajućim C(T) uzorcima. Značaj ovog istraživanja ogleda se u tome što su pri numeričkim simulacijama uzeti u obzir zaostali naponi koji se javljaju u procesu aditivne proizvodnje sa metalom kao gradivnim materijalom.

Kod polimernih materijala zaostali naponi nastali tokom procesa aditivne proizvodnje nisu toliko izraženi kao kod metalnih materijala, dok anizotropija predstavlja izraženiji problem. S tim u vezi, kao nastavak karakterizacije PLA polimernih materijala prema principima mehanike loma iz [85], u radu [103] nastavljeno je istraživanje na modelu takozvanog francuskog ključa, za koji su izvršene xFEM simulacije. U postupak je uključen i model glave zavrtnja, pri čemu su simulirani radni uslovi. Po površinama kontakta ključa i zavrtnja primenjeni su odgovarajući granični uslovi po pomeranju (slika 1.44). S obzirom na to da je reč o, pre svega, viskoplastičnom materijalu [14], ovde nije naveden konstitutivni model materijala, niti način njegovog definisanja. Dakle, kod aditivno proizvedenih termoplastičnih materijala posebnu pažnju je potrebno posvetiti definisanju viskoplastičnosti i anizotropiji proizvedenog dela, kao karakteristikama koje mogu imati značajan uticaj na njihovo ponašanje u eksploataciji.

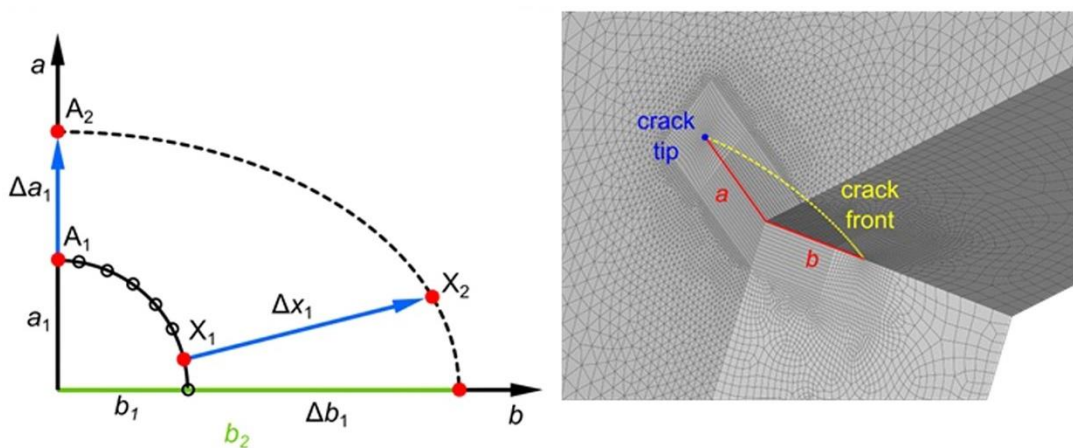


Slika 1.44 Numerički model sa mrežom konačnih elemenata aditivno proizvedenog francuskog ključa sa odgovarajućim modelom glave zavrtnja iz [103].

Vredi naglasiti da su numeričke simulacije u slučaju [103] sprovedene u dva koraka, odnosno primenom 2D modela za simulacije zamornog rasta prsline do 1 mm, nakon čega je analiza nastavljena primenom 3D modela sve do konačnog loma (slika 1.45). Takođe, praćen je oblik rasta prsline od oblika četvrtine kruga u inicijalnom obliku, do formiranja elipsastog profila, koji prethodi ubrzanom procesu rasta prsline do konačnog loma (slika 1.46).

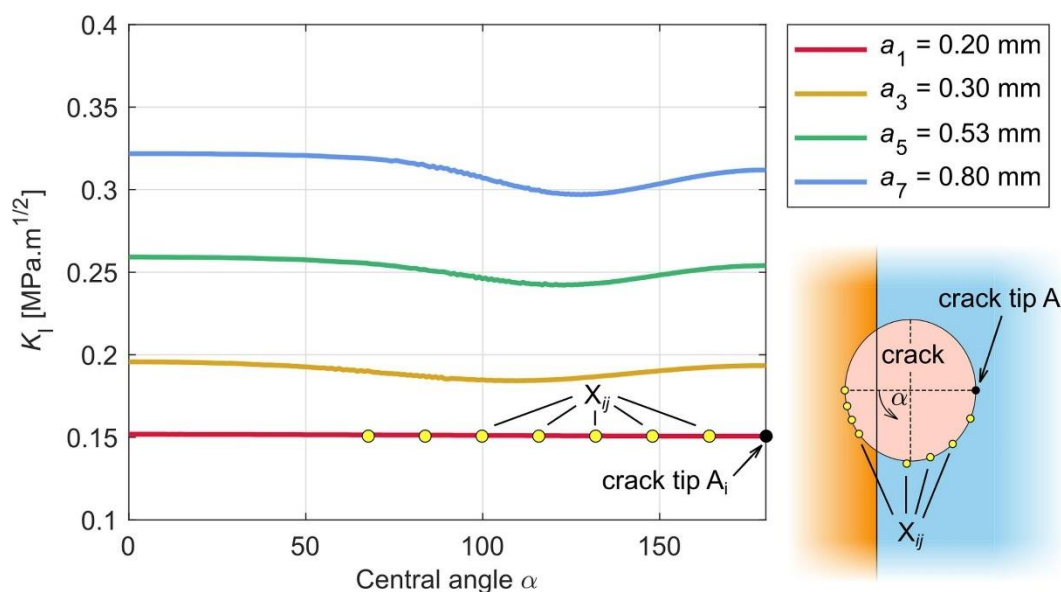


Slika 1.45 Zavisnost maksimalne vrednosti faktora intenziteta napona K_I od dužine rasta prsline za razvijene 2D i 3D modele iz [103].



Slika 1.46 Praćenje razvoja oblika prsline od kružnog ka elipsastom obliku [103].

Zatim je u radu [124] primenjen interesantan postupak praćenja oblika propagirane prsline na osnovu dijagrama zavisnosti faktora intenziteta napona K_I od centralnog ugla, kojim se definiše položaj geometrijske tačke duž fronta prsline (slika 1.47). Vredi naglasiti da ovakve približno konstantne vrednosti kao na slici ukazuju na to da još nije došlo do promene oblika prsline u elipsasti oblik. Kada dođe do odstupanja pojedinačnih vrednosti, ukazuje se na pojavu prethodno opisanog fenomena. Ovakva interpretacija rezultata primenjena je i u ovom istraživanju.



Slika 1.47 Proračunate vrednosti faktora intenziteta napona K_I duž fronta prsline [124].

Za kraj ovog podpoglavlja vredi naglasiti da pored verifikacije numeričkih rezultata odgovarajućim postupkom koji je analogan sa eksperimentalnom, kao što je na primer navedeni slučaj u [61] gde je odnos CTOD i CMOD korišćen za verifikaciju numeričkih rezultata, ne treba izostaviti ni razmatranje konstitutivnog modela materijala. Iako je reč o kvazi-krtom polimernom materijalu (misli se na PLA) potrebno je odgovarajuće obrazložiti primenjeni konstitutivni model materijala, s obzirom na to da on može značajno uticati na tačnost rezultata istraživanja.

1.5. Statističke metode pri analizi rezultata istraživanja

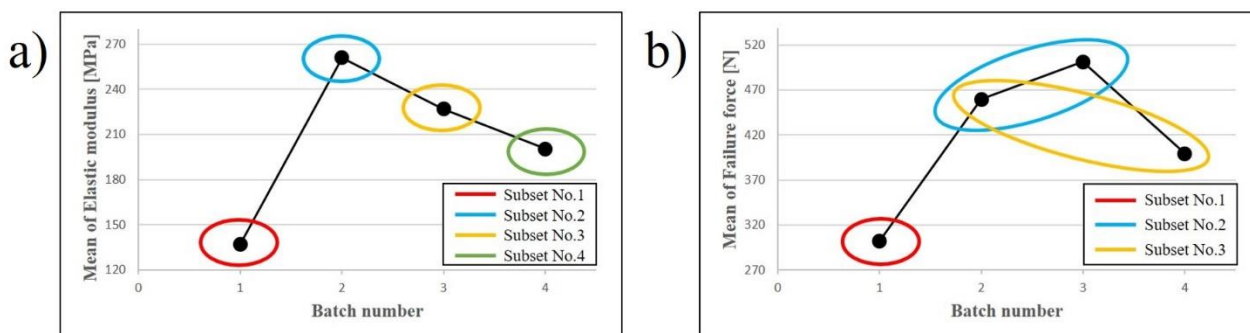
Na kraju ovog poglavlja naglašava se značaj obrade eksperimentalnih i numeričkih rezultata primenom statističkih metoda. Kod analize rezultata mehaničkih ispitivanja, kao i parametara mehanike loma aditivno proizvedenih delova najčešće se primenjuju parametarska analiza varijanse – ANOVA [55,72,125-130], Tagučijeva metoda u planiranju eksperimenta [88,125,127,129], zatim formulisanje regresionih modela za matematički opis ponašanja materijala [126,131-133], kao i Pearsonov koeficijent korelacije radi kvantifikacije linearne zavisnosti između analiziranih parametara [134-137].

Polaznu teorijsku osnovu za ANOVA metodu čini takozvana nulta hipoteza (H_0) koja pretpostavlja odsustvo uticaja posmatranih parametara aditivne proizvodnje na razmatrane mehaničke osobine [125]. Još jedan važan statistički parametar je p -vrednost, koja na osnovu tako izračunate verovatnoće dobijanja eksperimentalnih rezultata, pod pretpostavkom da je H_0 tačna, dalje procenjuje statističku značajnost uticaja razmatranog parametra. Granični nivo značajnosti je postavljen na $\alpha=0.05$ (α – nivo značajnosti), što odgovara riziku od 5% za pravljenje greške, odnosno odbacivanja tačne H_0 hipoteze.

ANOVA pre svega pokazuje da li između razmatranih parametara postoji statistički značajna razlika, dok je u radu [55] pored ANOVA metode primenjen i Tukey post hoc test. Time je omogućeno utvrđivanje razlika između konkretnih grupa, odnosno omogućena je detaljnija procena uticaja parametara aditivne proizvodnje na razmatrane mehaničke osobine.

U ranijim poglavljima je naglašeno da je krutost često zapostavljena mehanička osobina kod aditivno proizvedenih delova, dok je u radu [55] na četiri različite grupe parametara aditivne proizvodnje pokazano da oni imaju najveći uticaj upravo na krutost. Na slici 1.48a se vidi da svaka grupa parametara formira zasebnu homogenu grupu, dok između grupa parametara nije utvrđena sličnost. Kao suprotan primer iz [55] navedena je sila pri lomu (slika 1.48b), kod koje nije utvrđena statistički značajna razlika između analiziranih grupa parametara, odnosno ovde nije uočena izražena varijabilnost rezultata – što je i očekivano.

Navedeni zaključak predstavlja dobru polaznu osnovu za podsećanje na zaključke iz rada [8], prema kojima se ukupno mehaničko ponašanje materijala ne može pripisati isključivo uticaju samo jednog parametra aditivne proizvodnje, već predstavlja rezultat kumulativnog uticaja svih primenjenih parametara. Upravo zbog toga statističke metode imaju značajnu ulogu u analizi rezultata, jer omogućavaju objektivniju procenu uticaja razmatranih parametara na ispitivane osobine materijala.



Slika 1.48 Uticaj parametara aditivne proizvodnje analiziran primenom Tukey post hoc testa za: a) krutost; b) silu pri lomu [55].

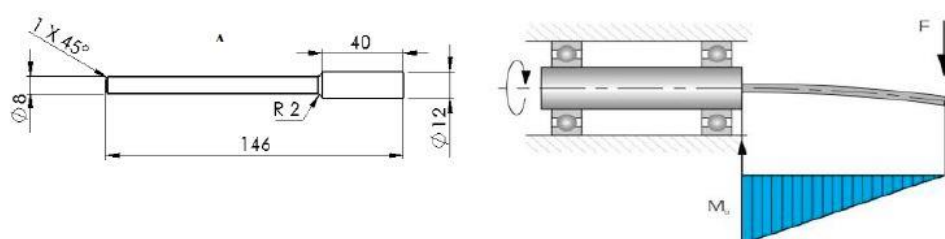
Zatim, regresioni modeli u inženjerstvu se pre svega koriste za matematički opis mehaničkih osobina ili određenih parametara materijala, te se koriste najčešće linearne, kvadratne ili kubne forme jednačine [138,139].

Važan statistički alat je i Pearsonov koeficijent korelacije r koji procenjuje smer i jačinu linearne povezanosti između parametara aditivne proizvodnje i rezultata. Prema [140] vrednosti koeficijenata korelacije r mogu biti:

- Veoma jaka korelacija ($0.8 < |r| < 1.0$);
- Jaka ($0.5 < |r| < 0.8$);
- Umerena ($0.3 < |r| < 0.5$);
- Slaba ($0.1 < |r| < 0.3$);
- Zanemarljiva ($0 < |r| < 0.1$).

Kao dopuna ANOVA postupku, u radu [72] je primenjena i Pearsonova korelacija. Još jedan važan parametar je RMSE (*engl. Root Mean Square Error*), odnosno korenska srednja kvadratna greška, koja je razmatrana u radu [135], a biće primenjena i u ovom istraživanju.

U istraživanju [88] je količina ispune materijala izdvojena kao verovatno najuticajniji parametar aditivne proizvodnje kod PLA materijala, u kojem je analizirana dinamička izdržljivost uzoraka pri zamornom opterećenju. Izgled uzorka i šema uređaja za ispitivanje u [88] dati su na slici 1.49.



Slika 1.49 Izgled uzorka (dimenzije u mm) i šema uređaja za ispitivanje dinamičke izdržljivosti iz [88].

Za optimizaciju broja uzoraka korišćena je Tagučijeva metoda, s obzirom na to da su ispitivanja zamora vremenski veoma zahtevna. U istraživanju [88] su razmatrana četiri parametra aditivne proizvodnje, pri čemu je utvrđen sledeći redosled njihovog uticaja:

1. količina ispune;
2. visina sloja;
3. širina dizne, odnosno debljina niti ekstrudovanog materijala;
4. brzina kretanja mlaznice.

1.6. Definisanje problema, predmet, naučne hipoteze i ciljevi istraživanja

Dosadašnja istraživanja pokazuju da parametri aditivne proizvodnje značajno utiču na mehaničke osobine izrađenih delova, naročito kod polimernih materijala, kod kojih su anizotropija i nehomogenost strukture inače prisutne. Sam proces aditivne proizvodnje dodatno doprinosi pojavi i izraženosti ovih karakteristika. Pri tome, rezultati dostupni u literaturi nisu u potpunosti ujednačeni, što ukazuje na to da ostvarene mehaničke osobine ne zavise isključivo od primenjenih parametara proizvodnje, već i od karakteristika korišćenog materijala i samog uređaja za aditivnu proizvodnju, odnosno uslova pod kojima je deo izrađen.

Iako je uticaj parametara aditivne proizvodnje na mehaničke osobine relativno dobro istražen, njihov uticaj na ponašanje materijala u prisustvu prsline i dalje nije dovoljno razjašnjen. Ovaj problem je posebno izražen pri primeni principa mehanike loma, imajući u vidu da unutrašnja struktura aditivno proizvedenih delova može otežati ispunjavanje uslova i kriterijuma definisanih postojećim metodama ispitivanja. Naime, dostupne metode za određivanje žilavosti loma polimernih materijala, uključujući ASTM D5045 [60] i ASTM D6068 [65], zasnovane su na principima metoda razvijenih za ispitivanje konvencionalnih metalnih materijala, kao što su ASTM E399 [70] i ASTM E1820 [71], respektivno. Njihova primena na aditivno proizvedene polimerne strukture stoga može biti ograničena, naročito zbog njihove specifične unutrašnje strukture, anizotropije i nehomogenosti.

Iako se PLA materijal može smatrati kvazi-krtim materijalom, zbog čega se očekuje mogućnost njegove karakterizacije primenom principa LEML, ispunjavanje odgovarajućih kriterijuma zahtevanih standardom može biti otežano usled specifičnosti njegovog ponašanja i unutrašnje strukture aditivno proizvedenih delova [85]. Posledično, postoji potreba za pažljivom procenom primenljivosti postojećih metoda i kriterijuma na aditivno proizvedene polimerne delove.

U slučajevima kada kriterijumi LEML nisu ispunjeni, procena žilavosti loma mora se zasnivati na principima EPML, što dodatno usložnjava postupak ispitivanja. Prema principima EPML, određivanje žilavosti loma može se sprovesti primenom metode sa više uzoraka ili metode sa jednim uzorkom. Metoda sa više uzoraka podrazumeva ispitivanje većeg broja epruveta pri različitim amplitudama opterećenja, pri čemu se za svaku epruvetu određuje odgovarajući priraštaj prsline, kako bi se konstruisala J - R kriva. Ovakav pristup zahteva veći broj epruveta, dok metoda sa jednim uzorkom podrazumeva složeniju analitičku obradu podataka i može biti osetljivija na odstupanja u određivanju priraštaja prsline. Dodatni problem predstavlja činjenica da su postojeći kriterijumi i postupci, uključujući ASTM E1820 [71], razvijeni prvenstveno za materijale sa relativno homogenom strukturom. Kod aditivno proizvedenih polimernih delova, usled izražene anizotropije, nehomogenosti i specifične unutrašnje strukture, zahtevana ponovljivost odziva epruveta pri različitim amplitudama opterećenja može biti dovedena u pitanje. Pored toga, određivanje priraštaja prsline predstavlja poseban izazov, jer se kod polimernih materijala veoma mali priraštaji prsline mogu teško pouzdano identifikovati na prelomnoj površini. Navedena ograničenja dodatno ukazuju na potrebu za razvojem i primenom odgovarajućih pristupa kojima bi se omogućila pouzdanija karakterizacija otpornosti na lom aditivno proizvedenih delova od PLA polimera.

Imajući u vidu mogućnost primene polimernih materijala u realnim eksploatacionim uslovima, procena zamornog rasta prsline predstavlja važan aspekt njihove karakterizacije. Ovo je posebno značajno kod konstrukcija koje su tokom eksploatacije izložene promenljivim opterećenjima, kakve predstavljaju i ortopedske pločice. Međutim, ispitivanje zamornog rasta prsline na složenim strukturama, poput ortopedskih pločica, može biti ograničeno usled nepostojanja odgovarajućih adaptera i eksperimentalnih konfiguracija koje bi omogućile njihovo ispitivanje u uslovima reprezentativnim za stvarnu primenu. Zbog toga se nameće potreba za karakterizacijom zamornog

rasta prsline na standardizovanim epruvetama, a zatim i za primenu odgovarajućih numeričkih metoda kojima bi se dobijena saznanja mogla preneti na složene geometrije ortopedskih pločica.

Navedeni pristup istovremeno omogućava procenu uticaja parametara aditivne proizvodnje, konkretno visine sloja, na zamorni rast prsline, budući da je za potrebe karakterizacije materijala i određivanja Parisovih koeficijenata ispitivanje izvršeno pri 100% količini ispune. Ovaj aspekt je posebno značajan imajući u vidu ograničenu dostupnost podataka o uticaju parametara aditivne proizvodnje na ponašanje zamornog rasta prsline kod aditivno proizvedenih polimernih delova.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji jeste procena uticaja parametara aditivne proizvodnje na otpornost na lom ortopedskih pločica izrađenih od PLA polimera FDM tehnologijom. Istraživanje je usmereno na karakterizaciju ponašanja materijala u prisustvu prsline kroz određivanje žilavosti loma i karakteristika zamornog rasta prsline, kao i na procenu primenljivosti postojećih metoda mehanike loma na aditivno proizvedene polimerne delove. Posebna pažnja posvećena je uticaju količine ispune i visine sloja na ponašanje materijala pri lomu i zamornom rastu prsline, kao i uticaju unutrašnje strukture na ponašanje prsline kod složenih geometrija ortopedskih pločica. U okviru istraživanja razmatrana je i mogućnost primene optičkih, numeričkih i statističkih metoda za dopunu eksperimentalnih rezultata i pouzdaniju procenu ponašanja aditivno proizvedenih delova.

Na osnovu definisanog problema i predmeta istraživanja postavljene su sledeće naučne hipoteze:

H1: Količina ispune je parametar aditivne proizvodnje koji značajno utiče na otpornost na lom delova izrađenih od PLA polimera, kako kroz vrednosti karakterističnog parametra žilavosti loma, tako i kroz promenu naponskog stanja u okolini vrha prsline, koje određuje mogućnost primene principa LEML ili potrebu za primenom principa EPML. Uticaj količine ispune razmatran je pri tri različite visine sloja, čime je proverena konzistentnost uočene zavisnosti.

H2: Postojeće metode za određivanje žilavosti loma mogu imati ograničenu primenljivost na delove izrađene aditivnom proizvodnjom od PLA polimera zbog njihove anizotropije, nehomogenosti i specifične unutrašnje strukture. Kombinovanjem postojećih analitičkih principa EPML metoda sa numeričkim određivanjem priraštaja prsline, optičkim praćenjem otvaranja prsline primenom metode DIC, analizom odnosa između CMOD i CTOD radi određivanja početka stabilnog rasta prsline, kao i statističkom obradom eksperimentalnih rezultata, moguće je razviti odgovarajući pristup za pouzdano određivanje J - R krivih za delove izrađene aditivnom proizvodnjom od PLA polimera.

H3: Promena visine sloja pri aditivnoj proizvodnji delova od PLA polimera značajno utiče na karakteristike zamornog rasta prsline, pri čemu njen uticaj nije ograničen samo na ostvarene rezultate, već se odražava i na validnost samog ispitivanja. Kod većih visina sloja može doći do rasta prsline u pravcu koji odstupa od očekivanog, što može otežati ispunjavanje uslova i kriterijuma za validnu procenu karakteristika zamornog rasta prsline.

H4: Unutrašnja struktura ortopedskih pločica izrađenih FDM tehnologijom značajno utiče na ponašanje i rast zamorne prsline i ostvareni zamorni vek, pri čemu se primenom statističkih metoda za analizu geometrijskih karakteristika unutrašnje strukture i analizom raspodele K_I duž fronta prsline, određene numeričkim simulacijama, može proceniti njen uticaj na ponašanje zamorne prsline.

Cilj istraživanja je ispitivanje uticaja parametara aditivne proizvodnje na otpornost na lom PLA polimera i ortopedskih pločica izrađenih od ovog materijala, razvoj pouzdanijeg pristupa za određivanje J - R krivih, karakterizaciju zamornog rasta prsline i procenu uticaja unutrašnje strukture ortopedskih pločica na njihovo ponašanje pri zamoru.

2. Analitičke osnove i pristupi ispitivanju otpornosti na lom aditivno proizvedenih delova

U ovom poglavlju predstavljene su analitičke osnove i teorijski principi eksperimentalnog ispitivanja i numeričkih simulacija primenjenih u ovom istraživanju. S obzirom na to da su u istraživanju primenjeni principi linearno-elastične mehanike loma (LEML) i elasto-plastične mehanike loma (EPML), analiziran je i zamorni rast prsline prema Parisovoj jednačini, zatim je primenjena metoda korelacije digitalnih slika (DIC), kao i numeričke simulacije primenom konvencionalne metode konačnih elemenata (MKE) i proširene metode konačnih elemenata (xFEM), uz primenu odgovarajućih statističkih metoda. U nastavku su analitičke i teorijske osnove navedenih pristupa predstavljene kroz sledeća podpoglavlja:

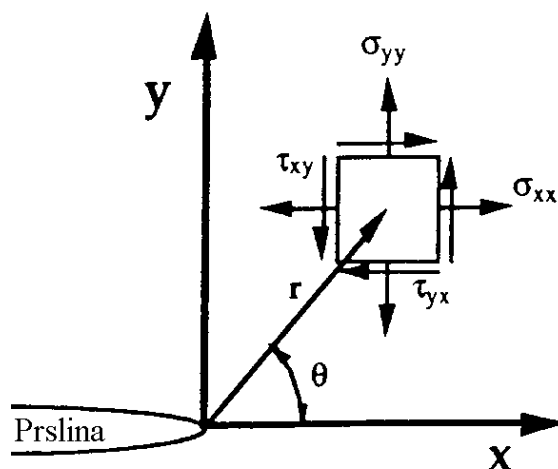
- Principi LEML;
- Principi EPML;
- Zamorni rast prsline prema Parisovoj jednačini;
- Metoda korelacije digitalnih slika (DIC);
- Osnove MKE i xFEM;
- Osnove ANOVA, višestruke linearne regresije i Pearsonovog koeficijenta korelacije.

2.1. Principi LEML

U prethodnom poglavlju naglašen je značaj poznavanja naponskog stanja u okolini vrha prsline za analizu loma. Ukoliko je ponašanje materijala izotropno i linearno-elastično, naponsko stanje u okolini vrha prsline može se izraziti sledećom jednačinom (2.1):

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (2.1)$$

Pri tome je σ_{ij} tenzor napona, k je konstanta, dok su r i θ polarne koordinate, a funkcija $f_{ij}(\theta)$ je bezdimenziona. Sa približavanjem vrhu prsline, odnosno kada $r \rightarrow 0$, prvi član jednačine teži beskonačnosti, dok ostali članovi postaju zanemarljivi u poređenju sa njim. Prikaz komponenti napona u okolini vrha prsline u odnosu na koordinatne ose dat je na slici 2.1 [58].



Slika 2.1 Komponente napona u okolini vrha prsline u odnosu na koordinatne ose [58].

Dakle, u neposrednoj okolini vrha prsline napon je proporcionalan članu $1/\sqrt{r}$, dok k i $f_{ij}(\theta)$ zavise od vrste opterećenja. Naime, na ovaj način se uvodi faktor intenziteta napona K , definisan kao (2.2):

$$K = k\sqrt{2\pi} \quad (2.2)$$

Za različite oblike razvoja prsline (slika 1.15), faktor intenziteta napona K se definiše kao K_I , K_{II} i K_{III} (2.3-5):

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \quad (2.3)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta) \quad (2.4)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta) \quad (2.5)$$

Važno je naglasiti da su K_I , K_{II} i K_{III} međusobno nezavisni, odnosno da se njihove vrednosti ne mogu međusobno sabirati, kao što je prikazano u (2.6) [42]:

$$K_{ukupno} \neq K_I + K_{II} + K_{III} \quad (2.6)$$

Kao što je naglašeno pri opisu slike 1.15, najopasniji lomovi nastaju u I obliku razvoja prsline, kada se površine prsline otvaraju (cepaju) pod dejstvom normalnog napona σ . Sledeće, kada je polarni ugao $\theta=0$ (slika 1.18a) imamo čisto otvaranje prsline pod dejstvom normalnog napona bez uticaja smicajnih napona (2.7):

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.7)$$

Iz izraza (2.7) je jasno da je K proporcionalan naponskom stanju u okolini vrha prsline, odnosno da se njime definiše amplituda naponskog singulariteta $1/\sqrt{r}$ [42,58]. Njegova jedinica je $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Ovaj izraz ujedno ukazuje na vrstu prsline ($\theta=0$) koja je od značaja za ovo istraživanje.

U realnim problemima uticaj dužine prsline a se uzima u obzir preko izraza datog jednačinom (1.1). Geometrijski faktor Y ne figuriše u jednačini (1.1), odnosno jednak je jedinici, samo u slučaju beskonačne ploče sa centralnom prslinom, što predstavlja osnovni zamišljeni oblik u mehanici loma. Kod tela beskonačnih dimenzija sa ivičnom prslinom (slika 1.16a), vrednost ovog faktora je konstantna, te izraz za K_I ima oblik (2.8):

$$K_I \approx 1,12\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

Pri tome geometrijski faktor Y u ovom slučaju zavisi samo od vrste i položaja prsline, dok kod tela konačnih dimenzija, što predstavlja realan slučaj (slika 1.16b – C(T) epruveta), zavisi i od odnosa veličine prsline i dimenzije tela u pravcu rasta prsline. Kod C(T) epruvete ova dimenzija tela je širina – W , tako da za telo konačnih dimenzija sa ivičnom prslinom važi polinomska relacija (2.9):

$$Y(a/W) = 1,12 - 0,26(a/W) + 10,52(a/W)^2 - 21,66(a/W)^3 - 30,31(a/W)^4 \quad (2.9)$$

U inženjerskoj praksi vrednosti $Y(a/W)$ se određuju na osnovu tabelarnih vrednosti datih u priručnicima ili standardima. Za ispitivanje polimernih materijala merodavan je standard ASTM D5045 [60], u kojem su ove vrednosti date tabelarno.

Kritična vrednost faktora intenziteta napona K_I predstavlja osobinu materijala samo u slučaju obezbeđenog RSD, jer se jedino tada može zanemariti uticaj plastičnih deformacija. U tom slučaju dobija se jednoznačna vrednost K , što je prikazano na slici 1.17b. Uslov za uspostavljanje RSD je dovoljna debljina uzorka, čija se procena vrši prema jednačini (2.10) [58]:

$$t_{min} \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.10)$$

Gde je t_{min} minimalna potrebna debljina uzorka za uspostavljanje RSD, K_Q je kondicionalna vrednost K , a σ_{YS} je napon tečenja. Ukoliko je ovaj uslov ispunjen, tada važi (2.11):

$$K_Q = K_{IC} \quad (2.11)$$

Još jedan važan uslov koji propisuje standard ASTM D5045 [60] odnosi se na vrednosti sile koja se koristi u proračunu, a koja prema definisanom kriterijumu mora biti u dozvoljenim granicama u blizini linearnog dela krive sila-pomeranje. Ukoliko ovaj uslov nije ispunjen (biće detaljnije objašnjeno u poglavlju koje se odnosi na metodologiju ispitivanja), izračunata vrednost žilavosti loma K_{IC} ne može se smatrati validnom, čak iako je obezbeđeno RSD.

Važno je naglasiti za (2.10) da kod polimernih materijala ne postoji fenomen tečenja, te standard za ispitivanje na zatezanje ISO 527-2 [141] precizira da ukoliko se zahteva ova vrednost, umesto nje uzima vrednost zatezne čvrstoće σ_m .

Ovi principi LEML su relativno jednostavni za tumačenje, ali ne omogućavaju opis ponašanja materijala u uslovima izraženijih plastičnih deformacija u okolini vrha prsline (slike 1.22b i 1.22c). Neka od rešenja za proširenje LEML u uslovima izraženijih plastičnih deformacija su [42,58]:

- Irvinova korekcija poluprečika plastične zone r_p (slika 1.18b);
- Model trake popuštanja prema Dagdejlju (slika 1.18c).

Irvinova korekcija poluprečnika plastične zone definiše dve relacije u zavisnosti od naponskog stanja u okolini vrha prsline (2.12 i 2.13) [58]:

$$r_p = 2r_y = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad \text{za RSN} \quad (2.12)$$

$$r_p = 2r_y = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad \text{za RSD} \quad (2.13)$$

Kod modela trake popuštanja prema Dagdejlju uvodi se efektivna dužina prsline a_{eff} , koja predstavlja dopunu Irvinovog pristupa i određuje se prema relaciji (2.14):

$$a_{eff} = a + r_y \quad (2.14)$$

Ili u svom izvornom obliku (2.15):

$$a_{eff} = a + \rho \quad (2.15)$$

Gde je ρ dužina plastične zone (slika 1.18c) [42].

2.2. Principi EPML

Prvi parametar koji je uveden u EPML je otvaranje vrha prsline (CTOD) – slika 1.19a, koji je pre svega iskustveni parametar, ali je pronašao svoju primenu u objašnjenju principa EPML.

Prve matematičke relacije ovog parametra uzimaju u obzir oblast ograničenog tečenja (SSY) u okolini vrha prsline i Irvinovu korekciju (2.16), druga relacija uključuje model trake popuštanja prema Dagdeju (2.17), čime se uspostavlja veza između K_I i CTOD:

$$\delta_t = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} E} \quad (2.16)$$

$$\delta_t = \frac{8\sigma_{YS} a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_{YS}} \right) \quad (2.17)$$

Ovde je δ_t označeno kao otvaranje vrha prsline CTOD [58]. Pored CTOD-a u inženjerskoj praksi se meri i otvaranje na mestu vrha zereza (CMOD), pri čemu se jednostavniji oblik odnosa ova dva parametra može definisati primenom metode šarke (slika 1.19c) uz pomoć relacije (2.18):

$$\delta_t = \frac{r(W-a)V}{r(W-a)+a} \quad (2.18)$$

Na slici 1.19c CMOD je označen sa V . Ovaj osnovni model šarke odnosi se na plastičnu komponentu (δ_{pl}) dok proširena relacija obuhvata i elastičnu komponentu, datu relacijom (2.19):

$$\delta_t = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I^2}{m\sigma_{YS} E} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a)+a} \quad (2.19)$$

Indeks „p” u prethodnoj jednačini ukazuje na to da je reč o parametru koji uzima u obzir plastičnost [42].

Značajniji EPML parametar je J -integral koji se kao lokalni parametar (slika 1.21a) definiše u obliku konturnog integrala (2.20):

$$J = \oint_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (2.20)$$

Gde je W gustina energije deformacije (2.21):

$$W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2.21)$$

A T_i tenzor napona (2.22):

$$T_i = \sigma_{ij} n_j \quad (2.22)$$

Ostale komponente jednačine su:

- Γ – putanja integracije;
- ds – inkrement dužine luka;
- u_i – pomeranje;
- n_i – normala na konturu Γ [42].

Prema ovom tumačenju, J integral predstavlja razliku između spoljašnjeg rada i promene unutrašnje potencijalne energije unutar zadate konture koja zatvara zonu oko vrha prsline [62,96].

Nelinearna Ramberg-Osgood-ova relacija za konstitutivni opis materijala predstavlja teorijsku osnovu za tumačenje nelinearno-elastičnog polja napona i deformacija oko vrha prsline, a data je relacijom (2.23):

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2.23)$$

Gde su:

- σ_0 – referentni napon;
- ε_0 – referentna deformacija;
- α – bezdimenziona konstanta;
- n – eksponent.

Dakle, HRR polje je zasnovano na Ramberg-Osgood-ovoj jednačini (slika 1.22b), a opisuje polje napona kompleksnom relacijom (2.24):

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(n, \theta) \quad (2.24)$$

Kao i polje deformacije (2.25):

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{\varepsilon}_{ij}(n, \theta) \quad (2.25)$$

Gde je najvažnije istaći integracionu konstantu I_n . Kao energetski parametar, J -integral definiše potrebnu energiju za ostvarivanje inkrementalnog rasta prsline (slika 1.21b), određen osnovnom relacijom (2.26):

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2.26)$$

Gde je B debljina uzorka [62].

Na slici 1.21b svetlosivo je osenčena površina ispod krive sila-pomeranje za inkrementalni rast prsline da , ograničena vrednostima sile P i pomeranja Δ . Naime, J integral se na osnovu energetskog kriterijuma može izraziti na dva načina relacijom (2.27):

$$J = \int_0^P \left(\frac{d\Delta}{da} \right)_P dP = - \int_0^\Delta \left(\frac{dP}{da} \right)_P d\Delta \quad (2.27)$$

Iako je ova formulacija J integrala zasnovana na deformacionoj teoriji plastičnosti, za slučajeve ograničenog tečenja postoji direktna veza između J integrala i faktora intenziteta napona K , izražena jednačinom sa slučaj RSN (2.28):

$$J = \frac{K^2}{E} \quad (2.28)$$

Odnosno, za slučaj RSD (2.29) [42,58,64]:

$$J = \frac{(1-\nu^2)}{E} K^2 \quad (2.29)$$

Gde je ν Poasonov koeficijent.

Pri izračunavanju J integrala najčešće se u praksi koristi formula (2.30), koja razdvaja elastičnu (J_{el}) i plastičnu (J_{pl}) komponentu:

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{K^2 (1 - \nu^2)}{E} + \frac{\eta_{pl} U_{pl}}{B b_0} \quad (2.30)$$

Gde su:

- U_{pl} – energija plastičnog dela ispod krive sila-pomeranje (slika 1.23a);
- η_{pl} – faktor plastičnosti (za SENB: $\eta_{pl} = 2$; za C(T): $\eta_{pl} = 2 + 0.522(b_0/W)$);
- b_0 – dužina ligamenta.

Donji član razlomka plastične komponente ($B \cdot b_0$) jasno ukazuje na to da se proračun odnosi na površinu preostalog poprečnog preseka (ligamenta) ispred vrha prsline, dok se iz cele komponente J_{pl} nedvosmisleno vidi da je jedinica za J integral $J \cdot m^2$.

Relacija (2.30) se pre svega primenjuje na metalne materijale, dok se kod polimernih materijala ukupni J integral određuje prvo za slučaj bez rasta prsline, odnosno u trenutku inicijacije rasta prsline, prema relaciji (2.31) [65]:

$$J_0 = \frac{\eta U}{B(W - a_0)} \quad (2.31)$$

Gde su:

- J_0 – kritična vrednost J integrala u trenutku inicijacije prsline;
- η – bezdimenzioni faktor (za SENB: $\eta = 2$);
- U – ukupna energija potrebna za rast prsline korigovana za vrednost indentacije;
- a_0 – početna dužina prsline.

Važno je naglasiti da se vrednost U dobija kao razlika između ukupne energije ispod krive sila-pomeranje (U_{total}) i energije indentacije (U_{ind}), prema relaciji (2.32):

$$U = U_{total} - U_{ind} \quad (2.32)$$

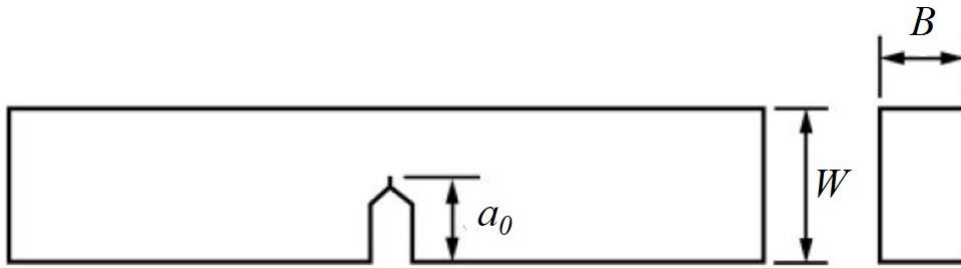
Naime, pri ispitivanju polimernih materijala dolazi do uleganja (indentacije) uzorka na mestu kontakta između polimernog materijala i metalnog alata. Budući da pri izračunavanju J integrala treba uzeti u obzir samo energiju povezanu sa stvaranjem prsline, ukupna energija određena kao površina ispod krive sila-pomeranje mora biti korigovana [64,96].

Konačno, za izračunavanje J integrala neophodno je izvršiti korekciju vrednosti J_0 za ostvareni rast prsline, prema relaciji (2.33):

$$J = J_0 \left[1 - \frac{(0.75\eta - 1)\Delta a}{W - a_0} \right] \quad (2.33)$$

Gde je Δa priraštaj dužine prsline. Pri konstrukciji J - R krivih treba imati u vidu da priraštaj dužine prsline ne sme premašiti 10% dužine ligamenta, jer nakon toga J integral više nije važeći parametar za kvantifikaciju amplitude naponskog stanja. Dakle, maksimalna vrednost priraštaja dužine prsline Δa_{max} ne sme biti veća od vrednosti $0.1(W - a_0)$.

Važno je imati u vidu da se početna dužina prsline a_0 meri od vrha zareza epruvete do vrha prsline (slika 2.2) [60,65].



Slika 2.2 Izgled SENB epruvete prema standardima ASTM D5045 i D6068 sa naglašenim karakterističnim geometrijskim parametrima [60,65].

Pri konstrukciji J - R krivih prema metodi sa više uzoraka svaki uzorak predstavlja jednu tačku na krivoj (slike 1.23, 1.24 i 1.33), na osnovu kojih se konstruiše J - R kriva sledeće zavisnosti (2.34):

$$J = C_1 \Delta a^{C_2} \quad (2.34)$$

Gde su C_1 i C_2 bezdimenzioni koeficijenti [42,58,62]. Iz ove jednačine eksponencijalne zavisnosti jasno je da C_1 predstavlja amplitudu, odnosno određuje visinu krive, dok eksponent C_2 određuje njenu zakrivljenost, odnosno nagib J - R krive. Važan uslov koji konstruisana J - R kriva mora da ispuni odnosi se na eksponent C_2 i dat je relacijom (2.35):

$$C_2 < 1 \quad (2.35)$$

Iz relacije (2.35) proizilazi karakterističan oblik J - R krive (slike 1.23, 1.24 i 1.33). Zatim, efekat zatupljenja se opisuje na istom dijagramu i ima sledeću linearnu relaciju (2.36):

$$J = m \sigma_{ys} \Delta a \quad (2.36)$$

Usvojeno je da vrednost konstante m iznosi 2 za RSD, odnosno 1 za RSN [71]. Kako je već naglašeno u prethodnom poglavlju, kritična vrednost J_{IC} određuje se na osnovu preseka J - R krive, date relacijom (2.34) i linije zatupljenja (2.36) pomerene za 0.2 mm. Budući da J_{IC} odgovara početku stabilnog rasta prsline, odnosno predstavlja jednu od najbližih vrednosti J integrala K -dominantnoj zoni, vrednost J_{IC} se može preračunati u vrednost K_{IC} primenom relacije (2.29), pri čemu relacija glasi (2.37):

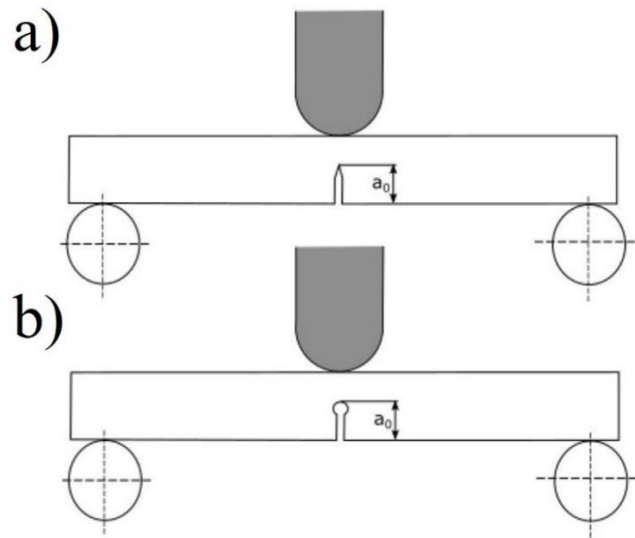
$$K_{J_{IC}} = \sqrt{\frac{E J_{IC}}{(1 - \nu^2)}} \quad (2.37)$$

Gde je $K_{J_{IC}}$ ekvivalentna vrednost faktora intenziteta napona za kritičnu vrednost J_{IC} [42,62,64,96].

Prednost metode sa jednim uzorkom, pored manjeg potrebnog broja uzoraka u odnosu na metodu sa više uzoraka, ogleda se u mogućnosti indirektnog određivanja trenutka početka stabilnog rasta prsline. Radi podsećanja, u prethodnom poglavlju je naglašeno da kod metode sa više uzoraka priraštaj dužine prsline se određuje optičkim merenjem na prelomnoj površini svakog pojedinačnog uzorka. Naime, mogućnost pojave greške pri optičkom merenju priraštaja prsline na prelomnoj površini uzorka naročito je izražena kod polimernih materijala u poređenju sa metalima [64,66].

Pošto metoda sa jednim uzorkom nije predmet ovog istraživanja, u nastavku će biti prikazane samo njene analitičke osnove za procenu trenutka početka stabilnog rasta prsline.

Podsećanja radi, metoda sa jednim uzorkom koristi dva tipa uzorka, jedan na kojem je unesena inicijalna prslina i drugi uzorak sa zatupljenim vrhom zareza (slika 2.3).



Slika 2.3 Izgled epruveta za ispitivanje metodom sa jednim uzorkom: a) epruveta sa iniciranim prslinom; b) epruveta sa zatupljenim vrhom zareza [64].

Naime, pri ispitivanju obe vrste epruveta, sila P se posmatra kao funkcija dužine prsline a i plastičnog pomeranja v_{pl} , pri čemu je ta zavisnost izražena preko geometrijske funkcije G i deformacione funkcije H , date u osnovnom obliku (2.38):

$$P = G\left(\frac{a}{W}\right) H\left(\frac{v_{pl}}{W}\right) \quad (2.38)$$

Vrednost plastičnog pomeranja v_{pl} dobija se kao razlika između ukupnog pomeranja v i elastičnog pomeranja v_{el} , koje se određuje kao proizvod sile P i elastične komplijanse C , date relacijom (2.39):

$$v_{pl} = v - v_{el} = v - CP \quad (2.39)$$

Sledeći korak metode je proračun parametra razdvajanja opterećenja S_{sb} , koji predstavlja odnos vrednosti sila u epruveti sa iniciranim prslinom i epruveti sa zatupljenim vrhom zareza za svaku vrednost plastičnog pomeranja v_{pl} , a dat je u osnovnom obliku relacijom (2.40):

$$S_{sb}(v_{pl}) = \frac{P_s}{P_b} \bigg|_{v_{pl}} \quad (2.40)$$

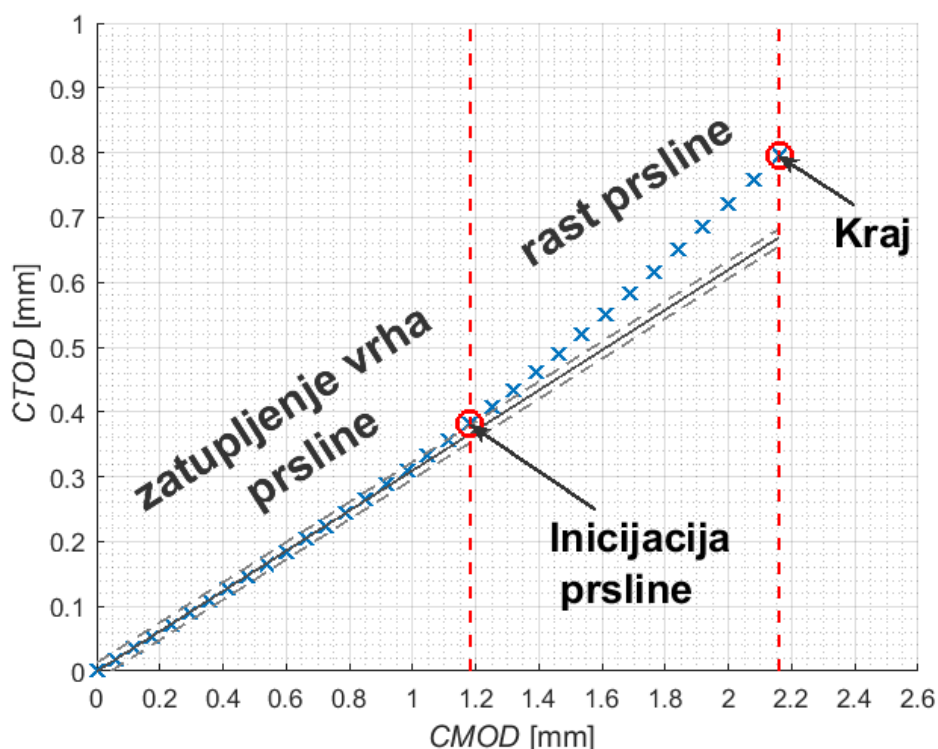
Pri čemu indeks „s” označava uzorak sa iniciranim, oštrom prslinom (*engl. sharp*), dok indeks „b” označava uzorak sa zatupljenim (tupim) vrhom zareza (*engl. blunt*).

U ovoj metodi od primarnog značaja je epruveta sa iniciranim prslinom, dok epruveta sa zatupljenim vrhom zareza služi za analitičko poređenje. U okviru metode konstruiše se dijagram prikazan na slici 1.25, koji obuhvata tri karakteristične oblasti. Prva oblast je nestabilna i ne pruža relevantne podatke za analizu. Druga oblast odgovara periodu zatupljenja vrha prsline u epruveti sa iniciranim prslinom. Treću oblast, a naročito njen početni deo, karakteriše značajan pad vrednosti sile u epruveti sa prslinom u odnosu na epruvetu sa zatupljenim vrhom zareza, što ukazuje na početak procesa stabilnog rasta prsline [64,66,96].

Poput metode sa jednim uzorkom, u ovom istraživanju se predlaže postupak za određivanje trenutka početka stabilnog rasta prsline nakon završenog procesa zatupljenja oko njenog vrha. Naime, veličine CMOD i CTOD mere isti fenomen i zasnivaju se na pretpostavci da otvaranje prsline nastaje usled stvaranja novih površina prsline tokom njenog rasta, kako je prvobitno definisao Vels [42].

Za procenu stanja prsline neophodno je koristiti lokalne parametre, kao što su CMOD i CTOD. Iako odziv materijala, praćen dijagramom sila-pomeranje, može ukazati na promenu ponašanja materijala prelaskom iz linearne u nelinearnu zavisnost, globalni odziv nije dovoljan parametar za precizno određivanje stanja prsline. Iako prve formulacije metode šarke (2.18) predviđaju matematičku zavisnost između CMOD i CTOD, u radu [80] (slika 1.35) se uočava da prvo odstupanje eksperimentalnih rezultata od rezultata MKE zapravo ukazuje na trenutak kada CTOD počinje brže da raste od CMOD. U navedenom radu taj trenutak opisan je kao početak duktilnog kidanja (*engl. ductile tearing*). Zanimljivo je da rezultati ovog istraživanja pokazuju da uzorci svih konfiguracija ispoljavaju nelinearan odnos između CMOD i CTOD u trenucima kada se može očekivati početak stabilnog rasta prsline (slika 2.4).

Pretpostavkom da je trenutak početka stabilnog rasta prsline poznat, može se nastaviti sa metodologijom metode sa više uzoraka primenom jednačina (2.31) i (2.33) radi konstrukcije J - R krive na osnovu jednačine (2.34) i linije zatupljenja (2.36), kao i određivanja kritične vrednosti J integrala – J_{IC} . Nakon toga sledi proračun vrednosti K_{JIC} i njeno poređenje sa validnim vrednostima K_I dobijenim u istraživanju.



Slika 2.4 Predložena metoda određivanja trenutka početka stabilnog rasta prsline na osnovu dijagrama zavisnosti CMOD i CTOD.

2.3. Zamorni rast prsline prema Parisovoj jednačini

Rast zamorne prsline od trenutka inicijacije do konačnog loma obuhvata tri karakteristične oblasti na dijagramu dvostruke logaritamske zavisnosti brzine rasta prsline da/dN od opsega ΔK (slika 1.27).

Prva oblast predstavlja oblast praga zamornog rasta prsline ΔK_{th} (*engl. threshold*), ispod koje se zamorni rast ne dešava. Drugu oblast karakteriše stabilan rast prsline i ona na slici 1.27 zauzima linearni deo krive. Ovaj deo je od posebnog značaja za procenu zamornog rasta prsline, jer obuhvata najveći deo preostalog radnog veka dela ili konstrukcije, a opisuje se Parisovom jednačinom [67], za koju važi relacija (2.41):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2.41)$$

Gde su C i m koeficijenti. Vrednost koeficijenta C tipično je reda veličine od 10^{-13} do 10^{-7} , dok se vrednost eksponenta m kreće između 2 i 4 za metalne materijale, odnosno između 3 i 5 za polimerne materijale [142]. U jednačini (1.2) pokazano je da ova formulacija ne zavisi samo od ΔK , već i od asimetrije opterećenja R , koja predstavlja odnos minimalne i maksimalne vrednosti K ($K_{\min}$ i $K_{\max}$) u ciklusu opterećenja (slika 1.26), data relacijom (2.42):

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2.42)$$

Dok za opseg faktora intenziteta napona ΔK važi relacija (2.43):

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2.43)$$

Još jedna važna relacija za procenu zamornog rasta prsline je izraz za određivanje broja ciklusa N , koji je izveden iz relacije (2.41) i predstavljen relacijom (2.44):

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C \Delta K^m} da \quad (2.44)$$

Gde je a_f kritična dužina prsline pri kojoj dolazi do nestabilnog rasta prsline, odnosno reč je o dužini prsline na kraju druge oblasti, odnosno na početku treće oblasti zamornog rasta prsline [42,143,144].

Pored Parisove jednačine, u literaturi se mogu naći i druge jednačine za opis zamornog rasta prsline:

- Formanova jednačina – opisuje drugu i treću oblast;
- Klesnil-Lukašova jednačina – opisuje prvu i drugu oblast;
- Vokerova (Walker) jednačina – opisuje drugu i treću oblast;
- NASGRO jednačina – opisuje sve tri oblasti [42,145].

Iako Parisova jednačina opisuje samo jednu oblast zamornog rasta prsline, ona se i dalje široko primenjuje zbog svoje jednostavnosti. Ova karakteristika predstavlja značajnu prednost pri ispitivanjima zamornog rasta prsline, koja su po svojoj prirodi vremenski zahtevna, jer jednostavniji matematički model omogućava efikasniju obradu i analizu podataka prikupljenih tokom dugotrajnih ispitivanja [143-145].

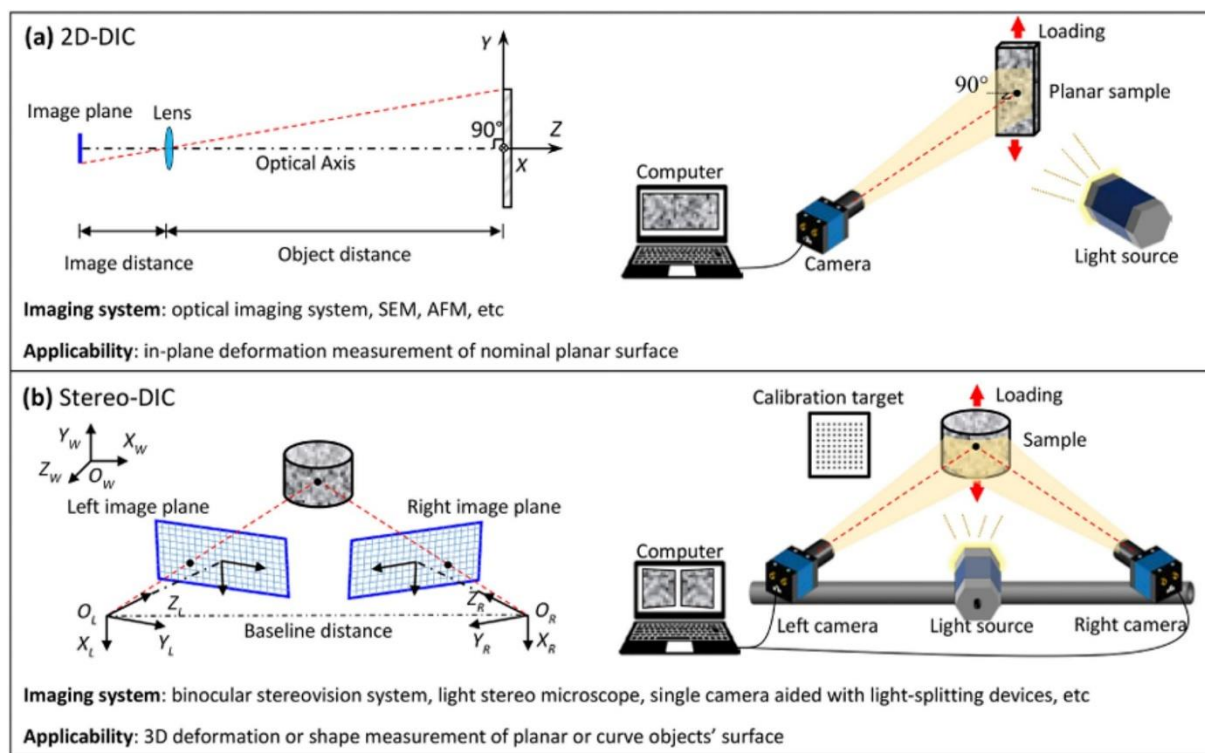
2.4. Metoda korelacije digitalnih slika (DIC)

Metoda korelacije digitalnih slika (DIC) trenutno predstavlja jednu od najkorišćenijih metoda za optičko merenje pomeranja i deformacija na osnovu sukcesivnog beleženja slika predmeta od interesa. Njena primena, pored određivanja polja pomeranja i deformacija, u mehanici loma omogućava prevazilaženje problema povezanih sa primenom kontaktnih mernih metoda, kao što su merne trake koje se koriste za merenje otvaranja vrha prsline [146-148], čiji je uticaj na rezultate merenja pomenut u prethodnom poglavlju. Dodatna prednost primene beskontaktnih optičkih metoda ogleda se u mogućnosti merenja na širem području u odnosu na kontaktne metode.

Rani razvoj metode obuhvata njeno uvođenje od strane Petersa i Ransona 1982. godine, nakon čega se DIC tokom naredne dve decenije razvijao kroz unapređenje algoritama i teorijskih osnova. U tom periodu uvedeni su kriterijumi unakrsne korelacije (*engl. cross-correlation criterion*, NCC) i Njtn-Rapsonove (NR) metode, sa ciljem poboljšanja efikasnosti i tačnosti DIC metode [149].

Danas se primenjuju različite metodologije među kojima su 2D DIC, 3D DIC i digitalna korelacija zapremine (*engl. Digital Volume Correlation – DVC*). Najšire korišćena je lokalna DIC metoda zasnovana na podskupovima (*engl. subset-based local DIC*), dok postoji i globalna DIC metoda zasnovana na MKE. Lokalna DIC metoda podrazumeva podelu područja od interesa (*engl. Region of Interest*, ROI) na niz nezavisnih podskupova (*engl. subsets*), pri čemu se oblik i položaj svakog podskupa prati radi određivanja polja pomeranja (*engl. full-field displacement*) [149,150].

Danas se DIC metoda primenjuje u ispitivanju različitih materijala, uključujući polimere, metale, stene i biološka tkiva. Poseban značaj ima pri proceni integriteta konstrukcija, kao i kod aditivno proizvedenih delova, koji su najčešće nehomogeni i anizotropni. Pri primeni DIC potrebno je uzeti u obzir faktore koji mogu uticati na tačnost rezultata, kao što su defleksija i distorzija signala [149,151, 152]. 2D DIC metoda se najpravilnije koristi za ravanske probleme, dok 3D DIC pruža mogućnost analize i zakrivljenih površina (slika 2.5). Obe pomenute metode su korišćene u ovom istraživanju.



Slika 2.5 Šematski prikaz: a) 2D DIC metode za ravne uzorke; b) 3D DIC metode za zakrivljene površine [152].

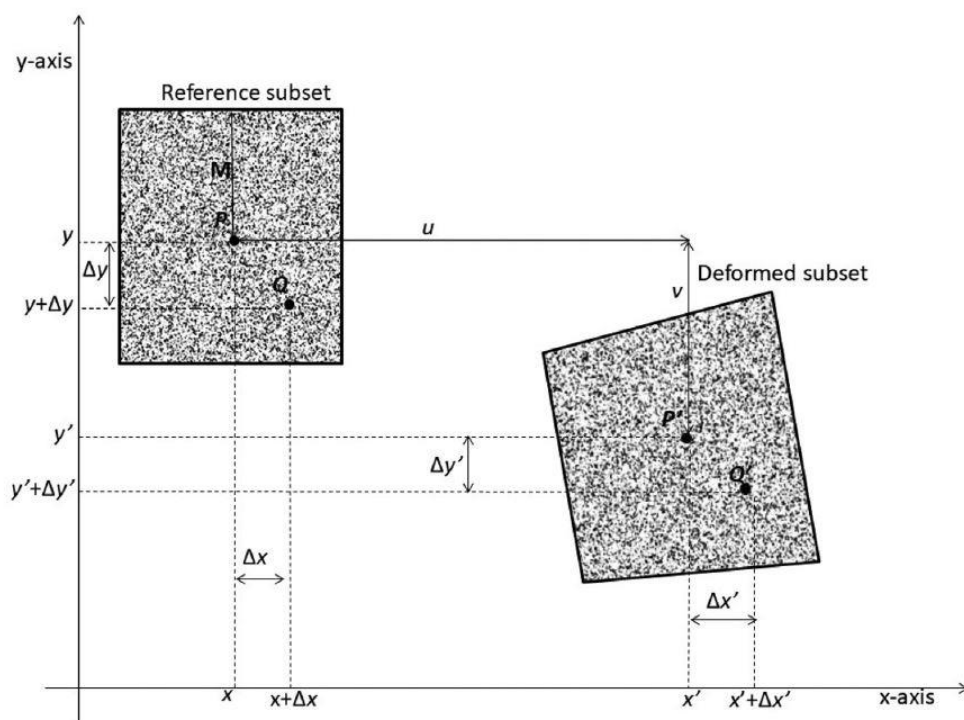
Primena DIC metoda obuhvata tri osnovna koraka:

- Formiranje stohastičke šare na površini uzorka, nanošenjem boje u dva sloja (najpre bela boja nakon čega se nanosi crna tačkasta šara) [153];
- Kalibraciju uređaja, kojom se ispravljaju distorzije i obezbeđuje slika odgovarajućeg kvaliteta, sa minimalnim šumom, pogodna za preciznu analizu podataka;
- Određivanje polja pomeranja i deformacija, pri čemu se DIC algoritmi koriste za proračun deformacija na celom posmatranom području (*engl. full-field displacement*) [149].

DIC metode najčešće analiziraju slike u sivim tonovima (*engl. grayscale*), koje omogućavaju bolji kontrast u odnosu na snimke u boji (*engl. color imaging*) [152].

Pri primeni DIC metode neophodno je definisati odgovarajući korelacioni kriterijum, koji matematički poredi distribuciju intenziteta sivoće između referentnog (nedeformisanog) i deformisanog stanja podskupa – slika 2.6 [152]. Među korelacionim kriterijumima se izdvajaju kriterijum sume kvadratnih razlika (*engl. Sum of Squared Differences – SSD*) i njegova normalizovana varijanta (*engl. Normalised SSD – NSSD*), koje su računski efikasne i brze za obradu podataka, ali su manje pouzdane u odnosu na robusniji nulto-normalizovani kriterijum (*engl. Zero-Normalised SSD – ZNSSD*) [150,151].

U mehanici loma, DIC metoda se koristi za određivanje otvaranja vrha prsline (COD) praćenjem relativnog pomeranja između dve virtuelne merne tačke postavljene na ivicama zareza u slučaju CMOD, odnosno iniciranog vrha prsline u slučaju CTOD. Pri ispitivanju zamornog rasta prsline primenom 2D DIC metode, priraštaj dužine prsline (Δa) se određuje praćenjem položaja vrha prsline u funkciji broja ciklusa, uz primenu kalibracione skale za prevođenje dimenzija iz piksela u milimetre [79]. Takođe, interesantna je mogućnost primene virtuelnih mernih traka pomoću kojih je moguće proceniti pravac rasta prsline na osnovu deformacija okolnog materijala zahvaćenog mernim trakama, što će biti detaljnije objašnjeno u narednom poglavlju.



Slika 2.6 Primer referentnog (nedeformisanog) podskupa i odgovarajućeg deformisanog [150].

2.5. Osnove MKE i xFEM

Metoda konačnih elemenata (MKE) se zasniva na diskretizaciji kontinuuma na konačan broj međusobno povezanih elemenata. Ponašanje svakog elementa opisuje se pomoću nepoznatih veličina definisanih u čvorovima, pri čemu se povezivanje susednih elemenata ostvaruje preko zajedničkih čvorova. Na ovaj način, polazni fizički problem opisan sistemom parcijalnih diferencijalnih jednačina, nakon definisanja osobina materijala, opterećenja i graničnih uslova, svodi se na sistem algebarskih jednačina čijim se rešavanjem dobija aproksimativno rešenje posmatranog problema [148,154].

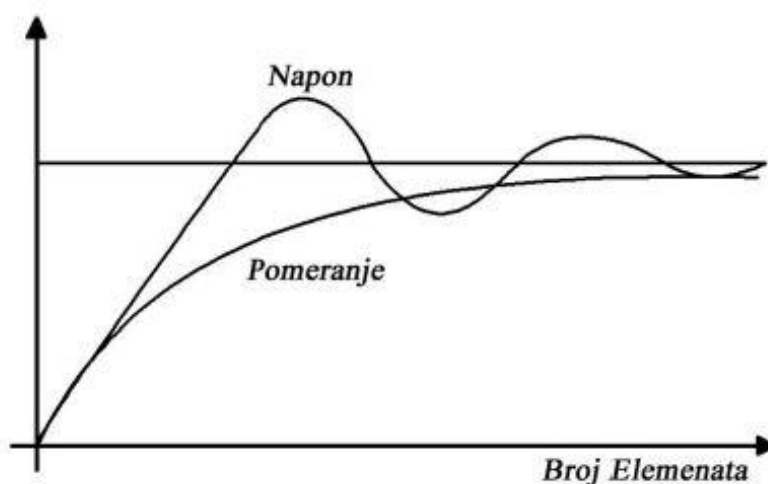
Primena MKE obuhvata idealizaciju i diskretizaciju analizirane strukture, izbor odgovarajućih konačnih elemenata i interpolacionih funkcija, formiranje globalnog sistema jednačina i njegovo rešavanje radi određivanja čvornih pomeranja, kao i određivanje deformacija i napona u konačnim elementima. Za statičke uslove opterećenja, osnovna jednačina MKE se može zapisati u obliku:

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \quad (2.45)$$

Gde su:

- $[K]$ – globalna matrica krutosti;
- $\{U\}$ – globalni vektor pomeranja;
- $\{F\}$ – vektor opterećenja.

Rešavanjem sistema jednačina (2.45) određuju se čvorna pomeranja, na osnovu kojih se dalje izračunavaju deformacije i naponi u konačnim elementima. Tačnost numeričkog rešenja zavisi od više faktora, među kojima su izbor tipa i karakteristika konačnih elemenata, kao i gustina i kvalitet generisane mreže. Poseban značaj ima veličina elemenata u oblastima u kojima se javljaju izraženi gradijenti napona i deformacija. Rafinisanjem mreže, odnosno smanjenjem veličine konačnih elemenata, numeričko rešenje konvergira ka rešenju koje je u sve manjoj meri zavisno od dalje rafinacije mreže. Ipak, povećanjem broja konačnih elemenata povećavaju se računarski zahtevi analize. Zbog toga se izbor odgovarajuće gustine mreže treba izvršiti na osnovu analize konvergencije, kojom se utvrđuje zadovoljavajući odnos između tačnosti numeričkog rešenja i računarskog vremena. Na slici 2.7 prikazan je primer konvergencije numeričkog rešenja polja napona i pomeranja u zavisnosti od broja konačnih elemenata [30,148].



Slika 2.7 Konvergencija rešenja polja napona i pomeranja dobijenih putem MKE u zavisnosti od broja elemenata [148].

Navedeno je od posebnog značaja za analize zasnovane na principima mehanike loma, imajući u vidu da se u oblasti oko vrha prsline javljaju izraženi gradijenti napona i deformacija. Zbog toga je neophodno obezbediti dovoljno gustu mrežu konačnih elemenata u oblasti oko vrha prsline kako bi se pouzdano odredilo lokalno naponsko stanje i parametri relevantni za karakterizaciju rasta prsline [155].

Jedno od ograničenja standardne MKE ogleda se u modeliranju diskontinuiteta koje predstavljaju prsline. Naime, u standardnoj MKE se zahteva prilagođavanje mreže konačnih elemenata geometriji prsline, što može otežati njeno modeliranje i praćenje tokom procesa rasta. Kao jedno od rešenja ovog problema razvijena je proširena metoda konačnih elemenata (xFEM), koja omogućava modeliranje diskontinuiteta nezavisno od mreže konačnih elemenata. Na taj način omogućeno je modeliranje i praćenje rasta prsline bez potrebe za kontinuiranim prilagođavanjem mreže njenom trenutnom položaju [156].

Proširena metoda konačnih elemenata (xFEM) zasniva se na „Partition of Unity” principu, koji omogućava proširivanje standardnog koncepta konačnih elemenata uvođenjem dodatnih funkcija u interpolacionu formulaciju. Ove funkcije su poznate kao funkcije poboljšanja (*engl. enrichment functions*) koje omogućavaju da se u numerički model uključe rešenja koja standardnom interpolacijom nije moguće adekvatno opisati. Odgovarajućim izborom funkcija poboljšanja moguće je predstaviti diskontinuitete u kontinuumu, uključujući geometriju prsline i lokalno ponašanje u njenoj okolini. Na taj način xFEM omogućava modeliranje prsline nezavisno od mreže konačnih elemenata, čime se pojednostavljuje numerička simulacija njenog rasta [112,113,156].

Uvođenjem funkcija poboljšanja dobija se sledeći izraz (2.46):

$$u^h(x) = \sum_i N_i(x) u_i + \sum_j v^j(x) a_i^j \quad (2.46)$$

Gde drugi član u izrazu predstavlja funkciju poboljšanja. Klasični stepen slobode konačnih elemenata je obeležen sa u , N_i predstavlja interpolacijske funkcije, v^j funkciju poboljšanja u j -tom čvoru, a a_i^j dodatne stepene slobode. Prisustvo dodatnih stepeni slobode zahteva uvođenje odgovarajućih korekcija kako bi se obezbedilo ispunjavanje uslova interpolacije. Ove korekcije odnose se na definisanje graničnih uslova i kontakata, te se mogu izraziti jednačinom (2.47):

$$v_i^j(x) = v^j(x) - v^j(x) \quad (2.47)$$

Gde je $v_i^j(x)$ vrednost j -te funkcije poboljšanja u i -tom čvoru. Nakon primene navedenih korekcija obezbeđuje se ispunjavanje uslova „Partition of Unity”, što se postiže modifikacijom funkcija poboljšanja čime njihove vrednosti u čvorovima postaju jednake nuli. Time se ne narušava ukupna vrednost interpolacione funkcije. Jednačina (2.46) se onda može izraziti u izmenjenom obliku, pri čemu je u aproksimaciju uključena korigovana funkcija poboljšanja $V_i^j(x)$ (2.48):

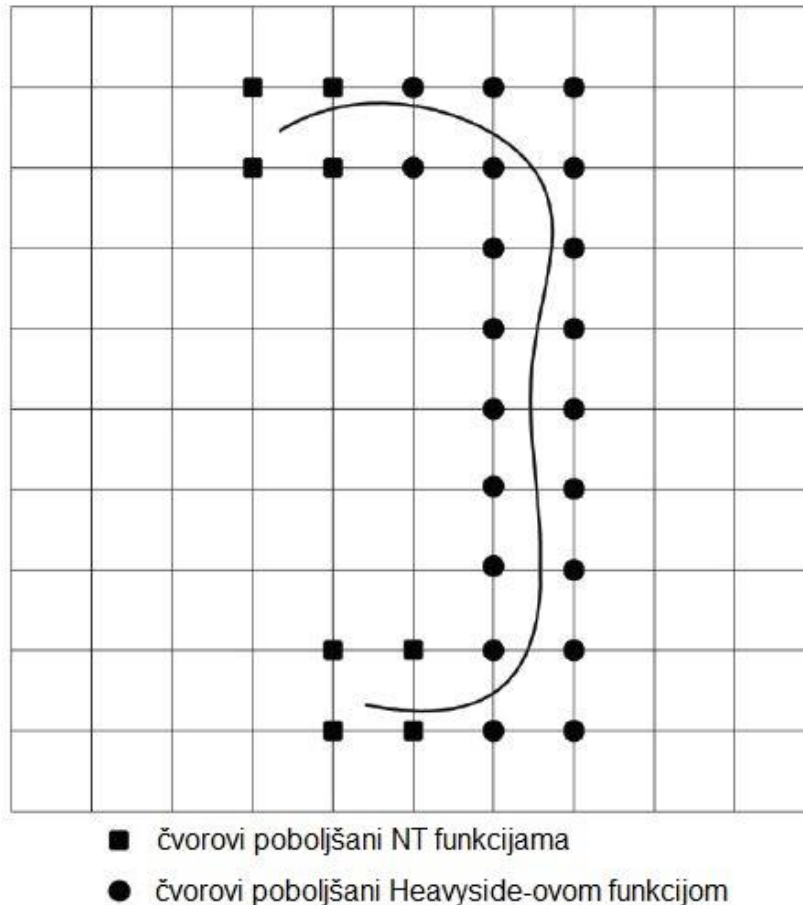
$$u^h(x) = \sum_i N_i(x) \left[u_i + \sum_j V_i^j(x) a_i^j \right] \quad (2.48)$$

Na osnovu korigovanog polja pomeranja formira se sistem linearnih jednačina analogno standardnoj MKE. Formiranjem odgovarajućih matrica krutosti i vektora opterećenja određuju se nepoznate veličine pomeranja u lokalnom domenu, nakon čega se njihovo rešenje određuje na globalnom nivou modela [156].

Pored funkcija poboljšanja, u xFEM se primenjuju i posebne vrste čvorova konačnih elemenata koje omogućavaju adekvatno predstavljanje diskontinuiteta u numeričkom modelu. Uobičajeno se razlikuju sledeće vrste čvorova:

- Klasični čvorovi – 2 stepena slobode;
- H-čvorovi – 4 stepena slobode;
- NT-čvorovi (*engl. Near Tip*) – 10 stepeni slobode.

H-čvorovi koriste Heavisideovu funkciju poboljšanja i primenjuju se kod konačnih elemenata kroz koje prslina prolazi, dok NT-čvorovi služe za konačne elemente u okolini vrha prsline. Način raspodele H- i NT-čvorova je prikazan na slici 2.8.



Slika 2.8 Prikaz H- i NT-čvorova pri modeliranju rasta prsline primenom xFEM-a [156].

Heavisideova funkcija se definiše na dva načina:

- Ako se čvor nalazi iznad prsline, vrednost Heavisideove funkcije je $H(x) = 1$;
- Ako se čvor nalazi ispod prsline, vrednost Heavisideove funkcije je $H(x) = -1$.

Tako se položaj svakog čvora može prikazati relacijom (2.49):

$$H(x) = \begin{cases} 1, & (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1, & (x - x^*) \cdot n < 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

Gde je n jedinični vektor pravca, a x^* koordinata tačke preseka prsline i odgovarajućeg konačnog elementa. Na ovaj način, Heavisideova funkcija omogućava uvođenje diskontinuiteta u polje pomeranja duž prsline, čime se omogućava njeno predstavljanje u okviru numeričkog modela [112,156].

Implementacijom H-čvorova koriste se sledeće funkcije poboljšanja (2.50):

$$\phi_{\alpha}(x)_{\alpha=1-4} = \sqrt{r} \left[\sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.50)$$

Pri čemu su r i θ polarne koordinate definisane u odnosu na vrh prsline, dok je pravac prostiranja prsline određen sa $\theta = 0$. Navedene funkcije poboljšanja omogućavaju opisivanje lokalnog polja pomeranja u okolini vrha prsline, gde standardna interpolacija konačnih elemenata nije dovoljna za adekvatno predstavljanje singularnog polja [157].

Jedan od glavnih nedostataka xFEM metode je visoka osetljivost numeričkih simulacija na kvalitet formirane mreže, odnosno na tip i veličinu konačnih elemenata. Kod proračuna parametara mehanike loma, kao što su K_I i J -integral, neophodno je da se sve čvorne tačke na frontu prsline u svakom koraku proračuna tokom njenog rasta nalaze unutar iste regije numeričkog modela.

Novinu u simuliranju rasta prsline predstavlja SMART metoda, koja je implementirana u ANSYS (Ansys, Kenonsburg, SAD) softveru od verzije 19.2 [158]. Akronim SMART ukazuje na osnovne pogodnosti koje ova metoda nosi:

- S – direktno razdvajanje elemenata i čvorova radi formiranja novih frontova tokom rasta prsline (*engl. separating*);
- M – postizanje kvalitetne geometrijske tranzicije tokom rasta prsline pomoću prilagođavanja oblika susednih elemenata (*engl. morphing*);
- A – određivanje daljeg rasta prsline se vrši preko procene lokalnih naponskih polja i parametara mehanike loma (*engl. adaptive*);
- R – u svakom koraku simulacije rasta prsline vrši se usitnjavanje i ponovno generisanje mreže u lokalnoj oblasti vrha prsline (*engl. remeshing*);
- T – tehnologija (*engl. technology*).

U poređenju sa xFEM, novije razvijena SMART metoda je efikasnija, a njen glavni kriterijum rasta prsline je prekoračenje kritične vrednosti u slučaju Moda I (K_I), odnosno žilavosti loma (2.51):

$$K_I \geq K_{IC} \quad (2.51)$$

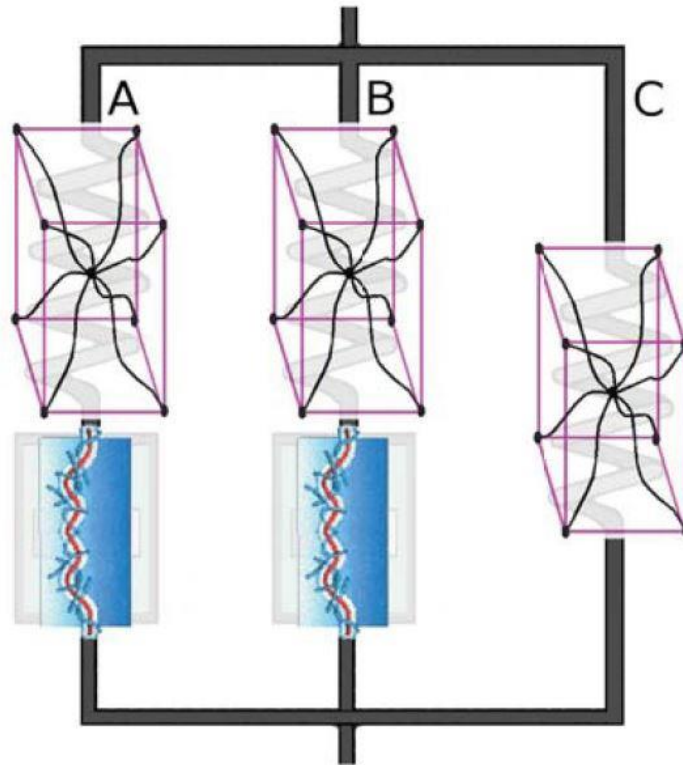
U većini numeričkih simulacija prisutna su složena naponska stanja u okolini vrha prsline. U tom slučaju, pojednostavljeni oblik jednačine (2.51) se može izraziti preko ekvivalentnog faktora intenziteta napona (K_{eq}), koji opisuje složeno naponsko stanje jednačinom (2.52):

$$K_{eq} = \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \left[K_I (1 + \cos \theta) - 3 K_{II} \sin \theta \right] \geq K_{IC} \quad (2.52)$$

SMART metoda koristi isključivo tetraedarske elemente, a njena glavna prednost u odnosu na xFEM je mogućnost, odnosno jednostavnost, simuliranja više prsline u okviru jednog proračuna. U SMART metodi definisanje koraka opterećenja predstavlja ključni parametar simulacije, jer se njime određuje ukupan rast prsline. Za svaki korak opterećenja moguće je definisati međukorake, čime se dobija detaljniji uvid u rast prsline [155-158].

Pored odgovarajućeg tipa i veličine konačnih elemenata, koji su od značaja za formiranje numeričke mreže, kao i pravilnog definisanja opterećenja i graničnih uslova, potrebno je uzeti u obzir i izbor odgovarajućeg konstitutivnog modela materijala. Budući da je u ovom istraživanju reč o polimernom materijalu, ovaj izbor ima poseban značaj.

U istraživanju [159] je razvijen termomehanički konstitutivni model za UHMWPE polimer. Materijal je u modelu predstavljen preko tri različita strukturna domena, koji omogućavaju opis nelinearnosti mehaničkog odziva, kao i vremenske i temperaturne zavisnosti odziva materijala pri malim i velikim deformacijama. Bergstrom et al. [159] su razvili mrežni model u kojem su tri konstituenta paralelno povezana (slika 2.9).



Slika 2.9 Reološki prikaz konstitutivnog modela predloženog u [159].

Ukupna deformacija koja deluje na mrežu A (slika 2.9) deli se na dva dela, prema jednačini (2.53):

$$F = F_A^e F_A^v \quad (2.53)$$

Na elastični, reverzibilni deo (F_A^e) i na viskoplastični, ireverzibilni deo (F_A^v). Stoga, Košijev napon u mreži A se interpretira temperaturno-zavisnim Arruda-Boyce modelom sa osam lanaca (*engl. eight-chain model*) prema jednačini (2.54):

$$\sigma_A = \frac{\mu_A}{J_A^e \lambda_A^{e*}} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}} \right] \frac{\mathcal{L}^{-1}(\overline{\lambda_A^{e*}} / \lambda_L)}{\mathcal{L}^{-1}(1 / \lambda_L)} \text{dev}[\mathbf{b}_A^{e*}] + \kappa(J_A^e - 1)\mathbf{1} \quad (2.54)$$

Gde su:

- μ_A – početni modul smicanja;
- $\mathcal{L}^{-1}$ – inverzna Langevinova funkcija kojom se opisuje nelinearno istežanje molekulskih lanaca polimernog materijala;
- $\overline{\lambda_A^{e*}}$ – efektivna vrednost istežanja polimernog lanca;
- λ_L – granična deformacija istežanja polimernog lanca;
- $J_A^e = \det[F_A^e]$ – promena zapremine;
- θ – temperatura;
- θ_0 – referentna temperatura;
- $\hat{\theta}$ – parametar temperature osetljivosti krutosti;
- $\mathbf{b}_A^{e*}$ – Koši-Grinov tenzor deformacije.

Ukupna deformacija koja deluje na mrežu B se takođe deli na elastični i viskoplastični deo, definisan jednačinom (2.55):

$$F = F_B^e F_B^v \quad (2.55)$$

Košijev napon u mreži B se opisuje na isti način kao i za mrežu A, prema jednačini (2.56):

$$\sigma_B = \frac{\mu_B}{J_B^e \overline{\lambda_B^{e*}}} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}} \right] \frac{\mathcal{L}^{-1}(\overline{\lambda_B^{e*}} / \lambda_L)}{\mathcal{L}^{-1}(1 / \lambda_L)} \text{dev}[\mathbf{b}_B^{e*}] + \kappa(J_B^e - 1)\mathbf{1} \quad (2.56)$$

Zatim, Košijev napon koji deluje na mrežu C je definisan modelom sa osam lanaca, prema jednačini (2.57):

$$\sigma_C = \frac{1}{1+q} \left\{ \frac{\mu_C}{J \lambda_{\text{chain}}} \left[1 + \frac{\theta - \theta_0}{\hat{\theta}} \right] \frac{\mathcal{L}^{-1}(\overline{\lambda_{\text{chain}}} / \lambda_L)}{\mathcal{L}^{-1}(1 / \lambda_L)} \text{dev}[\mathbf{b}^*] + \kappa(J - 1)\mathbf{1} + q \frac{\mu_c}{J} \left[\frac{I_1^*}{3} \mathbf{b}^* - \frac{2I_2^*}{3} \mathbf{I} - (\mathbf{b}^*)^2 \right] \right\} \quad (2.57)$$

Gde je q amplituda zavisnosti prvog reda od druge invarijante tenzora deformacije (I_2), na kojoj se jednačina (2.57) zasniva [159].

Praktična primena ovog analitičkog modela ogleda se u pouzdanom numeričkom predviđanju mehaničkog ponašanja izrađenih delova od polimernih materijala izloženih eksploatacionim uslovima. Pomenuta rešenja implementirana su u softverskom paketu MCalibration (Veryst Engineering LLC, Needham, MA, SAD), koji obuhvata, između ostalih, osnovni TNM model (*engl. Three-Network Model*) i njegovu nadograđenu verziju, TNV model (*engl. Three-Network Viscoplastic model*). Navedeni softver vrši kalibraciju modela materijala na osnovu datih eksperimentalnih podataka mehaničkog odziva polimera, oslanjajući se na sopstvenu integrisanu bazu podataka.

2.6. Osnove ANOVA, višestruke linearne regresije i Pearsonovog koeficijenta korelacije

Statističke metode primenjene u ovom istraživanju na eksperimentalno i numerički dobijenim podacima obuhvatile su:

- ANOVA;
- Višestruku linearnu regresiju;
- Pearsonov koeficijent korelacije.

ANOVA je primenjena za procenu uticaja pojedinačnih geometrijskih karakteristika modela ortopedskih pločica na rezultate numeričkih simulacija, dok je višestruka linearna regresija korišćena za formiranje prediktivnih modela kojima su ispitivani uticaji mehaničkih osobina na ostvarene dužine prsline. Uz pomoć višestruke linearne regresije moguće je izvršiti neophodnu korekciju dužine prsline, što će detaljnije biti objašnjeno u narednim poglavljima. Zatim, Pearsonov koeficijent korelacije primenjen je za utvrđivanje povezanosti između numerički dobijenih vrednosti i odabranih geometrijskih karakteristika modela ortopedskih pločica.

2.6.1. ANOVA

U ovom istraživanju korišćena je jednofaktorska analiza varijanse (*engl. One-Way ANOVA*) koja se primenjuje za procenu statističke značajnosti uticaja jednog kontrolisanog eksperimentalnog faktora (k) na odabranu kontinuiranu promenljivu odziva. Svrha metode je utvrđivanje da li promena posmatranog faktora dovodi do statistički značajnih razlika u srednjim vrednostima odziva ili su uočena odstupanja rezultat slučajnog rasejanja. Osnovni princip ove metode zasniva se na razlaganju ukupnog odstupanja (ukupna suma kvadrata – SST) na komponente između grupa (SSB) i unutar grupa (SSE) (2.58):

$$SST = SSB + SSE \quad (2.58)$$

Za ukupnu sumu kvadrata (SST) važi relacija (2.59):

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.59)$$

Za sumu kvadrata između grupa (SSB) važi relacija (2.60):

$$SSB = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.60)$$

Za sumu kvadrata unutar grupa (SSE) važi relacija (2.61):

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (2.61)$$

Gde su:

- k – broj grupa;
- n_i – broj merenja u i -toj grupi;
- y_{ij} – j -ta opservacija u i -toj grupi;
- $\bar{y}_{i.}$ – aritmetička sredina i -te grupe;
- $\bar{y}_{..}$ – ukupna aritmetička sredina svih opservacija.

Za proveru nulte (H_0) hipoteze koristi se F -statistika, za koju važi relacija (2.62):

$$F_0 = \frac{\frac{SSB}{k-1}}{\frac{SSE}{N-k}} \quad (2.62)$$

Gde je N ukupan broj sprovedenih merenja. Dobijena F_0 vrednost se poredi sa svojom kritičnom vrednošću radi procene nulte (H_0) hipoteze [125-130].

2.6.2. Višestruka linearna regresija

Uz pomoć višestruke linearne regresije moguće je formiranje statističkih modela zavisnosti mehaničke osobine (u ovom istraživanju konačne dužine prsline a_{max}) od više nezavisnih promenljivih (npr. ukupan potencijalni rad, potencijalna energija rasterećenja sile, otvaranje na vrhu prsline – CTOD, maksimalna sila – P_{max} , itd.), te se dobija relacija oblika (2.63):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.63)$$

Gde su:

- y_i – zavisna promenljiva (u ovom istraživanju a_{max});
- x_i ($i=1, \dots, n$) – nezavisne promenljive (primeri: ukupan potencijalni rad, CTOD, P_{max});
- β_0 – konstanta (vrednost kada su sve promenljive jednake nuli);
- β_i ($i=1, \dots, n$) – regresioni koeficijenti;
- ε_i – greška statističkog modela (rezidual).

Formiranjem statističkog modela dovoljne tačnosti može se precizno utvrditi koji je doprinos svake razmatrane nezavisne promenljive na određenu zavisnu promenljivu (u ovom istraživanju a_{max}). Tačnost konstruisanog regresionog modela se procenjuje pomoću koeficijenta determinacije (R^2), za koju važi relacija (2.64):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.64)$$

Koeficijent determinacije R^2 pruža relativnu ocenu kvaliteta poklapanja sa eksperimentalnim podacima, pri čemu se njegove vrednosti kreću od 0 do 1, odnosno od 0% do 100% tačnosti. Sa druge strane, za procenu apsolutne tačnosti procene, koja je od značaja pri verifikaciji numeričkih simulacija u odnosu na eksperimentalne rezultate, koristi se koren srednje kvadratne greške (RMSE), za koji važi relacija (2.65):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i,eks} - y_{i,num})^2} \quad (2.65)$$

Gde su:

- $y_{i,eks}$ – posmatrana vrednost dobijena eksperimentalnim ispitivanjem;
- $y_{i,num}$ – posmatrana vrednost dobijena numeričkom simulacijom [138,139].

2.6.3. Pearsonov koeficijent korelacije

Navedenim statističkim alatom se određuju jačina i smer linearnog odnosa između posmatranih promenljivih. Vrednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije (r) kreću se u opsegu od -1 do +1, a tri karakteristične granične vrednosti imaju sledeće značenje:

- -1 – savršeno negativna korelacija;
- +1 – savršeno pozitivna korelacija;
- 0 – odsustvo korelacije.

Pearsonov koeficijent korelacije se određuje prema jednačini (2.66):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.66)$$

Gde su:

- x_i, y_i – pojedinačne vrednosti dve razmatrane nezavisne promenljive;
- $\bar{x}, \bar{y}$ – njihove aritmetičke sredine [140].

3. Eksperimentalna i numerička metodologija istraživanja

Eksperimentalna ispitivanja predstavljaju važan polazni segment karakterizacije materijala, posebno kod aditivnih proizvodnih tehnologija, budući da se usled primenjenih parametara aditivne proizvodnje mogu javiti određene nehomogenosti i anizotropija izrađenog dela, te je karakterizaciju neophodno sprovesti pri svakoj promeni parametara aditivne proizvodnje [3,8-15,46,48,50-52,55,57,88].

Takođe, kod ispitivanja materijala sa defektom tipa prsline, odnosno ispitivanja prema principima mehanike loma, neophodno je uzeti u obzir da svaka promena parametara aditivne proizvodnje ne samo da dovodi do promene osobina izrađenog dela već i direktno utiče na putanju propagacije prsline [49,63,64,66,72-85,86,89,96,97]. Navedene specifičnosti aditivnih proizvodnih tehnologija otvaraju širok prostor za primenjena i fundamentalna istraživanja.

Pored eksperimentalnih istraživanja moguće je izvršiti i numeričke simulacije primenom konvencionalne MKE i xFEM, u zavisnosti od potreba istraživanja. Prednosti numeričkih simulacija, pored mogućnosti detaljnije analize strukture (kao što je već pomenuto u ranijim poglavljima) ogledaju se i u mogućnosti procene integriteta geometrijski složenih delova kod kojih je eksperimentalno ispitivanje zamornog rasta prsline često teško izvodljivo zbog složenosti eksperimentalnog postupka ili nedostatka odgovarajućih adaptera, odnosno konzola za povezivanje ispitivanog dela sa mašinom za ispitivanje [30,36-40,103,112-114,116-121,123,124]. Dakle, u takvim slučajevima nije moguće izvršiti eksperimentalnu verifikaciju konačne numeričke analize, ali se može sprovesti numerička simulacija koja se zasniva na osobinama materijala i uslovima ispitivanja koji verno odgovaraju realnom slučaju.

Eksperimentalna i numerička metodologija istraživanja ponašanja aditivno proizvedenih delova od PLA materijala i njihove otpornosti na lom sastoji se od sledećih segmenata:

- Ispitivanje PLA epruveta na zatezanje;
- Ispitivanje žilavosti loma prema LEML;
- Ispitivanje žilavosti loma prema EPML;
- Ispitivanje zamornog rasta prsline kod PLA epruveta;
- Numeričke simulacije modela ortopedskih pločica.

Važno je napomenuti da su u okviru istraživanja žilavosti loma prema EPML korišćene DIC metoda i xFEM analiza, pri čemu se ove dve metode međusobno dopunjuju. Kod ispitivanja LEML, DIC metoda je korišćena samo za procenu validnosti ispitivanja, praćenjem pravca rasta prsline pomoću virtuelnih mernih traka. Takođe, korišćeni su i SEM (*engl. Scanning Electron Microscope*) i optički uređaji za procenu stanja prelomnih površina ispitanih uzoraka. Statističke metode primenjene su u analizi rezultata ispitivanja žilavosti loma prema EPML, kao i u analizi rezultata numeričkih simulacija modela ortopedskih pločica.

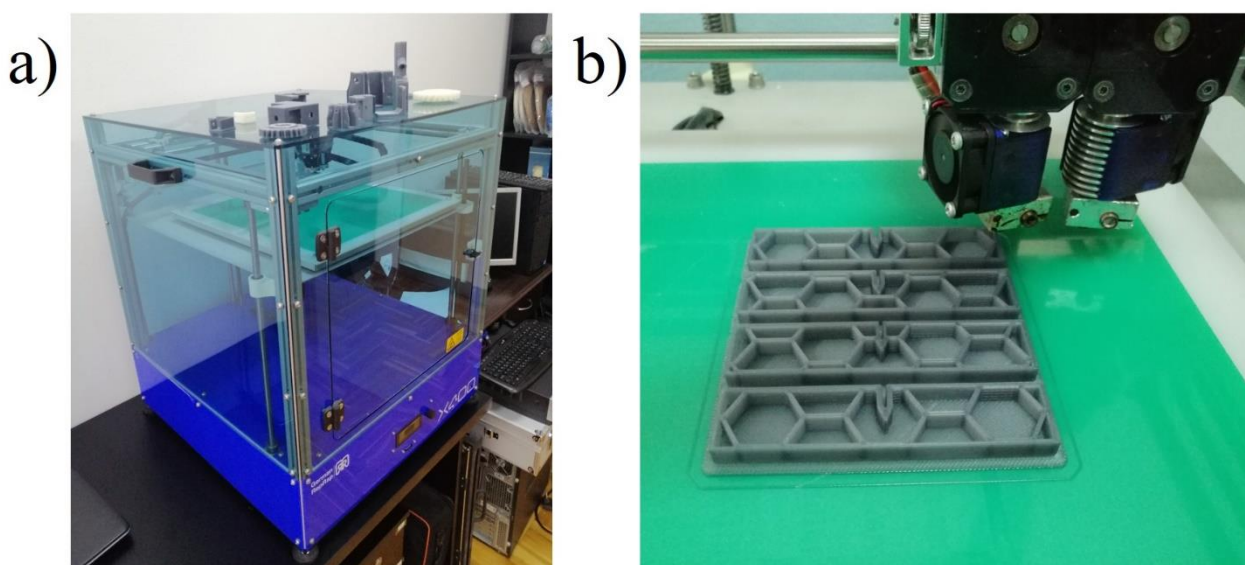
Razmatrani parametri aditivne proizvodnje u ovom istraživanju su količina ispune, u opsegu od 10% do 100%, sa inkrementom 10%, i visina sloja, u vrednostima od 0.1 mm, 0.2 mm i 0.3 mm. Ukupno 30 serija obuhvata sve kombinacije navedenih parametara količine ispune i visine sloja za ispitivanja žilavosti loma prema LEML i EPML.

Kod ispitivanja PLA epruveta na zatezanje, izrađene su epruvete sa količinom ispune od 100% i 90% za sve tri razmatrane visine sloja (0.1 mm, 0.2 mm i 0.3 mm), dok su vrednosti za ostale količine ispune interpolirane na osnovu rezultata prethodnog istraživanja [3], kako bi se dobili adekvatni rezultati za navedeni opseg od 10% do 100%. Kod ispitivanja zamornog rasta prsline korišćene su C(T) epruvete sa 100% količinom ispune za sve tri razmatrane visine sloja (0.1 mm, 0.2 mm i 0.3 mm), radi dobijanja Parisovih koeficijenata iz jednačine (2.41). Vrednosti ostalih korišćenih parametara koji su konstantni za sve serije, date su u tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Nepromenljivi parametri aditivne proizvodnje korišćeni u istraživanju.

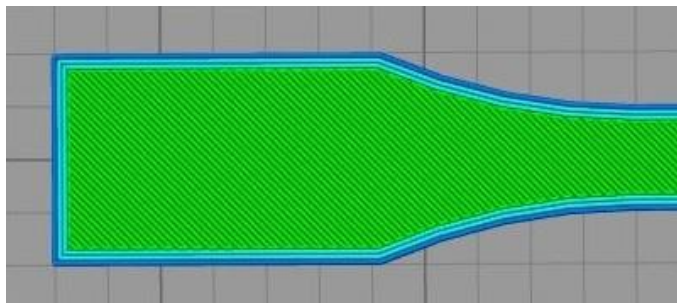
Parametar aditivne proizvodnje	Vrednost i opis
Prečnik mlaznice [mm]	0.4
Temperatura ekstruzije [°C]	200
Temperatura radne platforme [°C]	60
Brzina mlaznice [mm/s]	40
Unutrašnja struktura	Saće (<i>engl. honeycomb</i>)
Orijentacija niti	Rektilinearna

Sve razmatrane epruvete proizvedene su na FDM uređaju German RepRap (German RepRap GmbH, Feldkirchen, Nemačka), model x400, opremljenom sa dva ekstrudera (slika 3.1a). Proces izrade jedne serije SENB epruveta prikazan je na slici 3.1b. Na prikazu je jasno uočljiva korišćena saćasta unutrašnja struktura pri količini ispune od 10%.



Slika 3.1 Prikaz: a) FDM uređaja German RepRap x400; b) izrade serije SENB epruveta sa 10% količinom ispune.

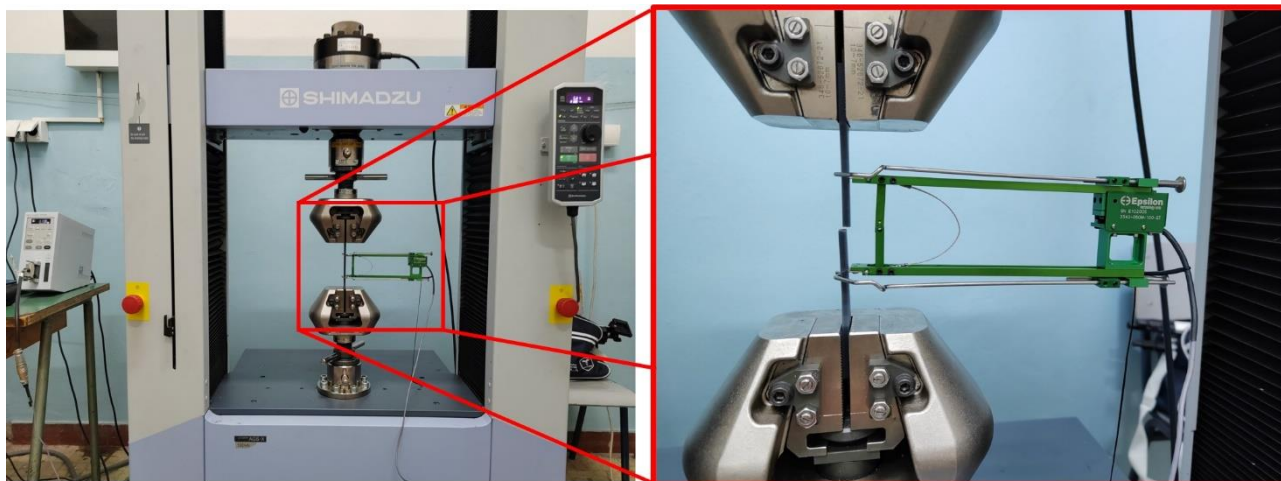
Izgled pomenute rektilinearne orijentacije, čije su niti postavljene pod uglovima od $-45/45^\circ$ i koja se pokazala kao najpovoljnija u istraživanjima [11,55,82,160] sa stanovišta mehaničkih osobina i otpornosti na lom, prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2 Softverski prikaz rektilinearne orijentacije niti ($-45/45^\circ$) [55].

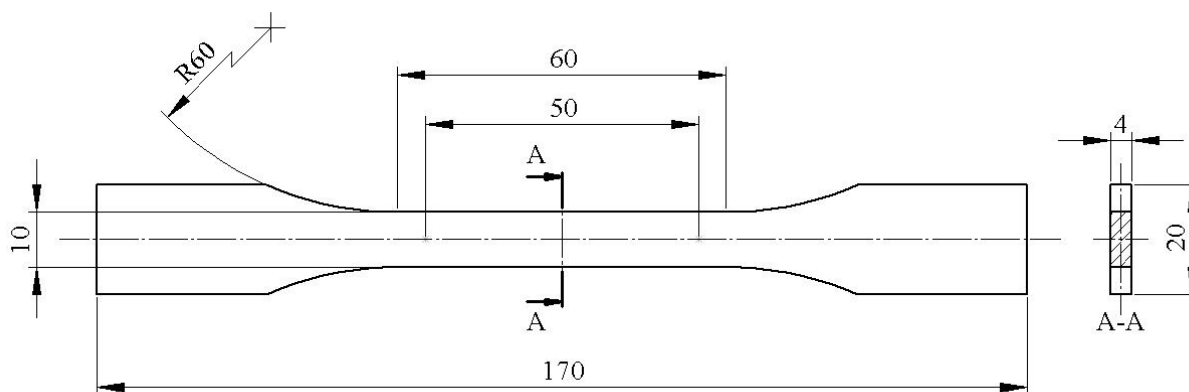
3.1. Ispitivanje PLA epruveta na zatezanje

Ispitivanja na zatezanje izvršena su u prostorijama Katedre za tehnologiju materijala Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na kidalici Shimadzu AGS-X (Shimadzu Corp., Kjoto, Japan) kapaciteta merne ćelije od 100 kN, uz korišćenje aksijalnog ekstenzometra Epsilon (Epsilon Tech. Corp, Jackson, WY, USA), model 3542 (slika 3.3).



Slika 3.3 Prikaz kidalice Shimadzu AGS-X sa aksijalnim ekstenzometrom tokom ispitivanja na zatezanje, sa uvećanim prikazom epruvete nakon ispitivanja.

Ispitivanja su izvršena prema standardu ISO 527-2 [141] za polimerne materijale dobijene ekstruzijom, pri kontroli pomeranja od 1 mm/min. Prema navedenom standardu, minimalan broj epruveta potreban za validnost ispitivanja iznosi pet. Međutim, usled nehomogenosti i anizotropije aditivno proizvedenih polimernih delova, u istraživanju je korišćen veći broj epruveta od minimalnog propisanog, kako bi se za analizu rezultata odabrale epruvete sa što sličnijim mehaničkim ponašanjem. Izgled epruvete prema zahtevima navedenog standarda prikazan je na slici 3.4.

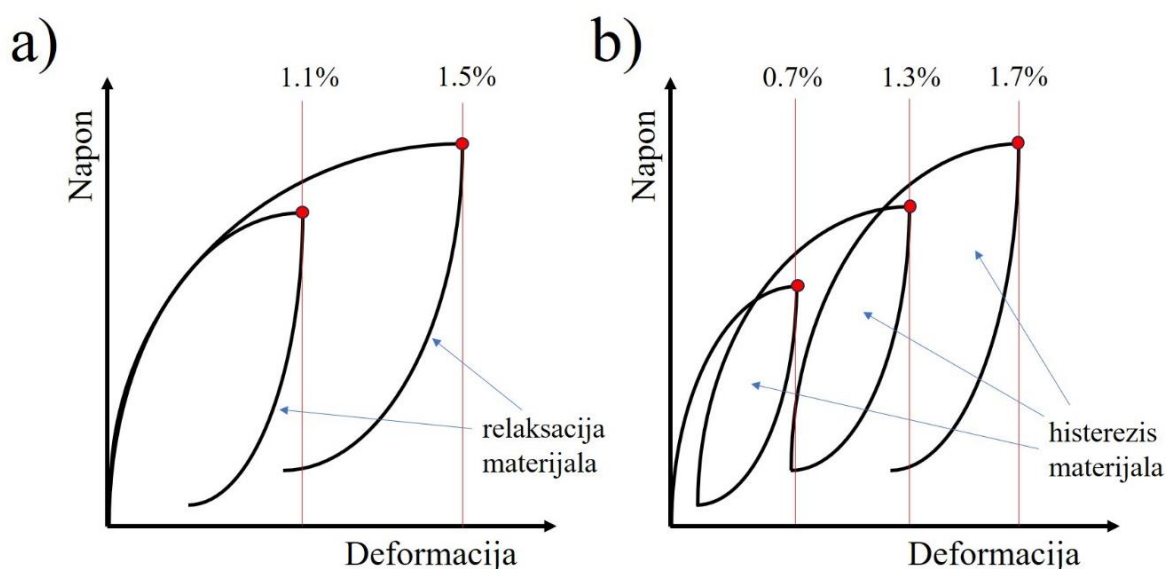


Slika 3.4 Izgled epruvete za zatezanje prema standardu ISO 527-2 [141] (dimenzije su u mm).

Kao što je već navedeno, ispitane su epruvete sa količinama ispune od 100% i 90% za sve tri razmatrane visine sloja (0.3 mm, 0.2 mm i 0.1 mm), dok su za ostale količine ispune rezultati interpolirani sa istraživanjem [3], kako bi se obuhvatio celokupan razmatrani opseg. Dobijene vrednosti neophodne su za procenu postignutog RSD u okolini vrha prsline prema standardu ASTM D5045 [60], kao i primenom jednačine (2.10).

Pored navedenih ispitivanja, izrađene su i epruvete sa 100% količinom ispune za sve tri visine sloja, radi kalibracije viskoelastičnog modela materijala, na osnovu istraživanja [157] i primenjene metodologije u istraživanju [57]. Za potrebe kalibracije, dodatne epruvete su ispitane pri kontroli pomeranja od 10 mm/min, kao i u okviru ispitivanja relaksacije materijala, pri čemu su sprovedeni i uzastopni ciklusi opterećenja i rasterećenja. Ispitivanja relaksacije i cikličnog opterećenja sprovedena su pri kontroli pomeranja od 5 mm/min. Kalibracija modela materijala izvršena je u softveru MCalibration (Veryst Engineering LLC, Needham, MA, SAD).

Navedena ispitivanja sprovedena su kako bi se obezbedio dovoljan broj podataka za formiranje modela materijala za numeričke simulacije koji odgovara ponašanju termoplastičnog polimera. U tu svrhu, primenjena je veća brzina opterećenja, uz ispitivanje relaksacije i ponašanja materijala pri cikličnom opterećenju, odnosno njegovog histereznog ponašanja pri rasterećenju. Relaksacija je ispitivana nakon dostizanja deformacija od 1.1% i 1.5%, dok su primenjena tri uzastopna ciklusa opterećenja i rasterećenja do deformacija od 0.7%, 1.3% i 1.7% u ravnomernim intervalima (slika 3.5). Za ispitivanje relaksacije usvojeno je vreme relaksacije (τ) od 20 minuta.



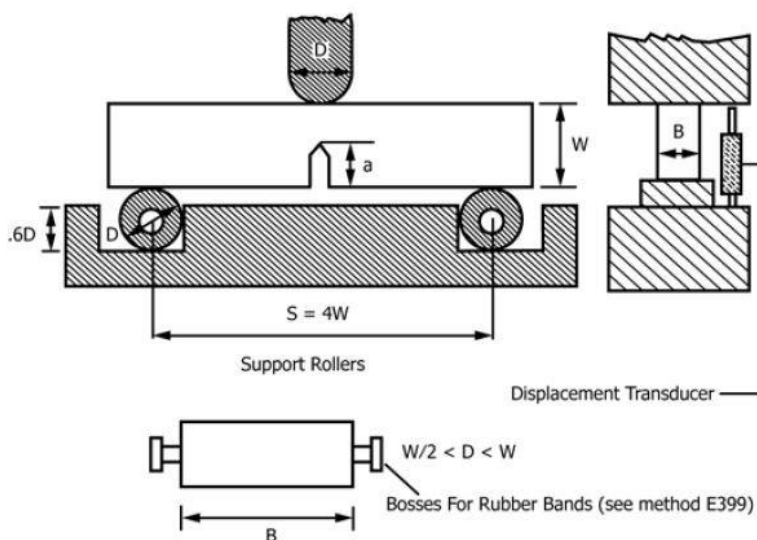
Slika 3.5 Šematski prikaz postupka ispitivanja: a) relaksacije; b) cikličnog opterećenja epruveta za zatezanje.

3.2. Ispitivanje žilavosti loma prema LEML

Ispitivanje žilavosti loma prema LEML sprovodi se prema standardu ASTM D5045 [60]. Standard propisuje dve vrste epruveta za ispitivanje:

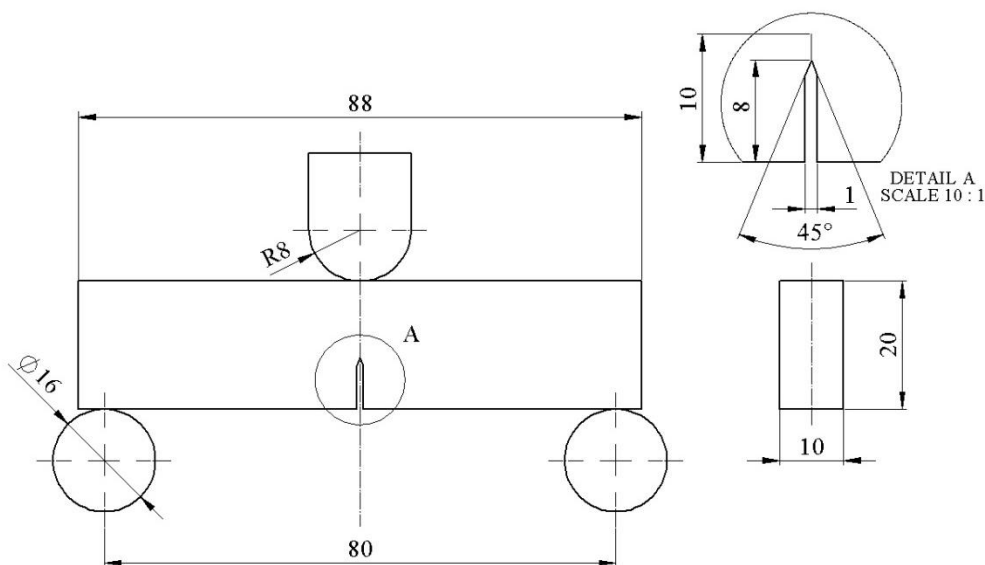
- SENB: za ispitivanje epruvete na savijanje u tri tačke;
- C(T): za ispitivanje epruvete na zatezanje.

Kod ispitivanja žilavosti loma u režimu savijanja u tri tačke, SENB epruveta je oslonjena na dva oslonca međusobno udaljena četiri vrednosti širine epruvete (W), dok prečnik oslonaca mora biti u opsegu od polovine do cele vrednosti širine W . Trn je istog prečnika kao i oslonci. Pomeranje se može pratiti preko pomeranja trna, kao što je slučaj u ovom istraživanju. Šematski prikaz ispitivanja SENB epruvete na savijanje u tri tačke dat je na slici 3.6.



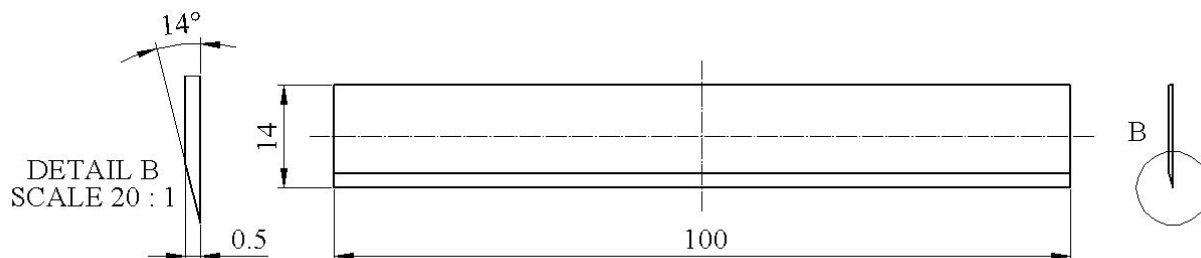
Slika 3.6 Šematski prikaz ispitivanja SENB epruvete na savijanje u tri tačke prema standardu ASTM D5045 [60].

Dimenzije SENB epruveta odabrane su u skladu sa zahtevima navedenog standarda i iznose $88 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$, dok su osnovne dimenzije epruvete, oslonaca i trna prikazane na slici 3.7.



Slika 3.7 Izgled SENB epruvete za procenu žilavosti loma prema standardu ASTM D5045 [60] (dimenzije su u mm).

Pošto se u ispitivanju koriste SENB epruvete u koje se unosi defekt tipa prsline udaranjem čekića po žiletu postavljenom u zarez, čime se formira inicijalna prslina, radi verodostojnosti ispitivanja neophodno je navesti i dimenzije upotrebljenog žileta, koje su prikazane na slici 3.8.



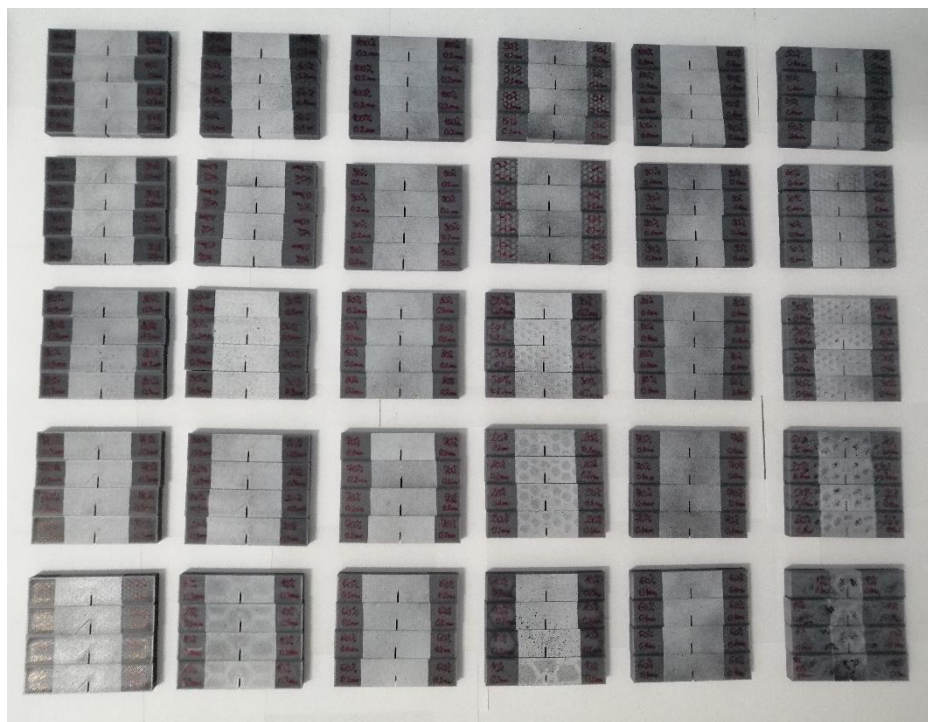
Slika 3.8 Grafički crtež korišćenog žileta za formiranje inicijalne prsline (dimenzije su u mm).

Kao što je prethodno navedeno, SENB epruvete pripremljene su u 30 serija, koje obuhvataju sve kombinacije navedenih količina ispune i visina sloja. Na slici 3.9 prikazane su sve pripremljene epruvete nakon aditivne proizvodnje. Svaka serija sastoji se od četiri epruvete, od kojih se tri koriste za analizu rezultata, u skladu sa zahtevima navedenog standarda.



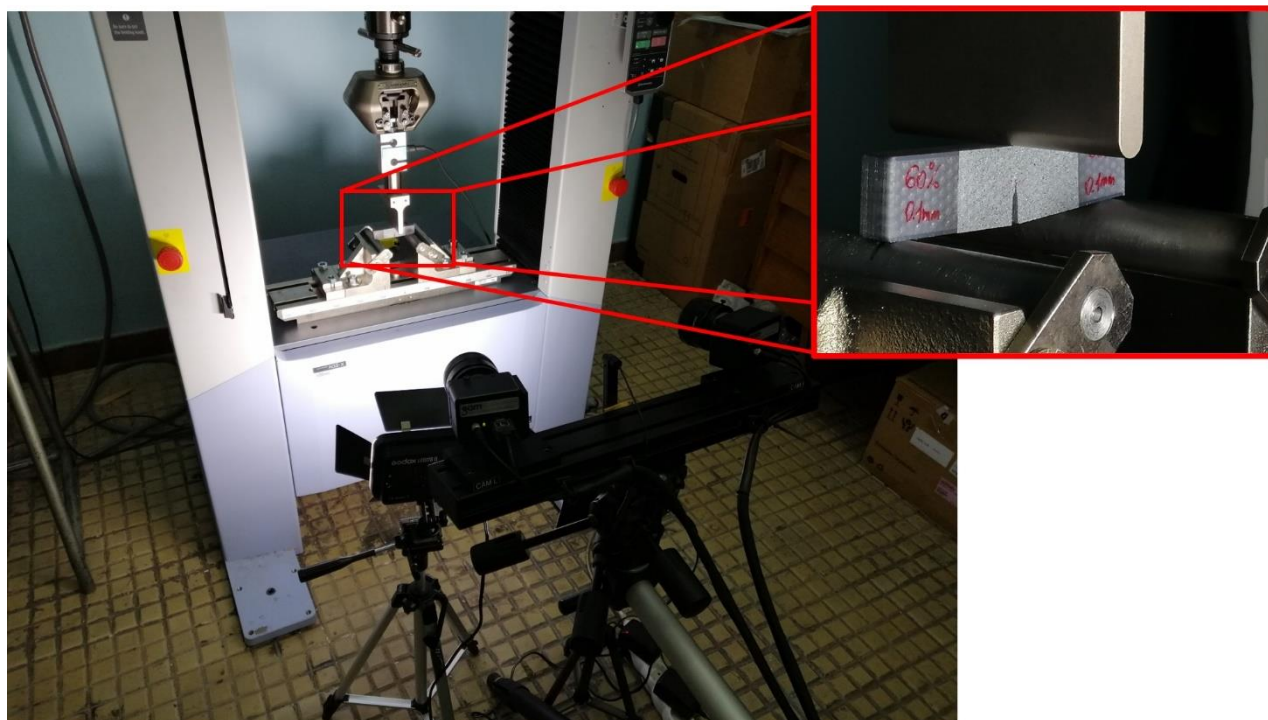
Slika 3.9 Izgled svih epruveta nakon aditivne proizvodnje, korišćenih za ispitivanje žilavosti loma u ovom istraživanju.

Sledeći korak podrazumeva nanošenje stohastičke šare na sve SENB epruvete (slika 3.10), neophodne za primenu DIC metode kao dopune eksperimentalnom ispitivanju. Nanošenje šare vrši se u dva sloja. Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, najpre se nanosi bela mat boja, a zatim crna tačkasta šara.



Slika 3.10 Izgled SENB epruveta sa nanetom stohastičkom šarom za primenu DIC metode.

Radi postizanja boljih uslova kontrasta za DIC snimke, kao osvetljenje korišćene su LED (*engl. Light Emitting Diode*) lampe. Kompletna postavka ispitivanja žilavosti loma, sa postavljenom SENB epruvetom na adapter za savijanje u tri tačke i DIC kamerama, prikazana je na slici 3.11. Ispitivanja su izvršena u prostorijama Katedre za tehnologiju materijala Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, na kidalici Shimadzu AGS-X (Shimadzu Corp., Kjoto, Japan), uz korišćenje DIC sistema GOM Aramis 2M (GOM, Braunšvajg, Nemačka), koji se zasniva na 3D DIC metodi.



Slika 3.11 Kompletna eksperimentalna postavka za ispitivanje SENB epruvete uz primenu 3D DIC metode, sa uvećanim prikazom epruvete.

Pri ispitivanju žilavosti loma prema LEML, u skladu sa standardom ASTM D5045 [60], najpre se izračunava uslovna vrednost K_Q , koja je data jednačinom (3.1):

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{BW^{1/2}} \right) f(x) \quad (3.1)$$

Gde je P_Q odgovara vrednosti maksimalne sile pri ispitivanju, dok je $f(x)$ poznati geometrijski faktor koji se za SENB epruvetu izračunava prema jednačini (3.2):

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)]}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (3.2)$$

Gde je x zapravo odnos a/W . U praksi se ova vrednost ne izračunava analitički, već je data tabelarno. U ovom istraživanju dimenzije a i W su posebno izmerene kljunastim merilom za sve SENB epruvete, nakon čega je vrednost $f(x)$ određena na osnovu tabele iz standarda ASTM D5045 [60] – slika 3.12.

TABLE 1 Calibration Factors SENB^A $S/W = 4$

a/W	$f(x)$	ϕ	Ψ	η_e
0.450	9.14	0.274	45.8	2.00
0.455	9.27	0.272	46.7	2.00
0.460	9.41	0.269	47.6	2.01
0.465	9.55	0.266	48.5	2.01
0.470	9.70	0.263	49.5	2.02
0.475	9.85	0.260	50.4	2.02
0.480	10.00	0.257	51.4	2.03
0.485	10.16	0.254	52.5	2.03
0.490	10.32	0.252	53.5	2.03
0.495	10.48	0.249	54.7	2.03
0.500	10.65	0.246	55.8	2.03
0.505	10.82	0.243	57.0	2.03
0.510	10.99	0.241	58.2	2.04
0.515	11.17	0.238	59.4	2.04
0.520	11.36	0.236	60.7	2.04
0.525	11.54	0.233	62.1	2.04
0.530	11.74	0.230	63.5	2.04
0.535	11.94	0.228	64.9	2.04
0.540	12.14	0.225	66.4	2.04
0.545	12.35	0.223	67.9	2.04
0.550	12.56	0.220	69.5	2.05

Slika 3.12 Izvod iz standarda ASTM D5045 sa vrednostima geometrijskog faktora $f(x)$ [60].

Sledeći korak je procena RSD na epruvetama primenom jednačine (2.10), definisane u navedenom standardu. U ovom istraživanju sve epruvete iz svih 30 serija zadovoljavaju ovaj kriterijum. Naredni zahtev standarda odnosi se na kriterijum sile, prema kojem se ocenjuje validnost ispitivanja.

Kako bi ispitivanje zadovoljilo zahteve LEML, neophodno je izvršiti proveru kriterijuma sile, kako propisuje ASTM D5045 standard. Dakle, na dobijenom dijagramu sila-pomeranje (slika 3.13) kroz linearni deo krive se povlači prava linija, čiji je nagib definisan uglom α u odnosu na vertikalnu osu. Zatim se konstruiše linija koja odgovara uglu α_1 , za koji važi uslov (3.3):

$$\tan \alpha_1 = 1.05 (\tan \alpha) \quad (3.3)$$

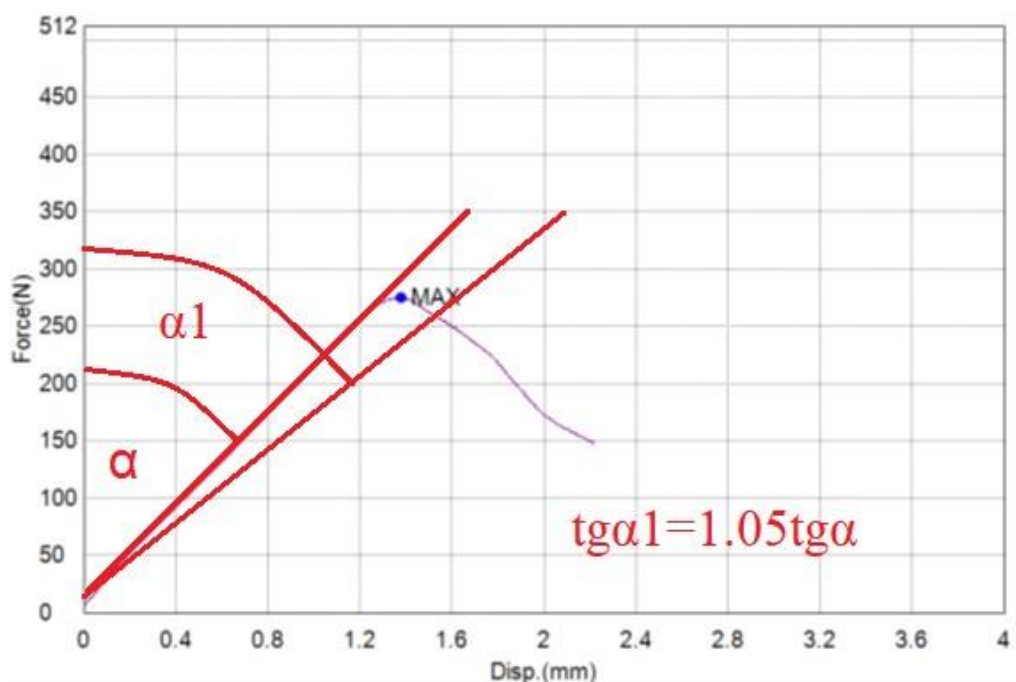
Na osnovu položaja maksimalne sile P_Q u odnosu na definisane linije, primenjuje se sledeći uslov:

- Ukoliko se vrednost maksimalne sile P_{max} nalazi između povučenih linija, njena vrednost zadovoljava kriterijum sile i koristi se za dalji proračun;
- Ukoliko P_{max} prelazi liniju definisanu uglom α_1 , određuje se uslovna sila P_Q u preseku te linije sa dobijenom krivom sila-pomeranje, a zatim se proverava uslov (3.4):

$$\frac{P_{max}}{P_Q} < 1.1 \quad (3.4)$$

Ukoliko je uslov (3.4) zadovoljen, za dalji proračun koristi se vrednost P_Q .

Ukoliko uslov nije zadovoljen, ispitivanje se smatra nevalidnim i odbacuje se iz dalje analize [60].

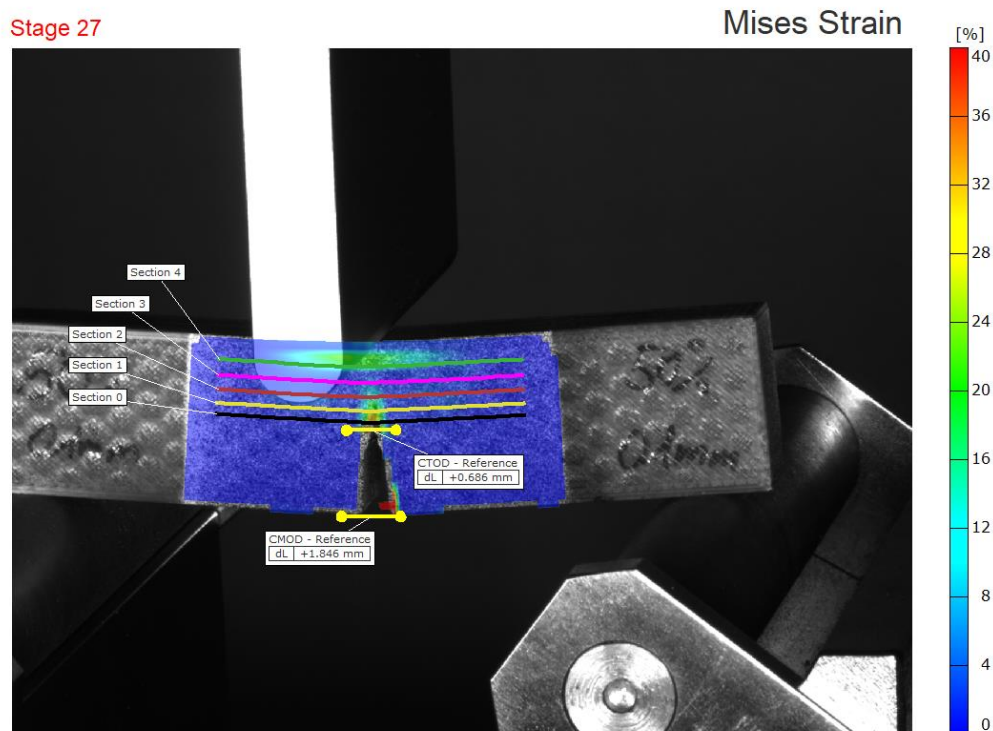


Slika 3.13 Određivanje validnosti ispitivanja prema kriterijumu sile [60].

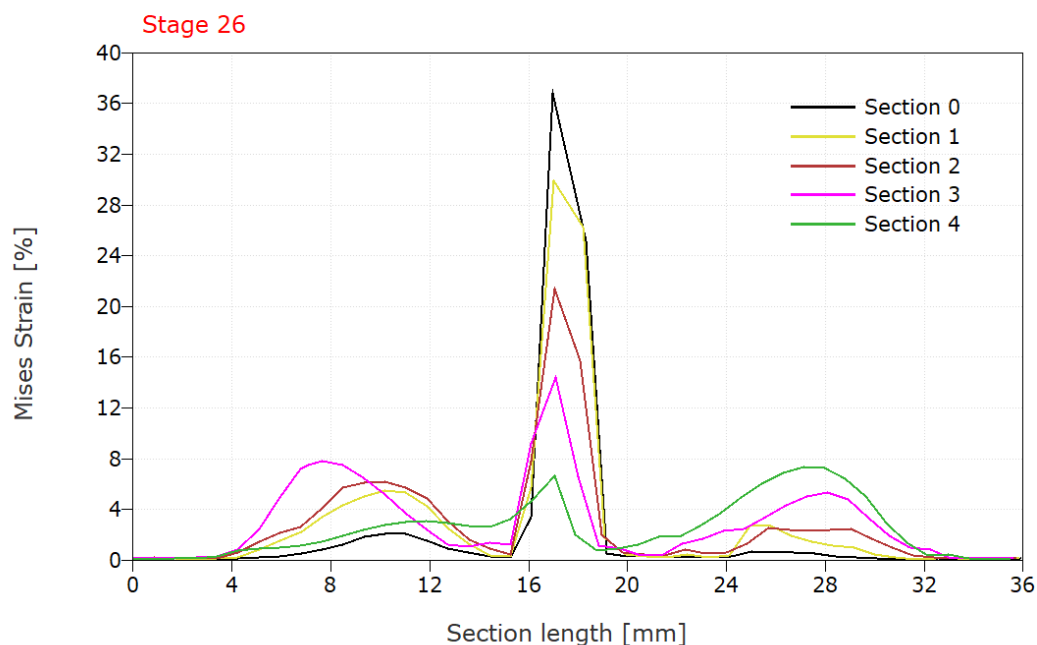
Iako su sve SENB epruvete zadovoljile uslov RSD, kod kriterijuma sile uočena je pojava prisutna kod sve tri razmatrane visine sloja. Naime, za količine ispune manje od približno 50% kriterijum sile nije zadovoljen. Na dijagramu sila-pomeranje jasno je uočeno da epruvete na nižim količinama ispune, odnosno količinama ispune manjim od 50%, pokazuju izražen nelinearan deo krive sila-pomeranje.

Dodatni doprinos eksperimentalnim rezultatima ostvaren je primenom 3D DIC sistema kamera, pri čemu je postavljeno pet virtuelnih mernih traka duž oblasti na koju je naneta stohastička šara (slika 3.14). Na ovaj način omogućeno je praćenje deformacija duž cele epruvete. Na osnovu dobijenih deformacija moguće je odrediti pravac prostiranja prsline preko dijagrama von Misesovih deformacija duž postavljenih virtuelnih mernih traka (slika 3.15), što je urađeno i u radu [78]. Na

svim ispitivanim epruvetama uočene su najveće deformacije u ravni prostiranja prsline, pri čemu je oblik dijagrama odgovarao obliku sveće (*engl. candle shape*), kako je opisano u radu [78]. Za razliku od navedenog istraživanja, u kojem nisu sve epruvete zadovoljile ovaj kriterijum, u ovom istraživanju su sve SENB epruvete ispunile navedeni uslov.



Slika 3.14 Položaj virtuelnih mernih traka na SENB epruveti u okviru 3D DIC analize.

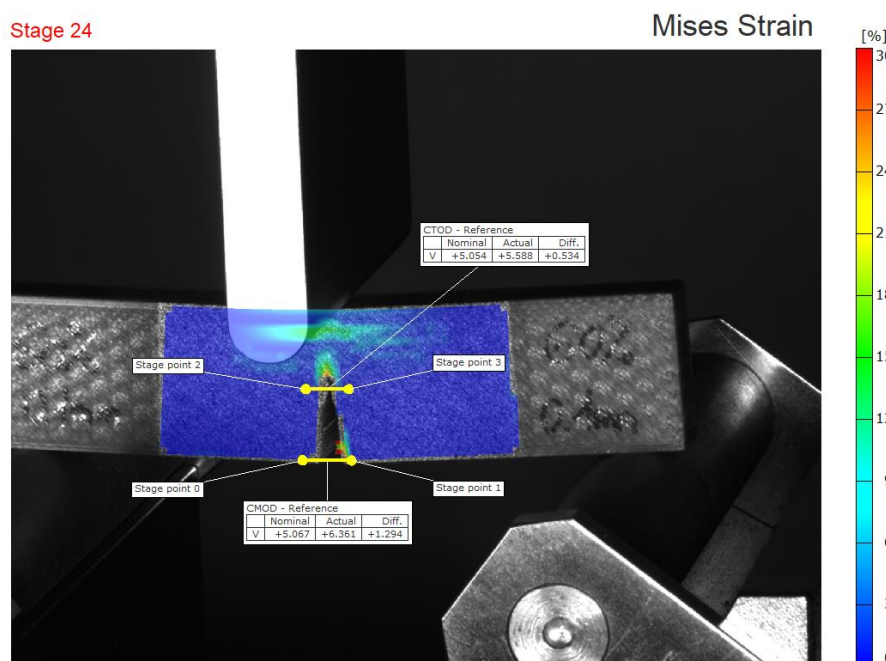


Slika 3.15 Dijagram von Misesovih deformacija duž virtuelnih mernih traka za određivanje pravca prostiranja prsline.

3.3. Ispitivanje žilavosti loma prema EPML

Na osnovu prethodno sprovedenih ispitivanja žilavosti loma prema LEML, bilo je neophodno pristupiti analizi rezultata prema principima EPML, pre svega za serije epruveta sa količinom ispune manjom od 50%. Usled nedostataka materijala i nemogućnosti sprovođenja ispitivanja prema EPML primenom metode sa više uzoraka, bilo je neophodno koristiti dostupne rezultate ispitivanja sprovedenih za određivanje žilavosti loma prema LEML.

Primena 3D DIC sistema omogućila je praćenje otvaranja prsline u okolini njenog vrha (CTOD), kao i otvaranja prsline na mestu ulaza u zarez (CMOD). Softverski prikaz određivanja vrednosti CTOD i CMOD dat je na slici 3.14, dok je detaljniji prikaz dat na slici 3.16. Tokom snimanja 3D DIC sistemom, za svaki snimljeni trenutak određivane su vrednosti CTOD-a i CMOD-a, čime je omogućeno njihovo praćenje tokom celokupnog procesa ispitivanja.



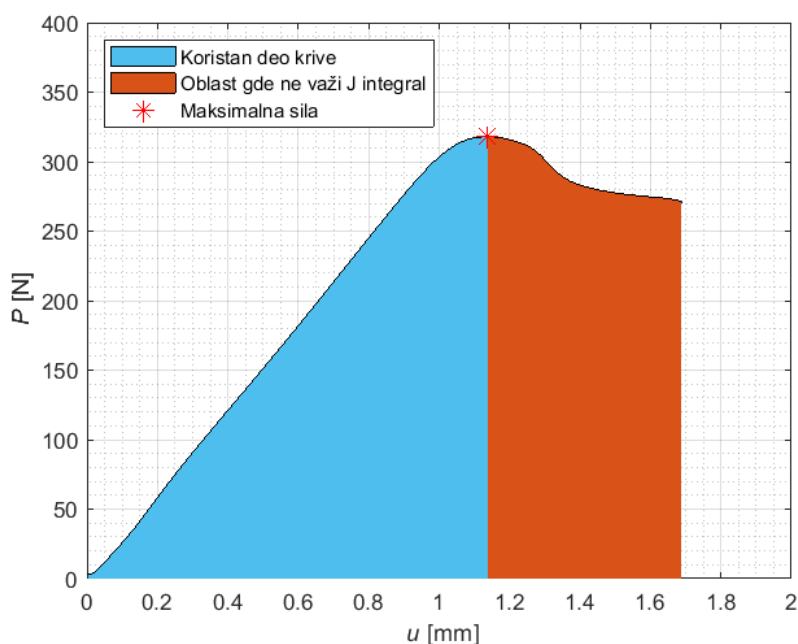
Slika 3.16 Softverski prikaz CTOD-a i CMOD-a primenom 3D DIC metode.

Interesantna razlika između istraživanja [80] i rezultata dobijenih u ovom istraživanju može se uočiti poređenjem slika 1.35 i 2.4. Na slici 2.4 prikazan je karakterističan odnos CTOD-a i CMOD-a dobijen u ovom istraživanju. Naime, dok je ovaj odnos u istraživanju [80] linearan, u ovom istraživanju postaje nelinearan približno u području u kojem se očekuje početak rasta prsline. Linearna zavisnost aproksimirana je pravom linijom sa granicama odstupanja od $\pm 2\%$, pri čemu je u ovom istraživanju usvojeno da trenutak prekoračenja navedene granice predstavlja trenutak u kojem CTOD počinje da raste brže od CMOD-a. Ovakvo ponašanje ukazuje na promenu stanja u okolini vrha prsline. Granica od $\pm 2\%$ usvojena je po analogiji sa $J_{0.2}$ i $\sigma_{0.2}$, koje predstavljaju konvencionalne vrednosti žilavosti loma prema EPML i napona tečenja, respektivno.

Budući da je predmet istraživanja termoplastični polimer, ne može se očekivati da će metode određivanja odnosa CTOD i CMOD (2.18) i (2.19) važiti kao za metalne materijale. Navedena opservacija predstavlja polaznu tačku ovog dela istraživanja, odnosno osnovu za određivanje trenutka početka rasta prsline kod PLA materijala. S obzirom na to da je CTOD lokalni parametar mehanike loma, njegovo praćenje omogućava detaljniji uvid u stanje okoline vrha prsline i određivanje trenutka kada prsline počinje da napreduje nakon procesa zatupljenja.

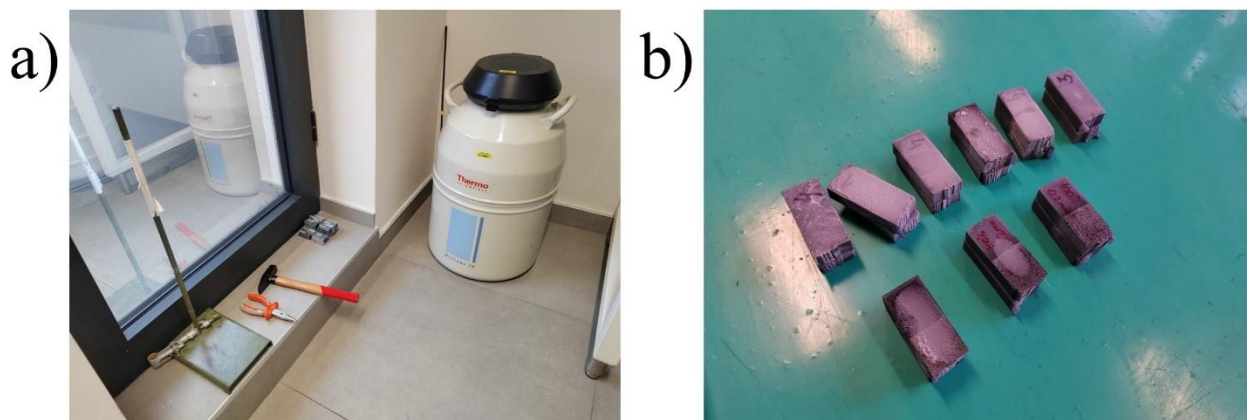
Na predloženi način određuje se trenutak početka rasta prsline. Međutim, kod dobijenih rezultata, pri ispitivanju SENB epruveta do loma, uočava se pad vrednosti sile (slika 3.13), te kako je opisano u prethodnim poglavljima, time dolazi do odstupanja uslova nelinearne-elastičnosti na kojima je baziran J – koji ovde treba da se koristi. Stoga je iz dalje analize neophodno izuzeti deo rasta prsline koji odgovara području pada sile (slika 3.17).

U tom smislu, predloženi postupak zasniva se na linearnoj regresionoj analizi rezultata, pri čemu se na osnovu jednačine višestruke linearne regresije (2.63) može odrediti doprinos energije ispod krive u posmatranom području. Uklanjanjem ovog doprinosa iz ukupne vrednosti moguće je analitički odrediti vrednost priraštaja prsline relevantnu za dalju analizu.

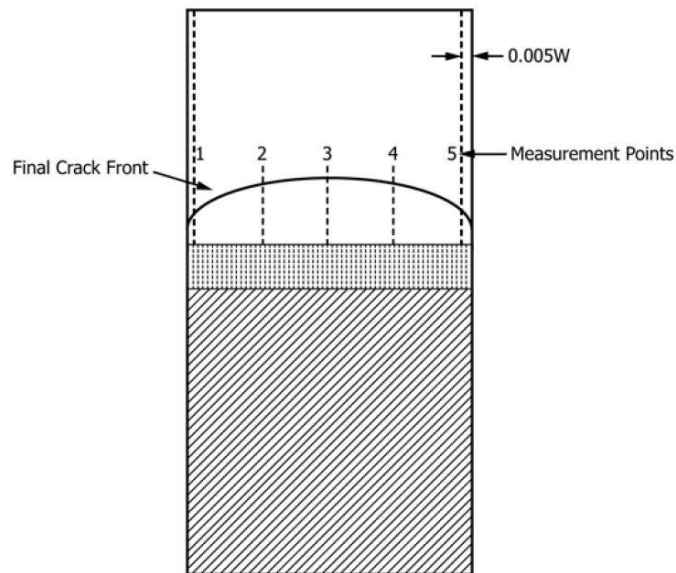


Slika 3.17 Prikaz korisnog dela krive sila-pomeranje izuzetog od dela gde ne važi J integral.

Dužina prsline određuje se prema standardu ASTM D6068 [65], tako što se epruvete lome u kriogenim uslovima, odnosno u tečnom azotu (slika 3.18), nakon čega se na prelomnoj površini određuje pet karakterističnih tačaka koje služe za procenu ostvarene dužine prsline (slika 3.19). Važno je napomenuti da se vrednosti u tačkama 1 i 5 određuju kao aritmetička sredina, a dobijena vrednost se potom uzima u obzir zajedno sa ostalim izmerenim vrednostima. Ukoliko jedna od izmerenih vrednosti odstupa za više od 50%, odgovarajuća epruveta se izuzima iz dalje analize [65]. U ovom istraživanju nije bilo epruveta koje nisu zadovoljile navedeni kriterijum.



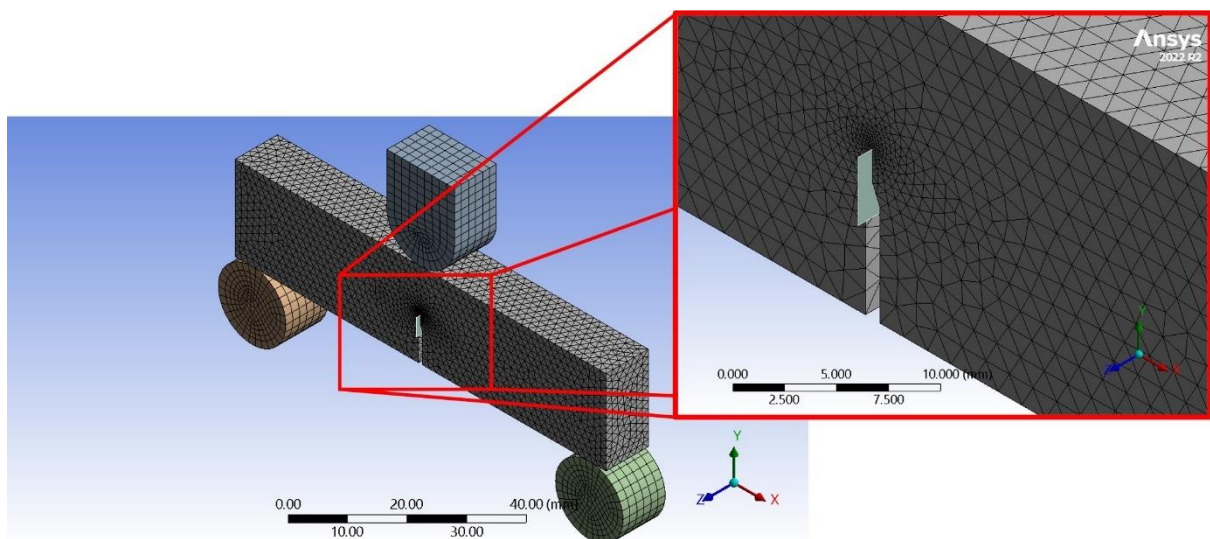
Slika 3.18 Izgled: a) postupka lomljenja epruveta u tečnom azotu (Stomatološki fakultet, Univerziteta u Beogradu); b) polomljenih epruveta.



Slika 3.19 Način izračunavanja dužine prsline prema standardu ASTM D6068 [65].

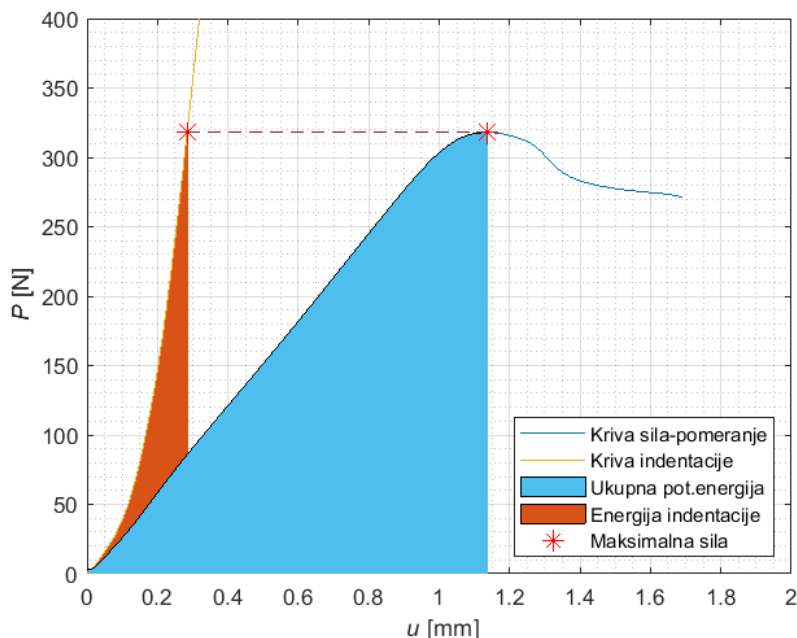
Procena ostvarene dužine prsline izvršena je pomoću profesionalne DSLR kamere Canon (Canon, Tokio, Japan), postavljene na stalak, čime su obezbeđeni ujednačeni uslovi snimanja i merenja između različitih epruveta. Postupak lomljenja epruveta u kriogenim uslovima izvršen je na Stomatološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Na ovaj način su određene početna i krajnja vrednost dužine prsline (a_0 i a_{max}). Tačan priraštaj dužine prsline određuje se numeričkim postupkom, pri čemu se u analizu uključuje defekt tipa prsline. Numeričke simulacije sprovedene su u softveru Ansys Mechanical (Ansys, Kenonsburg, SAD) – slika 3.20. Na osnovu numerički određenih vrednosti priraštaja prsline Δa formira se polinomska zavisnost. Vrednosti Δa dobijene na osnovu te polinomske zavisnosti potom se uparuju sa odgovarajućim vrednostima J integrala, određenim prema jednačinama (2.31) i (2.33). Rezultati numeričkih simulacija verifikovani su poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima, na osnovu vrednosti CMOD-a i CTOD-a.



Slika 3.20 Numerički model SENB epruvete sa uvećanim prikazom područja inicijalne prsline u softveru Ansys Mechanical (Ansys, Kenonsburg, SAD) sa prikazanom mrežom konačnih elemenata.

Važno je naglasiti da se potencijalna energija koja se koristi za proračun J integrala prema jednačinama (2.31) i (2.33) mora korigovati za energiju indentacije, prema jednačini (2.32), usled uleganja SENB epruveta na mestu oslonaca. Ova energija nije povezana sa rastom prsline, kao što je već navedeno u prethodnim poglavljima. Pri proračunu J integrala se za svaku tačku monotonog rasta sile vrednost potencijalne energije koriguje za odgovarajuću vrednost energije indentacije (slika 3.21).



Slika 3.21 Prikaz potencijalne energije predstavljene površinom ispod krive sila-pomeranje i energije indentacije za tačku maksimalne sile.

Na osnovu dobijenih parova vrednosti J integrala i priraštaja dužine prsline Δa konstruiše se J - R kriva prema preporukama metode sa više uzoraka, pri čemu se zavisnost određuje na osnovu jednačine (2.34), uz poštovanje uslova iz jednačine (2.35) i uzimanje u obzir linije zatupljenja [62,64,96]. Potrebna vrednost σ_{YS} iz jednačine (2.36) određuje se na osnovu rezultata ispitivanja na zatezanje sprovedenih u ovom istraživanju, posebno za svaku kombinaciju količine ispune i visine sloja. Tako dobijene vrednosti J_{IC} se potom preračunavaju u odgovarajuće vrednosti K_{IIC} , čime se omogućava međusobno poređenje svih količina ispune pri različitim visinama sloja.

Kod 3D DIC metode korišćene uz eksperimente za određivanje žilavosti loma prema LEML i EPML, treba istaći da je pre eksperimenata korišćen kalibracioni panel dimenzija $90 \times 72 \text{ mm}^2$, sa veličinom fasete od 25×20 piksela, radi kalibracije sistema. Dobijena je kalibraciona devijacija od 0.024 piksela, koja se nalazi unutar preporučenog opsega od 0.01 – 0.04 piksela [161-164]. Konfiguracija i podaci dati su u tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Konfiguracija 3D DIC sistema i podaci o kalibraciji.

Parametri	Vrednosti
Rezolucija [piksela]	1600 x 1200
Fokalna dužina kamera [mm]	50
Radna zapremina [mm^3]	105 x 80 x 60
Veličina podskupa [piksela]	25 x 20
Udaljenost od merne površine [mm]	500
Kalibraciona devijacija	0.024

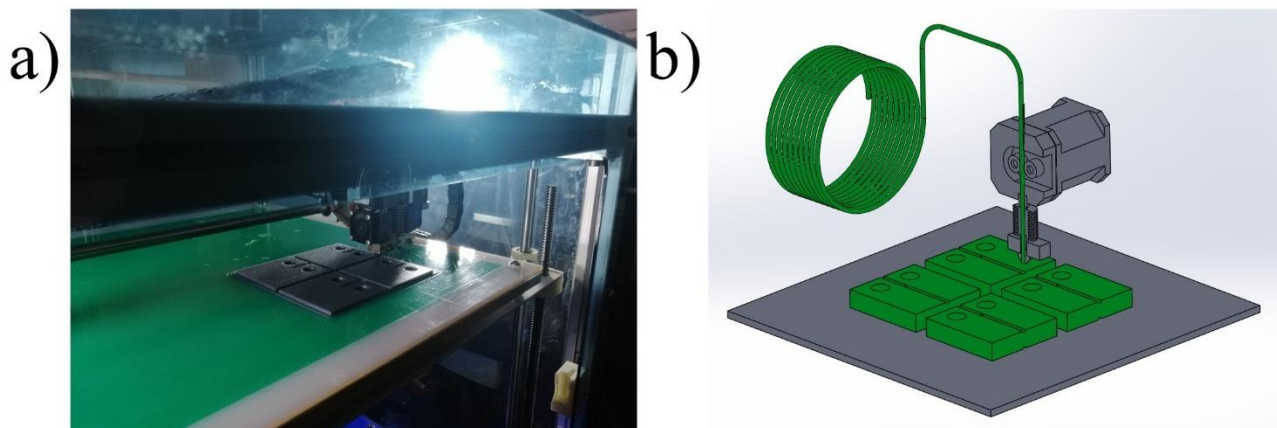
3.4. Ispitivanje zamornog rasta prsline kod PLA epruveta

Ispitivanje zamornog rasta prsline PLA materijala je izvršeno na pulzatoru marke Instron (Instron Corp., Norvud, Masačusets, SAD), model Electropulse E3000, na Institutu za fiziku materijala pri Češkoj akademiji nauka u Brnu (Češka Republika), slika 3.22. Odabrana je geometrija C(T) epruveta, koje su aditivno proizvedene u prostorijama Inovacionog centra Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, na navedenom FDM uređaju German RepRap x400 (slika 3.1a). Aditivno su proizvedene četiri C(T) epruvete u jednom procesu, koji je zatim ponovljen, tako da je ukupno proizvedeno osam epruveta po seriji. Kao što je ranije navedeno, razmatrane su isključivo C(T) epruvete sa 100% količinom ispune za sve tri visine sloja (0.1 mm, 0.2 mm i 0.3 mm).



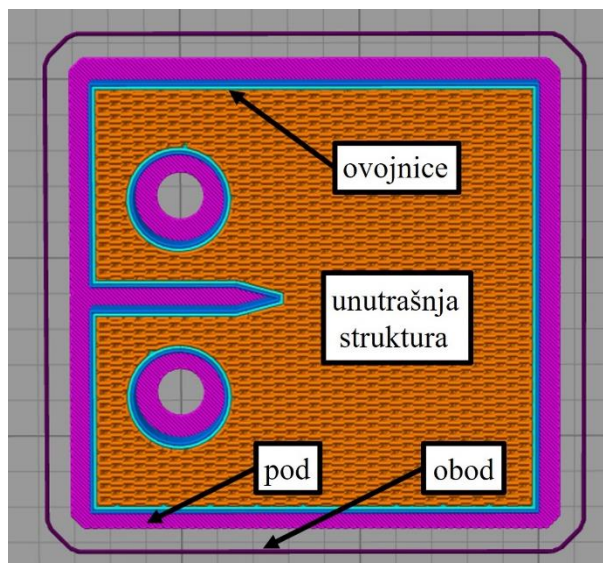
Slika 3.22 Pulzator Instron Electropulse E3000 tokom ispitivanja C(T) epruveta.

Cilj je bio određivanje zamornih karakteristika PLA materijala za svaku visinu sloja, odnosno određivanje Parisovih koeficijenata iz jednačine (2.41), koji će se potom koristiti u numeričkim simulacijama ortopedskih pločica sa različitim količinama ispune. Prikaz procesa aditivne proizvodnje dat je na slici 3.23a, dok je šematski prikaz procesa dat na slici 3.23b.



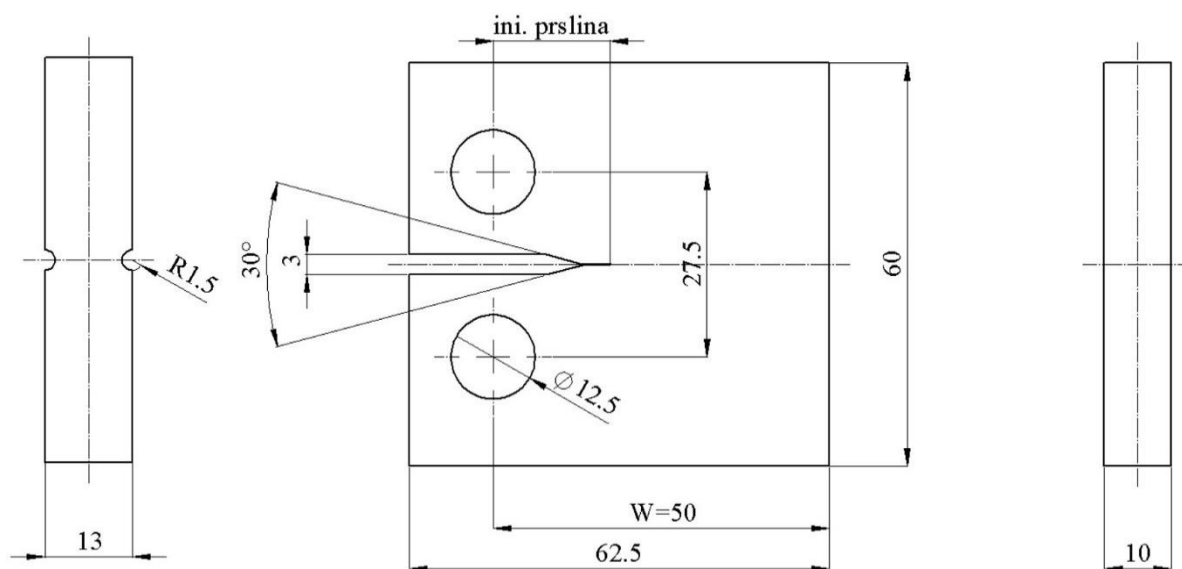
Slika 3.23 Prikaz: a) procesa aditivne proizvodnje C(T) epruveta; b) šeme procesa.

Sve C(T) epruvete, kao i epruvete za ispitivanje na zatezanje i SENB epruvete, sadrže dve ovojnice, kako bi inicijalna prslina prošla kroz njih i kako one ne bi uticale na rezultat, kao što je objašnjeno u [77]. U svim procesima aditivne proizvodnje korišćen je obod, kako bi se obezbedio ujednačen protok materijala tokom ekstruzije, kao i pod, radi boljeg prijanjanja dela za podlogu (slika 3.24) [11].

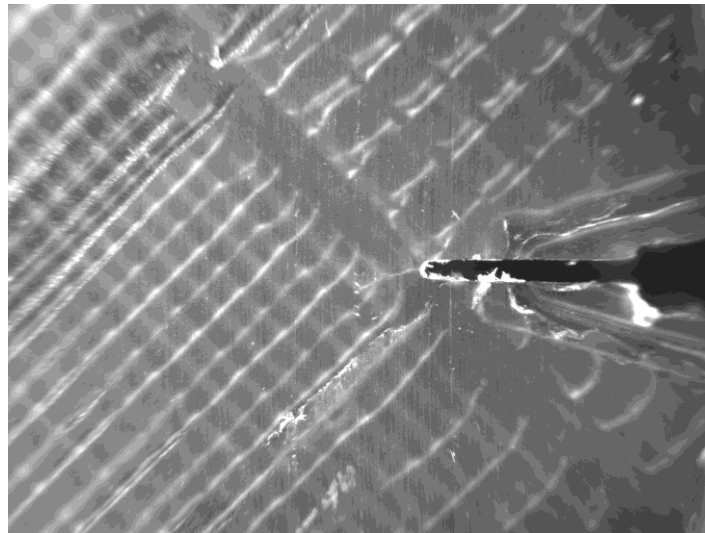


Slika 3.24 Softverski prikaz karakterističnih elemenata pri izradi dela: ovojnice, obod i pod.

Za visinu sloja od 0.3 mm razmatrana je primena bočnih zareza (slika 3.25 – levo), zbog uočene nepravilnosti u pravcu rasta zamorne prsline. Naime, uočena je promena ugla pod kojim je prslina rasla, zbog čega je razmatrana izrada bočnih zareza tokom procesa aditivne proizvodnje kako bi se obezbedio pravolinijski rast prsline. Epruvete sa bočnim zarezima i bez njih u ravni očekivanog prostiranja prsline imaju debljinu od 10 mm, dok su epruvete sa bočnim zarezima, zbog poluprečnika zareza od 1.5 mm, duž preostalog dela debljine 13 mm. Inicijalna prslina je dužine 17 mm, čime je odnos $a/W = 0.35$, kao u [85]. Za visine sloja od 0.2 mm i 0.1 mm usvojena je konfiguracija C(T) epruveta bez bočnih zareza (slika 3.25 – desno). Inicijalna prslina je izrađena pomoću metalografske testere sa debljinom sečiva od 0.4 mm. Izgled inicijalne prsline dat je na slici 3.26.



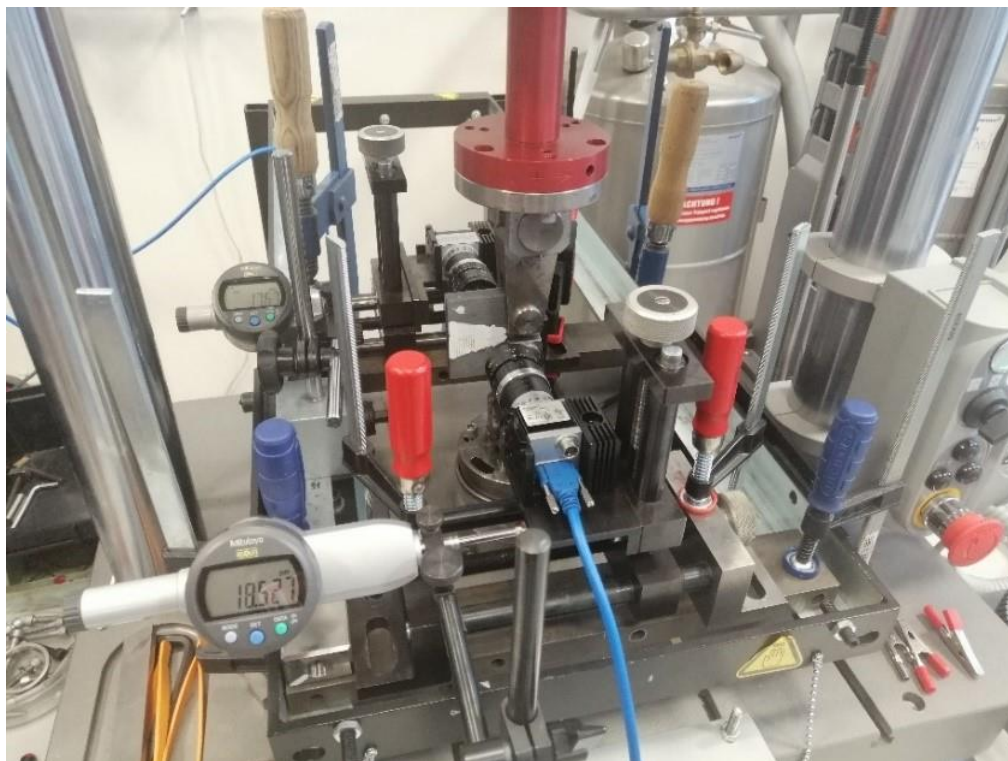
Slika 3.25 Tehnički crtež C(T) epruveta: sa bočnim zarezima – levo; bez bočnih zareza – desno (dimenzije su u mm).



Slika 3.26 Izgled inicijalne prsline na C(T) epruveti.

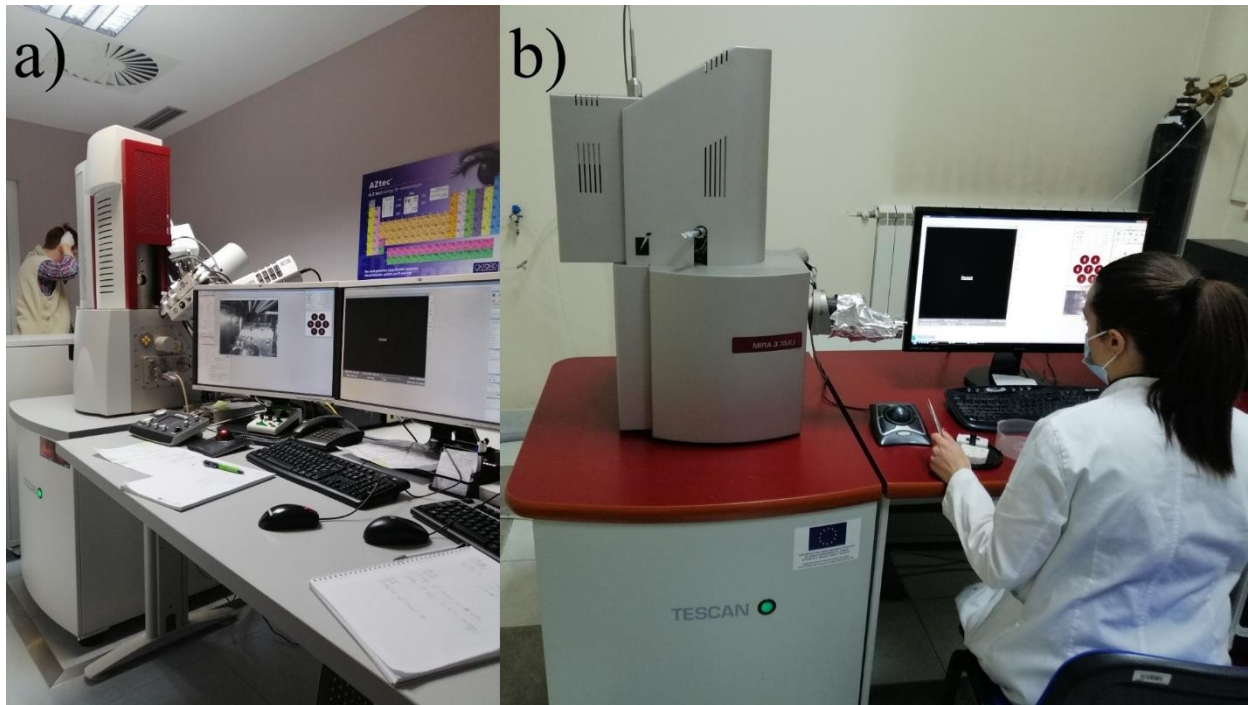
Postavka eksperimenta prikazana je na slici 3.27, gde je C(T) epruveta prikazana neposredno pre ispitivanja. Pored toga što je epruveta postavljena na pulzator, sa obe strane C(T) epruvete postavljene su 2D DIC kamere marke Basler (Basler AG, Arensburg, Nemačka), kako bi se beležio rast prsline. Asimetrija opterećenja R iznosi 0.1, prema jednačini (2.42). Konačni priraštaj prsline a_{max} iznosi približno 40 mm za sve epruvete. Frekvencija opterećenja iznosi 10 Hz, a sve epruvete ispitane su na sobnoj temperaturi (23 °C).

Kao što je već navedeno, cilj ispitivanja je određivanje Parisovih koeficijenata za potrebe numeričkih simulacija ortopedskih pločica sa različitim količinama ispune. Takođe, u okviru ovog istraživanja izvršena je verifikacija dobijenih Parisovih koeficijenata na C(T) epruvetama koje su ispitane bez praćenja rasta prsline, već samo na osnovu broja ciklusa opterećenja, prema jednačini (2.44).



Slika 3.27 Postavka eksperimenta za ispitivanje zamornog rasta prsline na C(T) epruvetama od PLA materijala.

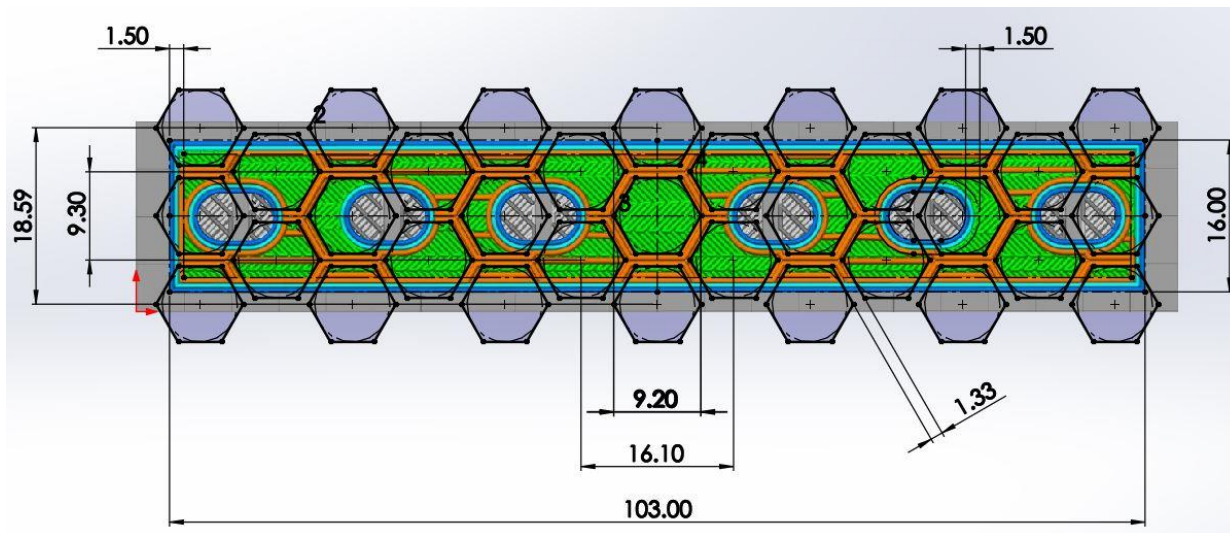
Vredi istaći da su rezultati obrađeni u programu MATLAB (MathWorks Inc., Natick, Masačusets, SAD) i biće predstavljeni u sledećem poglavlju. Neka od eksperimentalnih ispitivanja praćena su SEM snimanjem prelomnih površina epruveta radi procene njihovog stanja. Snimanja su obavljena na Institutu za fiziku materijala pri Češkoj akademiji nauka u Brnu (slika 3.28a), na uređaju Tescan Vega (Tescan, Brno, Češka Republika), i u Beogradu na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu (slika 3.28b), na uređaju Tescan Lyra 3.



Slika 3.28 SEM uređaji na kojima je rađeno snimanje prelomnih površina epruveta: a) Institut za fiziku materijala pri Češkoj akademiji nauka u Brnu; b) Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu.

3.5. Numeričke simulacije modela ortopedskih pločica

Numeričke simulacije ortopedskih pločica urađene su u softveru ANSYS 2022 R2 (Ansys, Inc., Kenonsburg, SAD) uz primenu SMART opcije za simulaciju rasta prsline. Modeli ortopedskih pločica napravljeni su na osnovu modela datih u [36,40] (slika 1.4), sa količinama ispune od 10% do 100%, sa inkrementom od 10%. Time je obuhvaćeno ukupno 10 različitih modela ortopedskih pločica. Modeli su izrađeni u programu SolidWorks (Dassault Systèmes, Velizy Vilakuble, Francuska). Struktura saća definisana je na osnovu usvojenih dimenzija u softveru za pripremu FDM procesa aditivne proizvodnje Simplify3D (Simplify3D, Sinsinati, SAD), a zatim je prenesena u SolidWorks radi konačne izrade modela (slika 3.29).

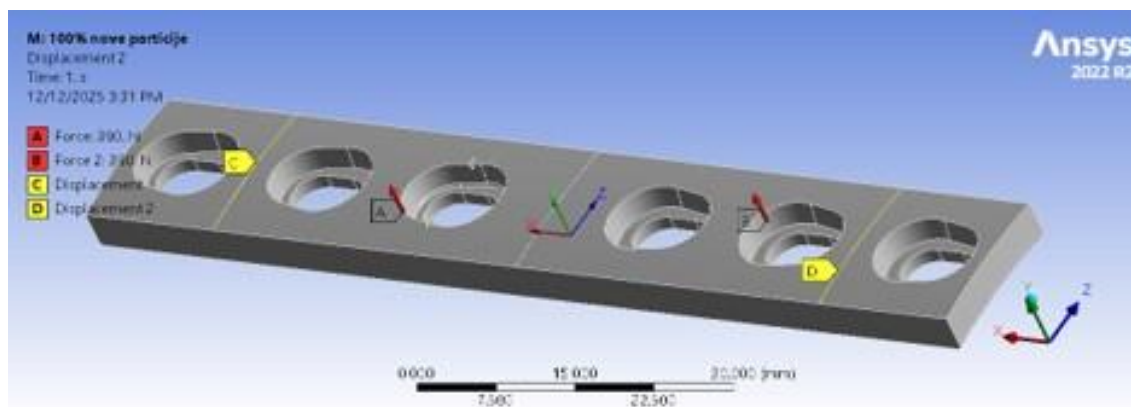


Slika 3.29 Postupak izrade modela ortopedske pločice sa strukturom saća dobijenom u softveru Simplify3D sa geometrijom prenešenom u SolidWorks [30].

SMART opcija rasta prsline pretpostavlja linearno-elastično i homogeno ponašanje materijala. Iako je PLA anizotropan materijal sa mikrostrukturnim defektima, u narednom poglavlju biće detaljno objašnjeno zbog čega je ovakav model opravdano usvojen. Numeričke simulacije izvedene su za savijanje u četiri tačke, prema standardu ASTM F382 [122], koji se koristi za ispitivanje metalnih ortopedskih pločica, kao u [36,40]. Usvojene su dve tačke opterećenja i dve tačke oslonca (slika 3.30).

Iako je u [36,40] korišćeno predloženo opterećenje od 3.9 kN, u ovom istraživanju numeričke simulacije bi se veoma brzo završile, pri čemu rezultati ne bi pokazali značajnu razliku između 10 modela. Zbog toga je amplituda opterećenja smanjena na 390 N, kako bi se dobile odgovarajuće vrednosti K , kao i broj ciklusa rasta zamorne prsline. Dakle, primenjeno je opterećenje koje iznosi 10% predviđenog opterećenja. S obzirom na to da je cilj istraživanja komparativna analiza uticaja količine ispune, a ne direktno predviđanje preostalog radnog veka u realnim uslovima, smanjenje opterećenja primenjeno je kako bi se omogućilo smisljeno i konzistentno poređenje odabranih unutrašnjih struktura.

Modeli su usvojeni u idealizovanom obliku, bez uzimanja u obzir potencijalnih grešaka nastalih usled procesa aditivne proizvodnje, kao što su defekti, unutrašnje šupljine, odstupanja od predviđenog pravca nanošenja niti, zatim uticaja uključaka, čije bi uključivanje značajno usložnilo numeričke simulacije. Iako FDM tehnologija ne omogućava izradu delova sa apsolutno 100% ispunjenošću, u ovom istraživanju model sa 100% količinom ispune usvojen je kao potpuno ispunjen [30].



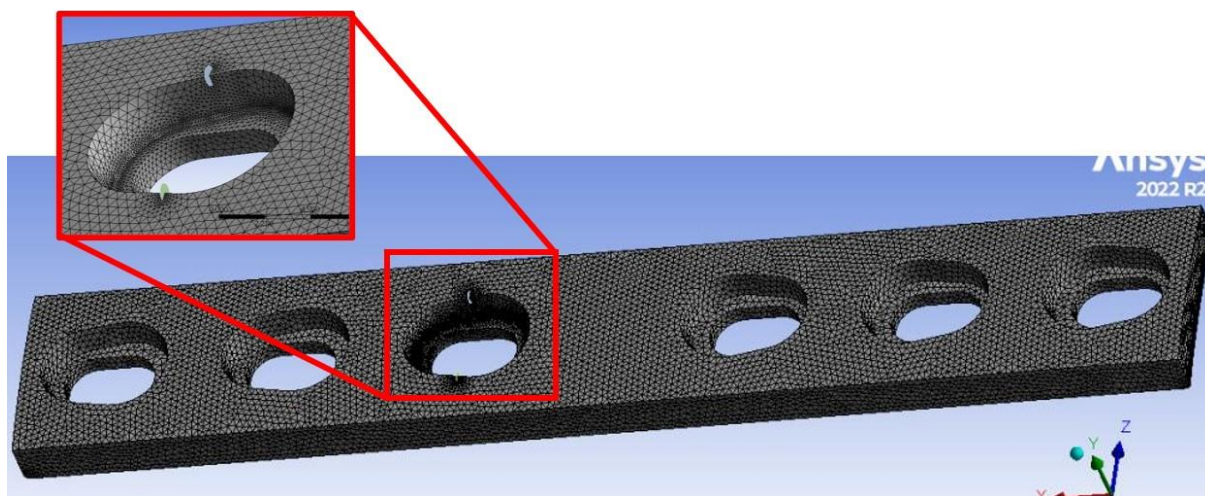
Slika 3.30 Primenjeno opterećenje i granični uslovi po pomeranju [30].

Na slici 3.30 mogu se videti dva linearna segmenta na gornjoj površini (naime, C i D) koji su ograničeni u pravcima y i z , dok je translacija duž x ose (uzdužni pravac) ostavljena slobodnom. Ovi granični uslovi primenjeni su samo radi stabilizacije modela i reprodukcije uslova oslanjanja eksperimentalne postavke, uz istovremeno smanjenje uticaja dodatne krutosti. Ovi segmenti su postavljeni dovoljno daleko od vrha prsline kako ne bi uticali na lokalno polje napona.

Na centralnom delu modela uvedeno je udaljeno pomeranje, kako bi se sprečio gubitak kontakta i prekomerna deformacija, pri čemu je deformacija omogućena samo u z pravcu, što odgovara fizičkom eksperimentu savijanja u četiri tačke. Opterećenje je primenjeno u vidu dve sile koje deluju na suprotnoj strani modela u odnosu na prslinu (A i B – slika 3.30).

Numeričke simulacije rasta zamorne prsline izvedene su na osnovu dobijenih Parisovih koeficijenata i sprovedene su isključivo za rezultate pri visini sloja od 0.1 mm, jer se ova visina sloja pokazala kao jedina kod koje je ostvaren konstantan i pravolinijski pravac rasta prsline u odnosu na preostale dve visine sloja (0.2 mm i 0.3 mm).

Za mrežu konačnih elemenata usvojena je veličina elementa od 0.5 mm (slika 3.31). Ovako fina mreža neophodna je zbog geometrijske složenosti oblasti oko otvora ortopedskih pločica. Početno je usvojena veličina elementa od 0.75 mm, koja je potom progresivno smanjivana. Primer za model sa 80% količine ispune prikazan je u tabeli 3.3. Na osnovu rezultata analize konvergencije zaključeno je da veličina elementa od 0.5 mm obezbeđuje dovoljnu konvergenciju mreže i odgovarajuću numeričku tačnost, budući da su dobijeni rezultati bili u opsegu rezultata za veličine elemenata od 0.55 i 0.6 mm [30].



Slika 3.31 Izgled mreže konačnih elemenata sa uvećanim prikazom oblasti u kojoj se nalaze prsline [30].

Tabela 3.3 Rezultati analize konvergencije mreže za numerički model ortopedske pločice sa 80% količine ispune [30].

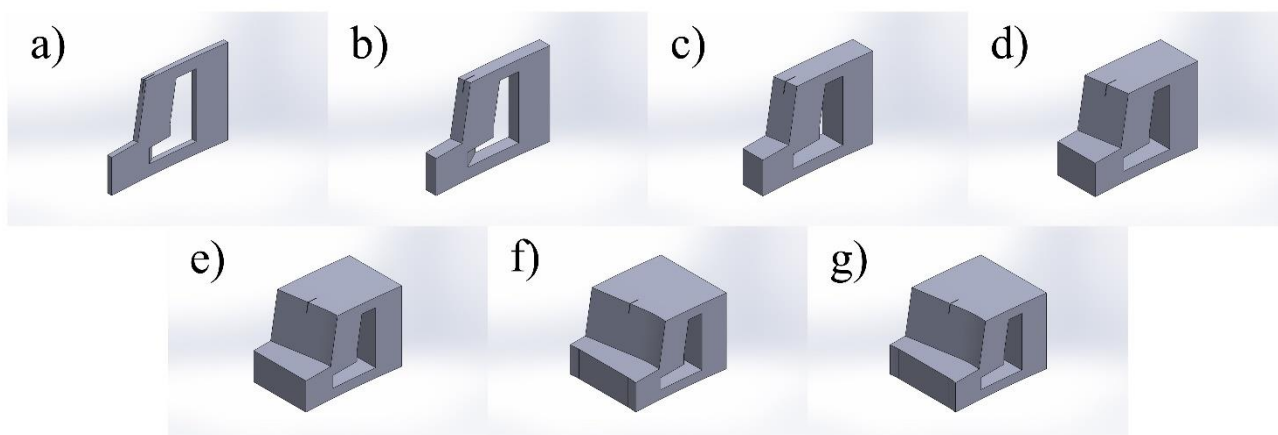
Veličina konačnog elementa [mm]	Broj ciklusa [-]	Rast prsline [mm]
0.75	23,881	1.666
0.70	24,143	1.737
0.65	24,789	1.741
0.60	24,926	1.778
0.55	24,392	1.711
0.50	24,596	1.714

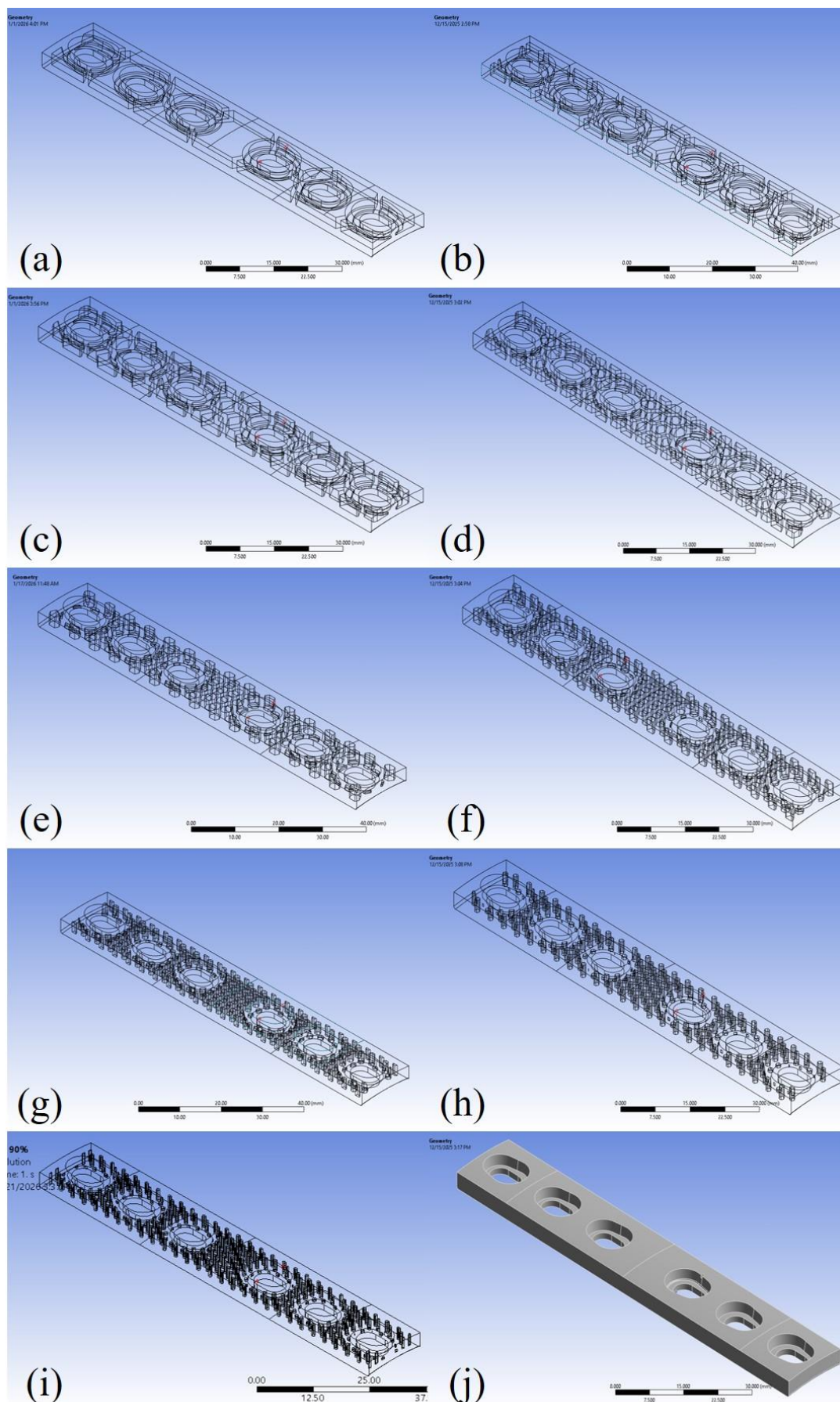
Isti princip generisanja mreže korišćen je i kod ostalih modela, osim kod modela sa 100% količinom ispune. Budući da kod ovog modela nema sačaste strukture, korišćena je nešto veća veličina elementa, u opsegu od 0.6 mm do 0.7 mm. Za diskretizaciju strukture primenjen je element SOLID187, 10-čvorni tetraedarski element sa kvadratnom interpolacijom, koji omogućava veću tačnost pri modelovanju zakrivljenih geometrija i posebno je pogodan za nepravilne mreže generisane na osnovu složenih CAD modela.

Na osnovu istraživanja [36,40], inicijalne prsline su postavljene na mestima utvrđene maksimalne koncentracije napona. Usled simetrije modela, tokom simulacija praćena je samo jedna od zamornih prsline. Inicijalne prsline idealizovane su u obliku četvrtine kruga, sa poluprečnikom od 0.5 mm.

Broj koraka opterećenja određivan je iterativno za svaki model i kretao se od 14 do 22, kako bi se obuhvatio rast zamorne prsline do početka nestabilne propagacije, koja odgovara nastupajućem lomu pločice. Svaki korak opterećenja podeljen je na više podkoraka, u opsegu od 5 do 10. Podela koraka na podkorake je obezbedila numeričku stabilnost i odgovarajuću konvergenciju tokom proračuna [30].

U analizi rezultata biće pokazano da se dobijeni broj ciklusa i konačni priraštaj prsline ne povećavaju sa povećanjem količine ispune, već da pokazuju neregularnu zavisnost. Pretpostavlja se da zbog položaja inicijalnih prsline udaljenih od središta pločice, količina materijala u njihovoj neposrednoj okolini nije ravnomerno raspoređena za različite količine ispune. Nastavak analize podrazumeva ispitivanje uticaja lokalne količine materijala u okolini prsline na dobijene rezultate primenom statističkih metoda za različite debljine materijala (slika 3.32). Pored toga, analiziraće se i stanje napona tokom procesa rasta prsline. Izgled svih numeričkih modela prikazan je na slici 3.33.

**Slika 3.32** Lokalna količina materijala oko prsline za različite razmatrane debljine: a) 0.2 mm; b) 0.5 mm; c) 1 mm; d) 2 mm; e) 3 mm; f) 4 mm; g) 5 mm.



Slika 3.33 Numerički modeli ortopedskih pločica u Ansys 2022 R2 softveru za: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100% količinu ispune [30].

4. Eksperimentalni i numerički rezultati i diskusija

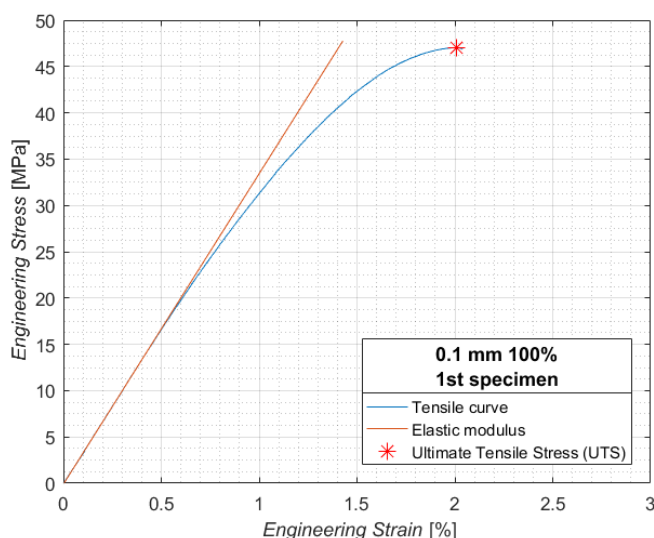
Kako je navedeno u prethodnom poglavlju, istraživanje obuhvata analizu ponašanja aditivno proizvedenih delova od PLA materijala i njihove otpornosti na lom. U ovom poglavlju biće prikazani i diskutovani rezultati istraživanja, organizovani po podpoglavljima koja obuhvataju sledeće segmente:

- Rezultati ispitivanja PLA materijala na zatezanje;
- Rezultati ispitivanja žilavosti loma prema LEML;
- Rezultati ispitivanja žilavosti loma prema EPML;
- Rezultati ispitivanja zamornog rasta prsline PLA materijala;
- Rezultati numeričkih simulacija i statističke obrade podataka modela ortopedskih pločica;
- Diskusija rezultata.

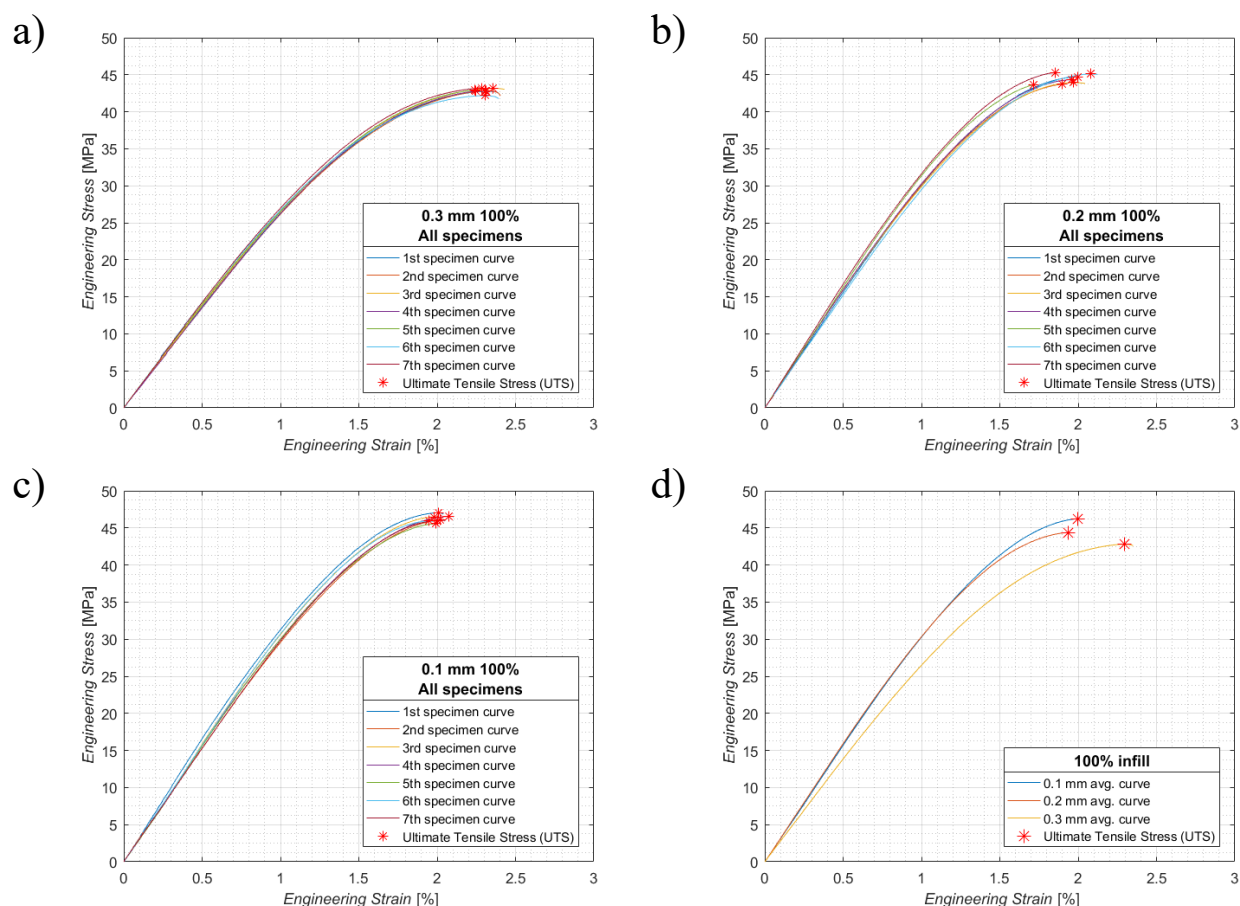
4.1. Rezultati ispitivanja PLA materijala na zatezanje

Ispitivanje PLA materijala na zatezanje sprovedeno je na sedam epruveta po grupi za količine ispune od 100% i 90%, za sve tri visine sloja. Kako je naglašeno u prethodnom poglavlju, dobijeni rezultati su dalje interpolirani sa rezultatima istraživanja [3], koji obuhvataju količine ispune od 10% do 90%. Na slici 4.1 prikazan je tipičan dijagram zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za jednu epruvetu sa visinom sloja od 0.1 mm i količinom ispune od 100%. Kao i kod ostalih epruveta ispitanih na zatezanje u okviru ovog istraživanja, sila je dostigla maksimalnu vrednost, pri kojoj je došlo do loma. Vrednosti modula elastičnosti E su dobijene pomoću programskog paketa MATLAB, procenom nagiba linearnog dela krive (slika 4.1).

Dijagrami zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za količinu ispune od 100% za sve tri razmatrane visine sloja prikazane su na slici 4.2a-c. Usrednjene krive za sve tri visine sloja prikazane su na slici 4.2d radi poređenja. Može se uočiti da se za visinu sloja od 0.1 mm dobija najviša vrednost σ_m (oko 46 MPa), zatim za visinu sloja od 0.2 mm (oko 44 MPa), dok je najniža vrednost dobijena za visinu sloja od 0.3 mm (oko 42 MPa). Modul elastičnosti E je vrlo sličan za visine sloja od 0.1 mm i 0.2 mm (oko 3.1 GPa), dok je za visinu sloja od 0.3 mm ta vrednost oko 2.78 GPa. Tačne vrednosti σ_m i E za sve količine ispune i visine sloja prikazane su u tabelama 4.1 i 4.2.



Slika 4.1 Dijagram zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za jednu epruvetu visine sloja 0.1 mm i sa 100% količinom ispune.



Slika 4.2 Dijagrami zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za seriju epruveta sa 100% količinom ispune: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm; d) usrednjene krive [57].

Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti da vrednosti prvenstveno zavise od količine ispune, pri čemu veće količine ispune daju bolje rezultate. Kada je reč o uticaju visine sloja, najviše vrednosti se dobijaju za visinu sloja od 0.1 mm, nešto niže za 0.2 mm, dok 0.3 mm daje najlošije rezultate. Kao što je prethodno naglašeno, kod polimernih materijala se umesto σ_{YS} može uzeti σ_m pri proceni RSD prema standardu ASTM D5045 [60], kao i pri konstrukciji linije zatupljenja prema jednačini (2.36). Za potrebe ovog istraživanja koristiće se vrednosti iz tabele 4.1.

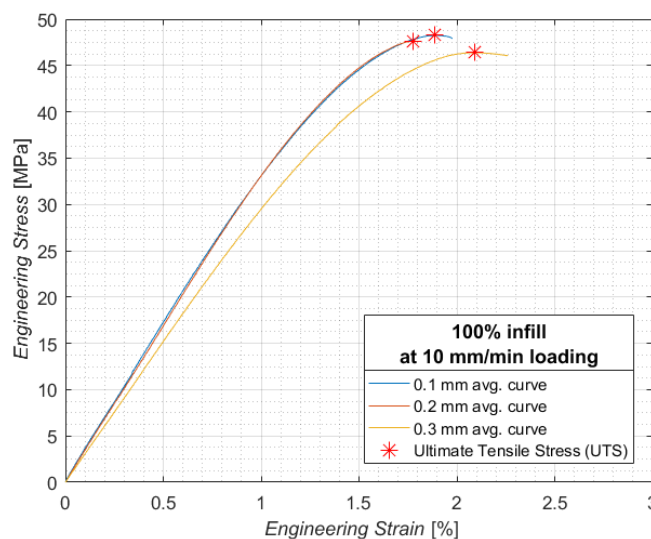
Tabela 4.1 Vrednosti zatezne čvrstoće σ_m za sve kombinacije količine ispune i visine sloja [57].

σ_m [MPa]	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
0.3 mm	42.827	40.251	38.805	38.273	34.868	32.790	32.426	29.374	28.304	27.273
0.2 mm	44.387	41.755	40.255	39.703	36.171	34.015	33.637	30.472	29.362	28.292
0.1 mm	46.236	43.598	42.032	41.455	37.767	35.517	35.122	31.817	30.658	29.541

Tabela 4.2 Vrednosti modula elastičnosti E za sve kombinacije količine ispune i visine sloja [57].

E [MPa]	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
0.3 mm	2779.5	2600.1	2462.4	2377.2	2201.1	2085.7	1973.9	1832.6	1750.5	1654.5
0.2 mm	3197.6	2976.7	2819.1	2721.5	2519.9	2387.8	2259.8	2098.1	2004.0	1894.2
0.1 mm	3178.0	2995.1	2836.6	2738.4	2535.5	2402.5	2273.8	2111.1	2016.4	1905.9

Navedeni rezultati dobijeni su pri kontroli pomeranja od 1 mm/min. Radi kalibracije viskoelastičnog modela materijala, moraju se uzeti u obzir i rezultati dobijeni pri višim brzinama opterećenja, te je sprovedeno ispitivanje epruveta pri kontroli pomeranja od 10 mm/min na epruvetama sa 100% količinom ispune [157]. Za dobijanje modela materijala potrebne su isključivo epruvete sa 100% količinom ispune, kako bi se odredile karakteristike osnovnog materijala. Što se tiče rezultata, na slici 4.3 su prikazane usrednjene krive za sve tri razmatrane visine sloja. Uočeno je manje odstupanje rezultata za epruvete sa visinom sloja od 0.2 mm u odnosu na epruvete od 0.1 mm, dok se 0.3 mm i u ovom slučaju pokazala kao najlošija. Ipak, maksimalna deformacija je kod visine sloja od 0.3 mm najveća pri obe brzine opterećenja (slike 4.2d i 4.3). Dobijeni usrednjeni rezultati pri kontroli pomeranja od 10 mm/min su prikazani u tabeli 4.3 [57].



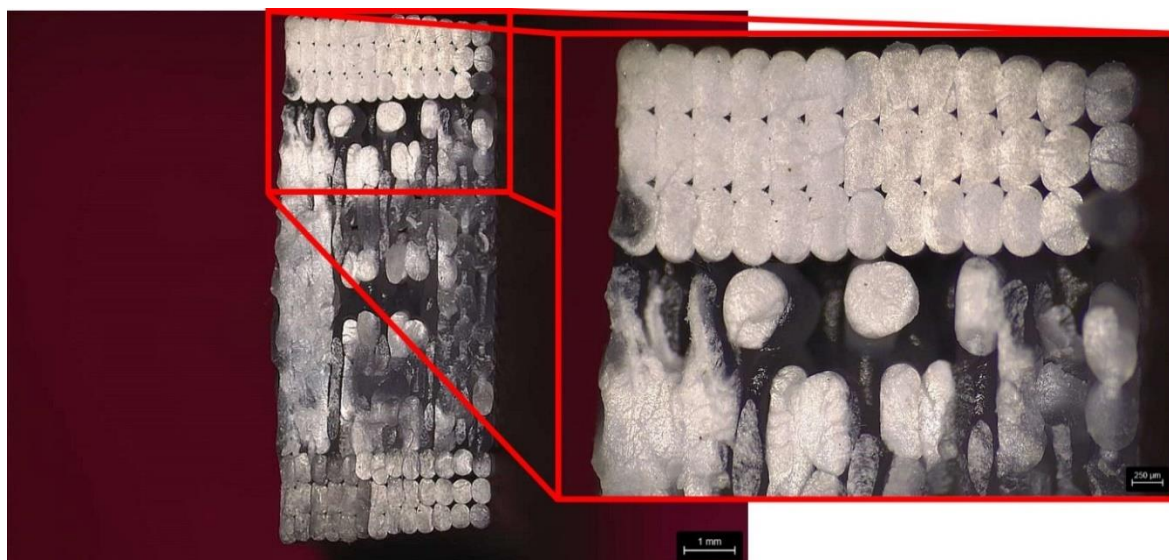
Slika 4.3 Dijagram zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije za epruvete ispitane pri kontroli pomeranja od 10 mm/min [57].

Tabela 4.3 Vrednosti σ_m i E za epruvete ispitane pri kontroli pomeranja od 10 mm/min [57].

	0.3 mm	0.2 mm	0.1 mm
σ_m [MPa]	46.387	47.651	48.257
E [MPa]	3004.06	3368.23	3389.657

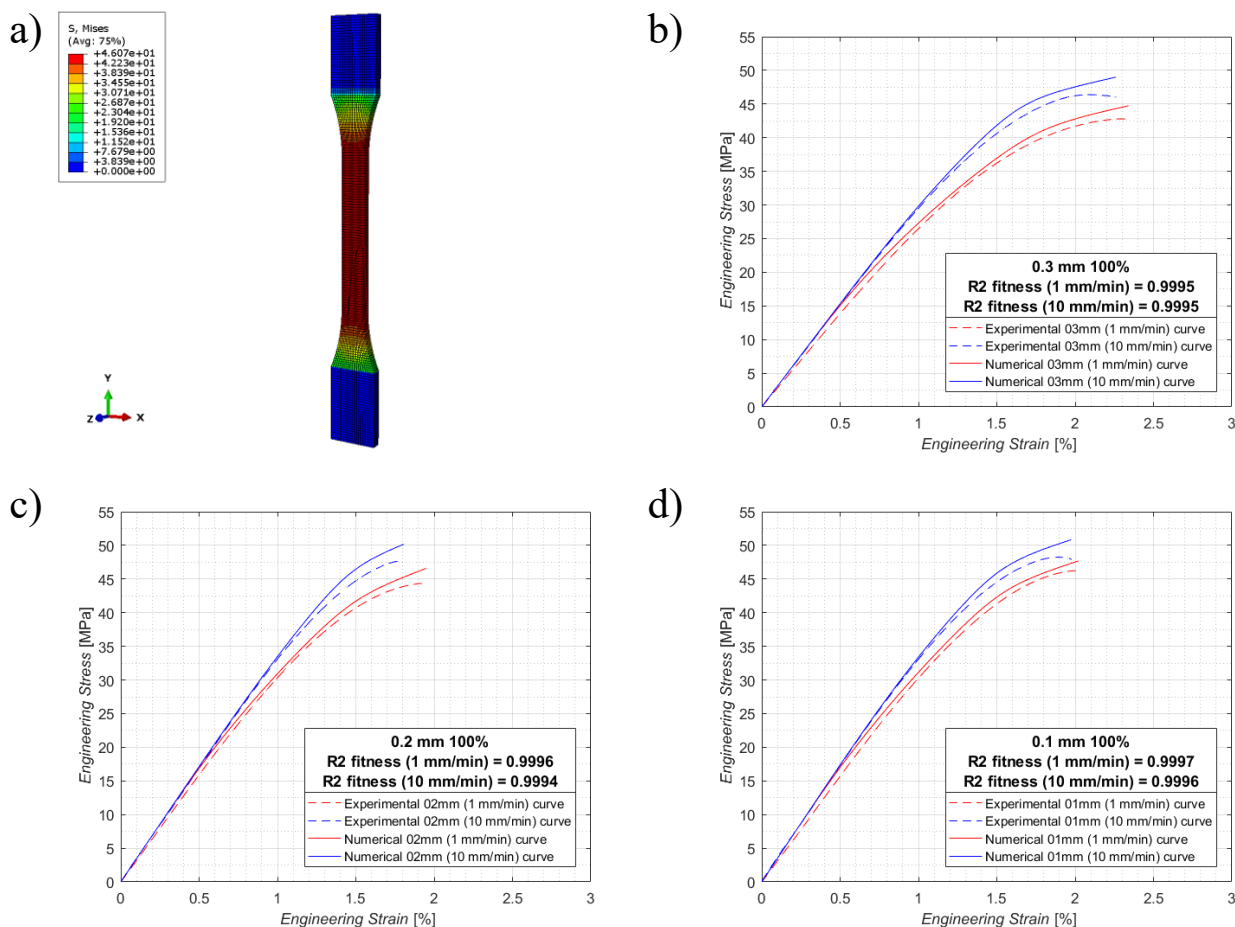
Iz navedenih tabela može se uočiti da su vrednosti σ_m i E veće pri većim brzinama opterećenja, dok su maksimalne deformacije koje materijal može da podnese nešto manje (slike 4.2d i 4.3). Epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm i 0.2 mm imaju maksimalnu deformaciju od oko 2%, dok je pri kontroli pomeranja od 10 mm/min ta vrednost nešto niža. Isto važi i za epruvete sa visinom sloja od 0.3 mm [57].

Sa dijagrama prikazanih na slikama 4.2 i 4.3 jasno se uočava da PLA materijal trpi relativno male deformacije do loma, koje ni u jednom slučaju ne prelaze 2.5%. Na osnovu optičke mikroskopije može se potvrditi da se PLA materijal ponaša kao (kvazi)krto materijal (slika 4.4). Na slici je prikazana prelomna površina epruvete za zatezanje sa 100% količinom ispune. Naime, sjajne i glatke prelomne površine kod polimera smatraju se karakterističnim za krte materijale [85]. Navedene vazdušne šupljine [8,50] jasno su uočljive na slici. Uveličani prikaz dat je u području ovojnice, gde se takođe mogu uočiti vazdušne šupljine.



Slika 4.4 Prelomna površina epruvete za zatezanje sa 100% količinom ispune sa uveličanim prikazom područja oko ovojnice.

Na osnovu dobijenih podataka iz ispitivanja na zatezanje pri različitim brzinama opterećenja izvršena je kalibracija modela PLA materijala u softveru MCalibration (Veryst Engineering LLC, Needham, MA, SAD) za sve tri razmatrane visine sloja. Dobijeni modeli materijala korišćeni su u MKE programu Abaqus (Dassault Systèmes, Velizy Vilakuble, Francuska) (slika 4.5a), pri čemu su parovi vrednosti von Misesovih napona i deformacija upoređeni sa eksperimentalnim podacima i pokazali veoma dobro poklapanje ($R^2 \geq 0.9995$, slika 4.5b-d) [57].



Slika 4.5 Kalibracija viskoelastičnog modela PLA materijala za različite visine sloja: a) model epruvete u programu Abaqus; b) 0.3 mm; c) 0.2 mm; d) 0.1 mm [57].

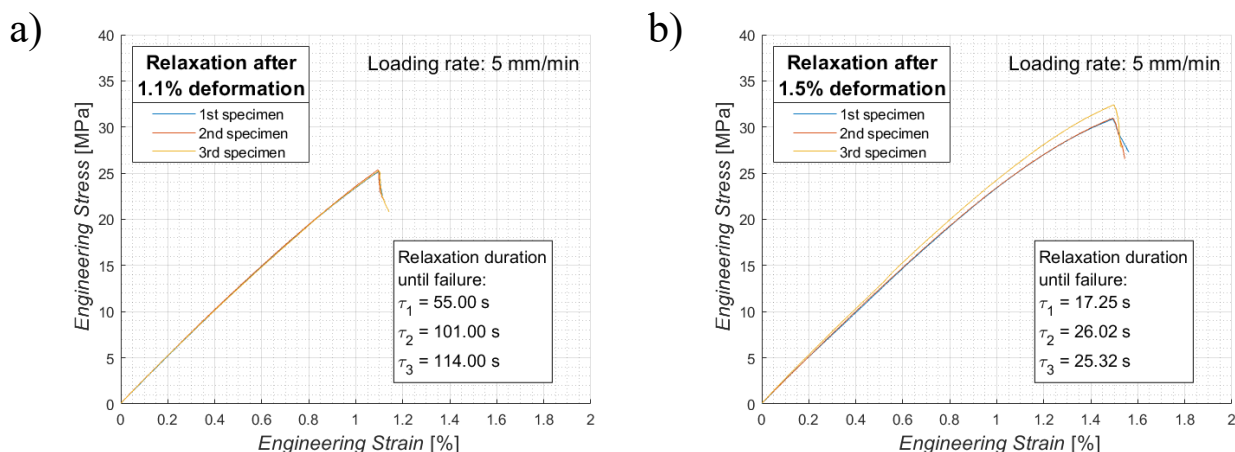
Navedeni viskoelastični model je TNM, koji ne sadrži kriterijum loma. Naime, budući da numeričke simulacije u ovom istraživanju sadrže defekt tipa prsline, neophodno je da model materijala sadrži odgovarajući kriterijum loma. U suprotnom, numerička simulacija čak i sa odgovarajućim modelom materijala koji dobro opisuje mehaničko ponašanje PLA materijala, ne bi dala zadovoljavajuće rezultate zbog pojave izuzetno velikih deformacija u okolini inicijalne prsline, koje ne bi rezultovale njenim širenjem [165,166].

Radi kalibracije odgovarajućeg modela materijala koji sadrži kriterijum loma, potrebno je pripremiti rezultate relaksacije i uzastopnog cikličnog opterećenja. Rezultati relaksacije materijala nakon dostizanja deformacija od 1.1% i 1.5% prikazani su na slici 4.6. Iako je vreme relaksacije (τ) na kidalici podešeno na 20 min, PLA materijal nije izdržao ni 120 s u slučaju deformacije od 1.1%, odnosno ni 30 s u slučaju deformacije od 1.5%. Umesto krive očekivanog oblika, kao što je prikazano na slici 3.5a, dobijeno je izuzetno malo podataka za kalibraciju TNV modela, koji sadrži odgovarajući kriterijum loma [167-169].

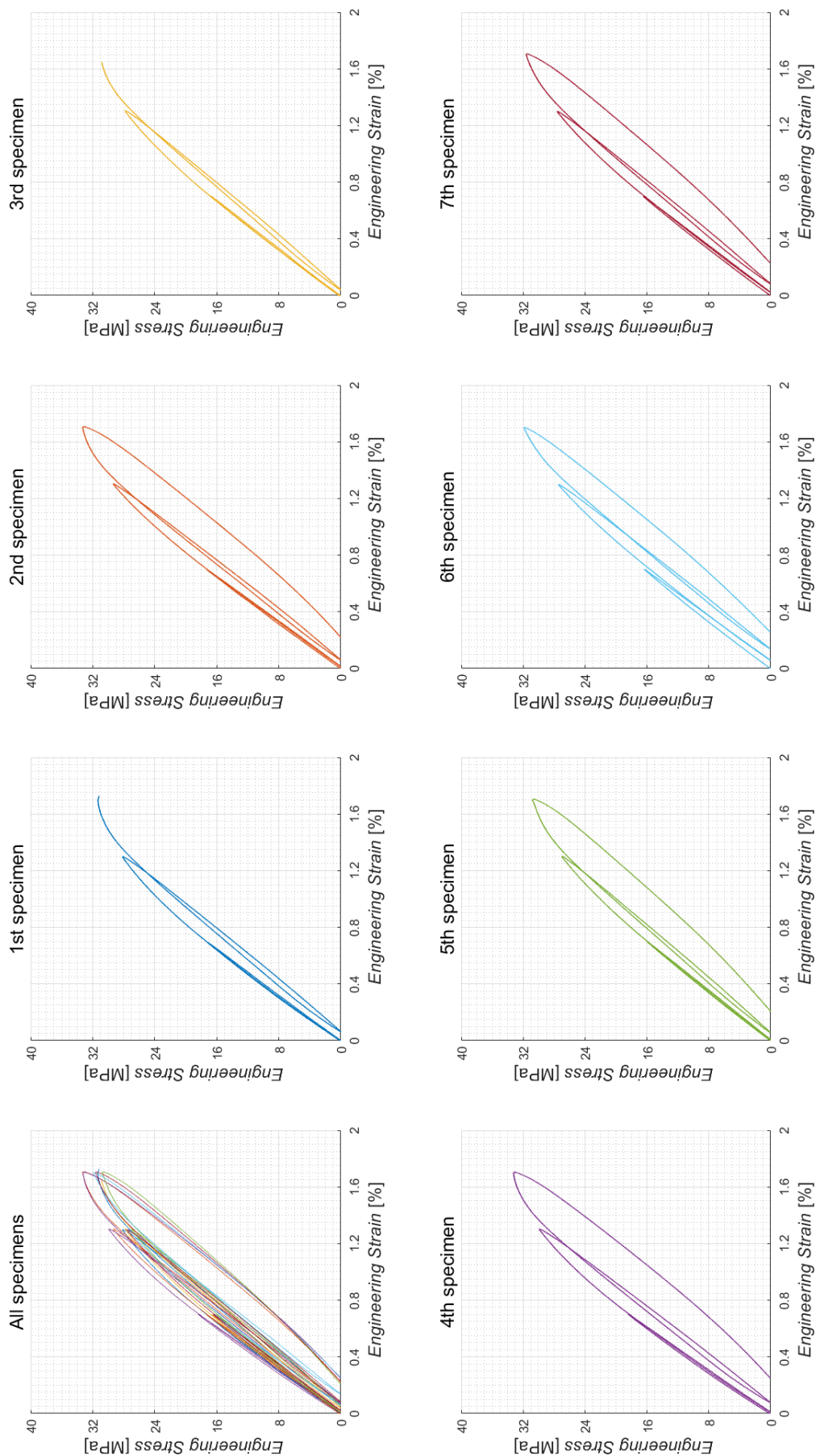
Radi dopune, sprovedeni su i uzastopni ciklusi opterećenja i rasterećenja materijala na sedam epruveta, prema planu prikazanom na slici 3.5b. Njihov objedinjeni i pojedinačni dijagrami zavisnosti inženjerskog napona od inženjerske deformacije prikazani su na slici 4.7. Na osnovu ovih ciklusa može se uočiti histerezis pri navedenim ciklusima opterećenja i rasterećenja.

Na slici 4.8 pojedinačni ciklusi opterećenja i rasterećenja razloženi su za svaku epruvetu, a njihov histerezis određen je na osnovu gustine energetskog gubitka ΔU (engl. *Hysteresis loss density*), izražene u $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Dobijene vrednosti nisu prelazile $7 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ pri prvom ciklusu, $40 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ pri drugom i $100 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ pri trećem ciklusu. Vredi napomenuti da je kod određenih epruveta došlo do loma pri opterećenju u trećem ciklusu. Ove vrednosti ukazuju na izuzetno mali kapacitet ovog PLA materijala za izdržavanje većih deformacija [170,171].

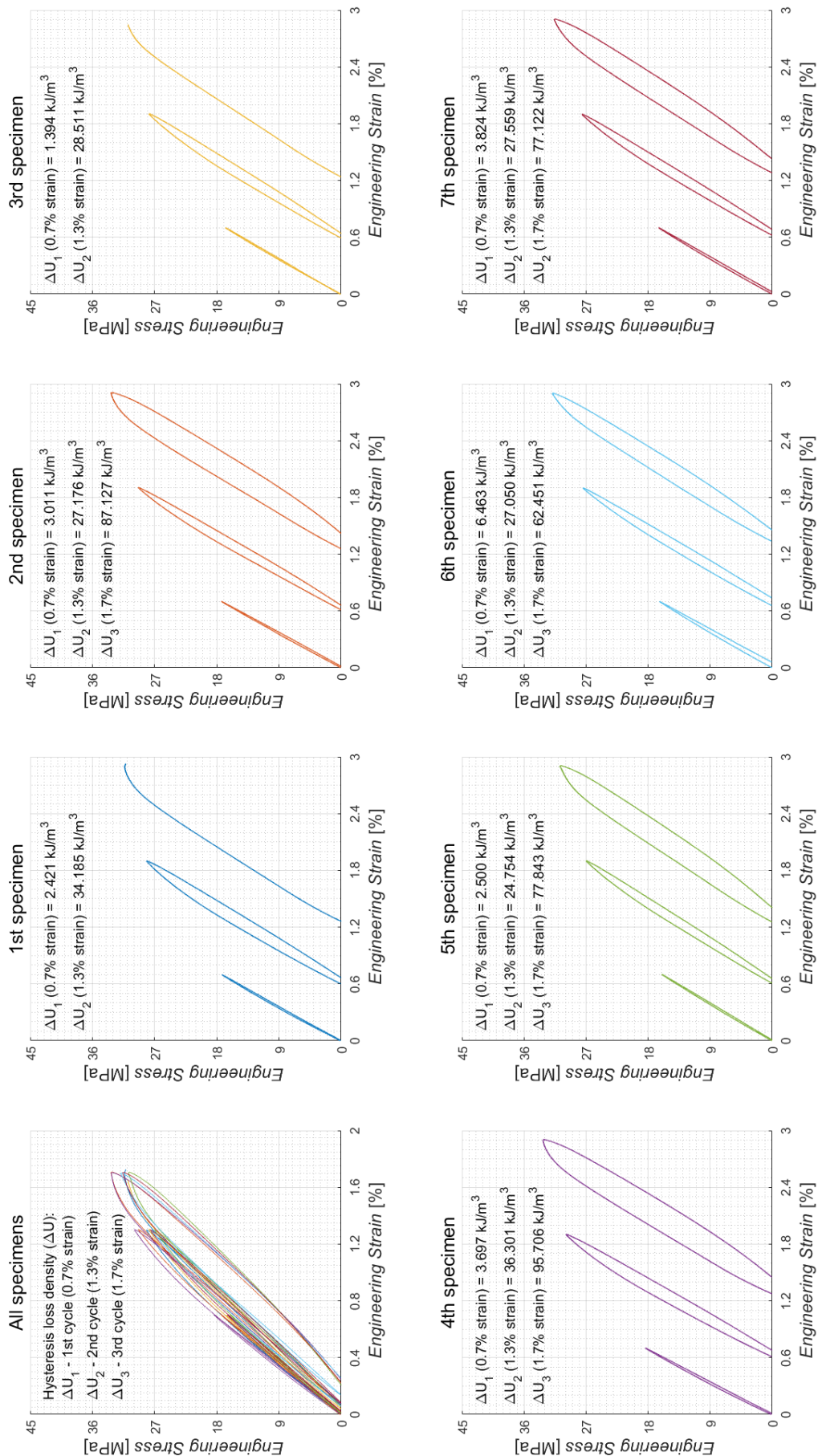
Uzimajući u obzir prikaz na slici 4.4, rezultate ispitivanja na zatezanje prikazane na slikama 4.2 i 4.3, kao i zaključke izvedene na osnovu rezultata prikazanih na slikama 4.6-4.8, smatra se opravdanim korišćenje linearno-elastičnih modela za opisivanje mehaničkog ponašanja ovog PLA materijala u prisustvu defekta tipa prsline.



Slika 4.6 Rezultati relaksacije PLA materijala nakon dostizanja: a) 1.1% deformacije; b) 1.5% deformacije.



Slika 4.7 Histerezisne petlje pri uzastopnim ciklusima opterećenja i rasterećenja PLA materijala.

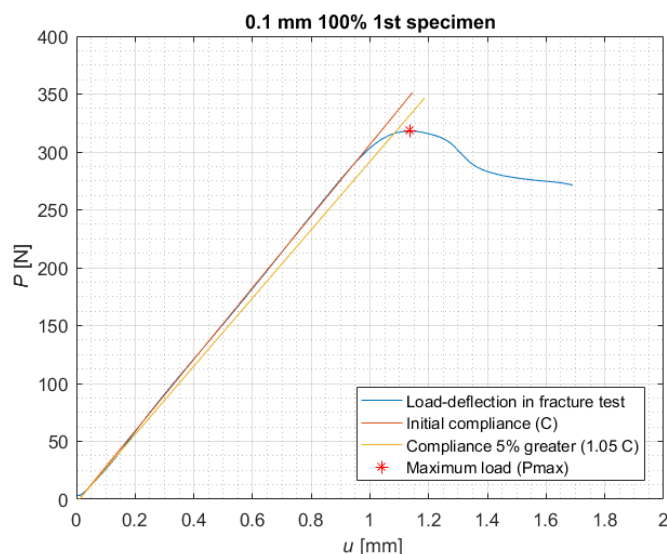


Slika 4.8 Gustina energetskeg gubitka pri uzastopnim ciklusima opterećenja i rasterećenja PLA materijala.

4.2. Rezultati ispitivanja žilavosti loma prema LEML

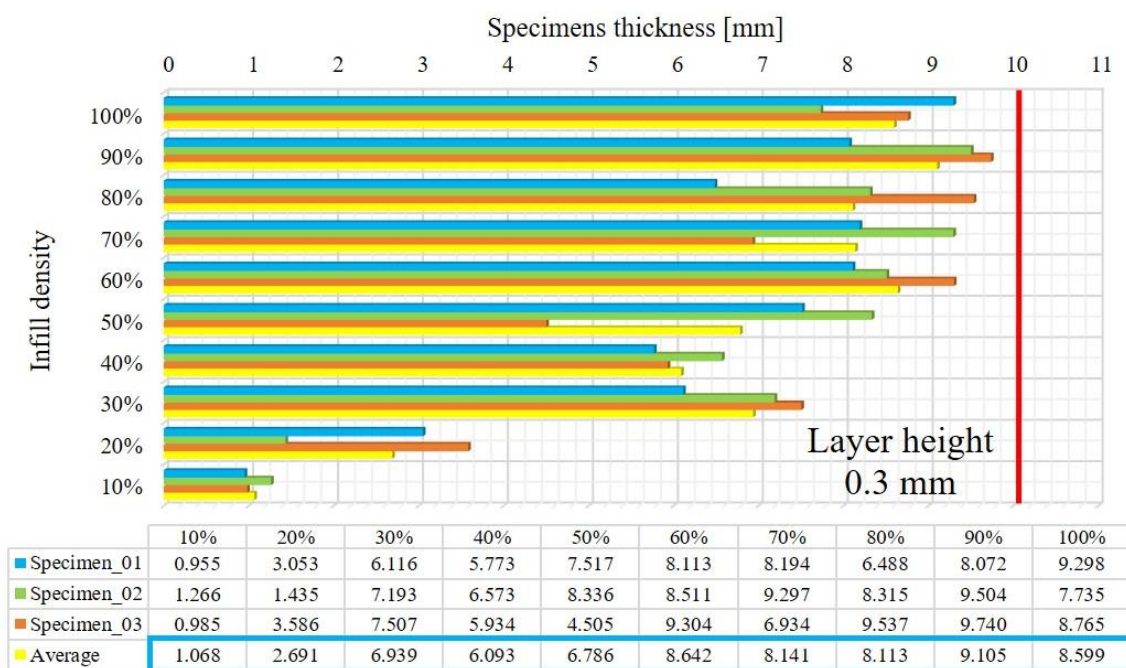
Ispitivanja žilavosti loma izvršena su prema standardu ASTM D5045 [60] na SENB epruvetama sa količinama ispune od 10% do 100%, sa inkrementom 10%, za sve tri razmatrane visine sloja (0.3 mm, 0.2 mm, 0.1 mm), što ukupno čini 30 serija epruveta.

Na svim epruvetama ucrtana je linija koja prati linearni deo krive sila-pomeranje, kao i linija sa definisanim nagibom u odnosu na tu liniju, prema jednačini (3.3), kako je objašnjeno u metodologiji (slika 4.9). Prilikom procene validnosti LEML potrebno je proveriti RSD stanje prema jednačini (2.10), kao i kriterijum sile prema zahtevima standarda. Budući da je PLA materijal dokazano kvazi-krt [49,50,85,103], očekivalo se da će biti moguće ispitati žilavost loma prema LEML za sve navedene serije epruveta. Najpre je pristupljeno proceni RSD stanja primenom jednačine (2.10) na svim SENB epruvetama, pri čemu se vidi da sve serije zadovoljavaju uslov RSD stanja za uzetu debljinu od 10 mm (slika 4.10).

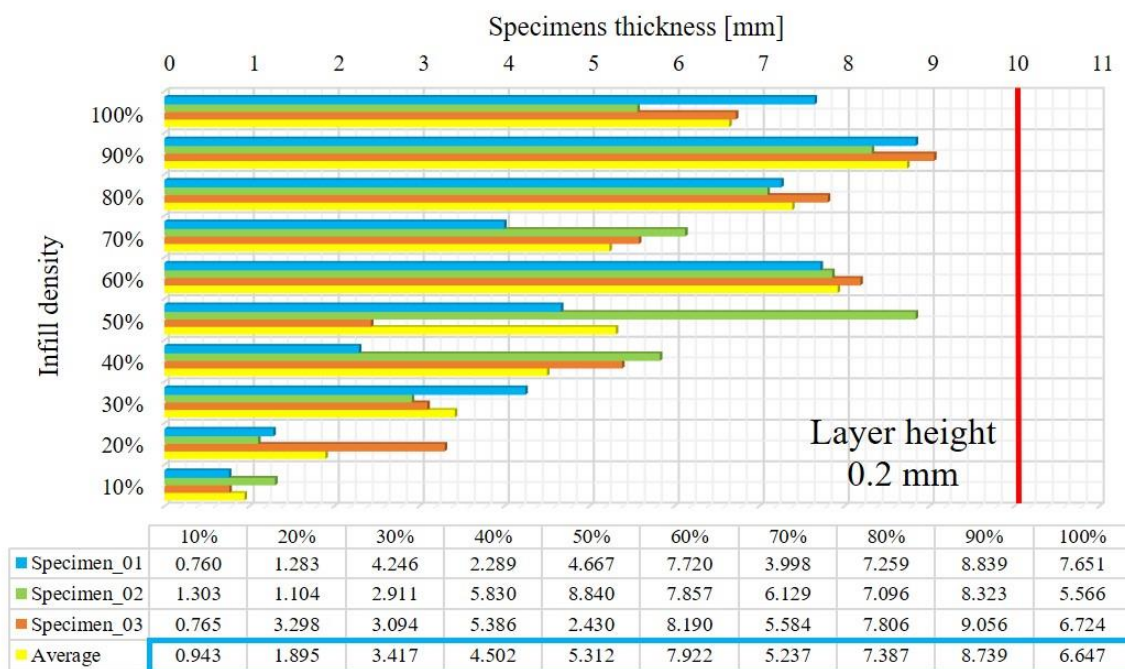


Slika 4.9 Dijagram sila-pomeranje za jednu SENB epruvetu ispitivanu prema standardu ASTM D5045 [60] sa ucrtanim linijama za evaluaciju.

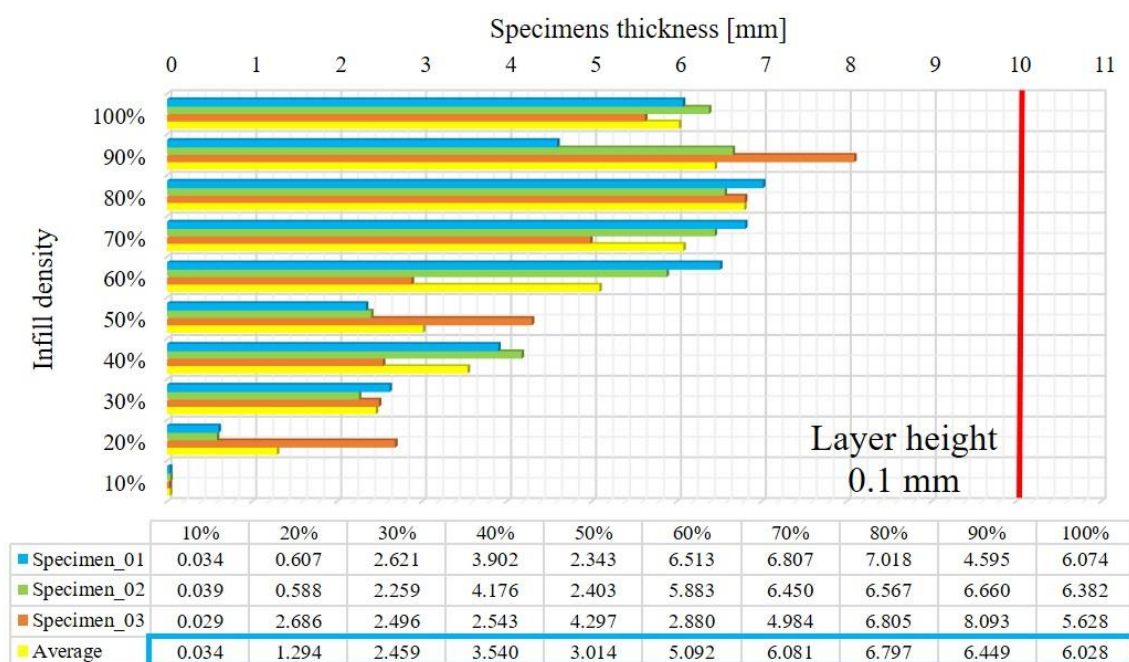
a)



b)



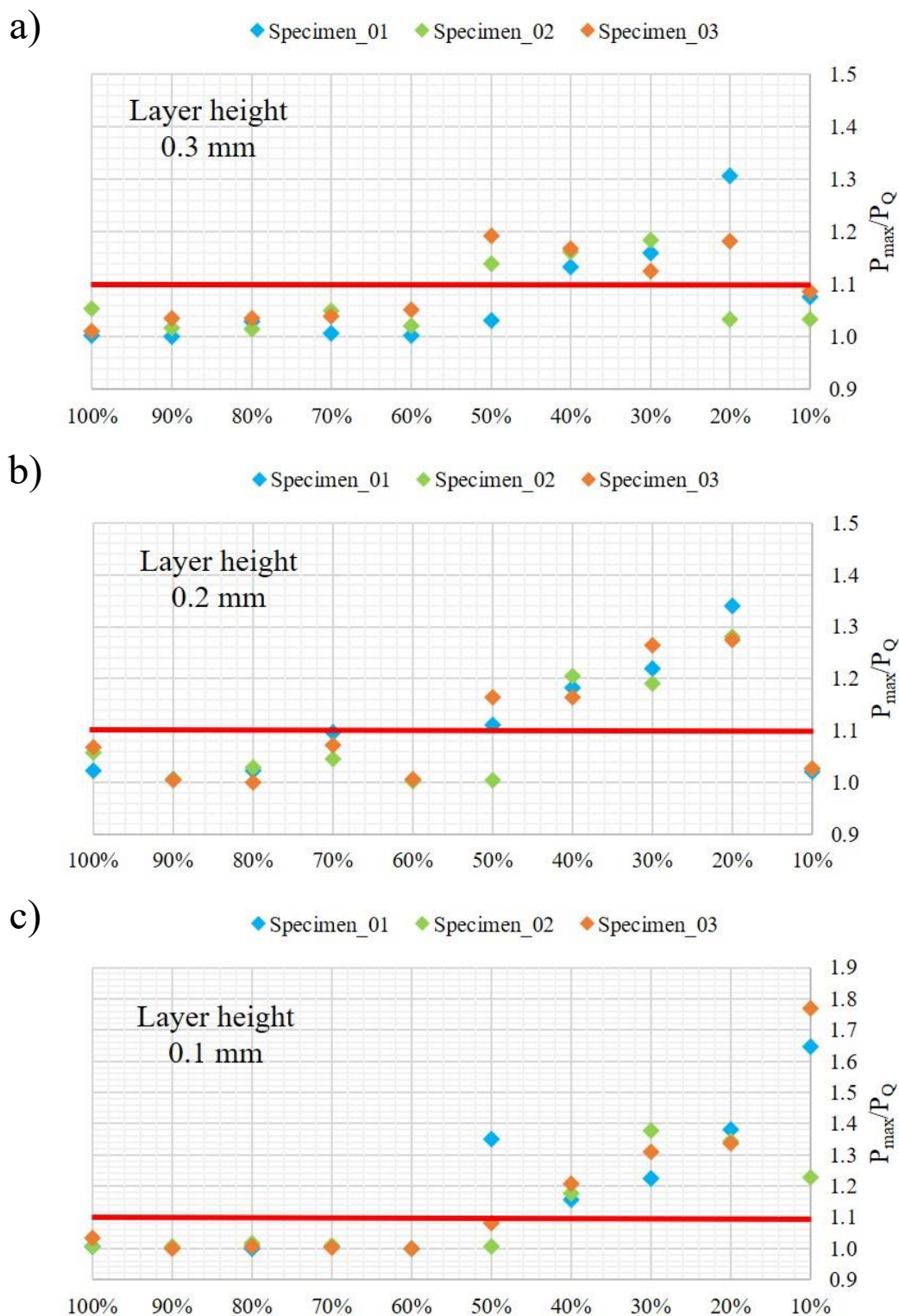
c)



Slika 4.10 Procena RSD stanja sa proračunatim vrednostima i ucrtanom graničnom vrednošću od 10 mm (crvena linija) na SENB epruvetama svih količina ispune za: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm visine sloja.

Međutim, prema kriterijumu sile situacija je drugačija (slika 4.11). Naime, SENB epruvete sa količinama ispune od 60% do 100% zadovoljavaju kriterijum sile za sve visine sloja, dok se pri količini ispune od 50% dešava da pojedine epruvete ne zadovoljavaju zadati kriterijum. Nadalje, pri količinama ispune od 20% do 40% epruvete ne zadovoljavaju ovaj kriterijum. Kod 0.3 mm i 0.2 mm visine sloja epruvete sa količinom ispune od 10% zadovoljavaju ovaj kriterijum, ali se zbog značajne degradacije mehaničkih osobina pri tako niskim količinama ispune, ove vrednosti ne smatraju validnim.

Dobijene vrednosti žilavosti loma K_{IC} (u $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) date su na slici 4.12. Sve epruvete koje nisu zadovoljile neki od kriterijuma LEML na slici su precrtane. Kao i kod rezultata ispitivanja na zatezanje i ovde se uočava da količina ispune značajno utiče na konačne rezultate, pri čemu veće količine ispune daju veće vrednosti. Razlike u rezultatima za različite visine sloja nisu toliko izražene kao u slučaju količine ispune, ali se za razliku od ispitivanja na zatezanje, ovde uočavaju bolje vrednosti pri većim visinama sloja, pre svega zbog veće debljine niti koje trpe opterećenje [82-84].



Slika 4.11 Kriterijum sile sa proračunatim vrednostima i ucrtanom graničnom vrednošću odnosa sila (1.1) na SENB epruvetama svih količina ispuna za: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm visine sloja.

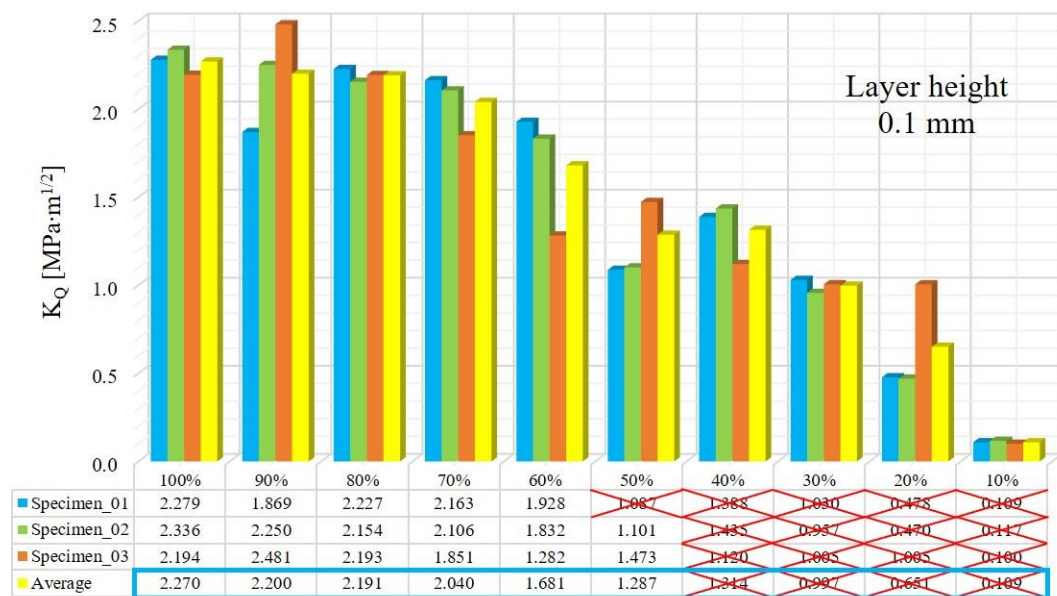
a)



b)



c)



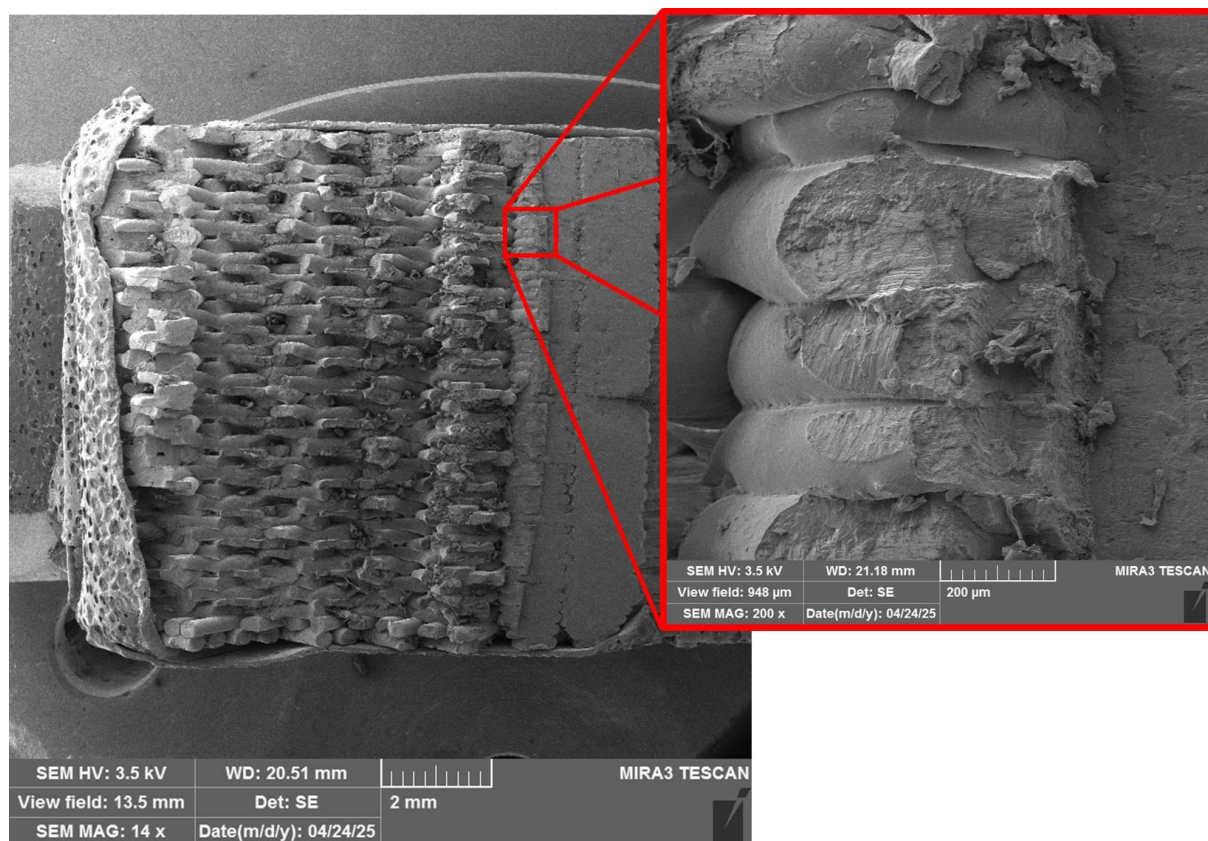
Slika 4.12 Procenjene vrednosti žilavosti loma K_{IC} svih količina ispuna za: a) 0.3 mm; b) 0.2 mm; c) 0.1 mm visine sloja.

Dobijene srednje vrednosti žilavosti loma (prema LEML) po visinama sloja su u rasponu od 2.27 do 2.51 MPa $\sqrt{m}$ za 100% količinu ispune, čime su ovi rezultati uporedivi sa vrednošću od 2.69 ± 0.1 MPa $\sqrt{m}$ dobijenom u [84].

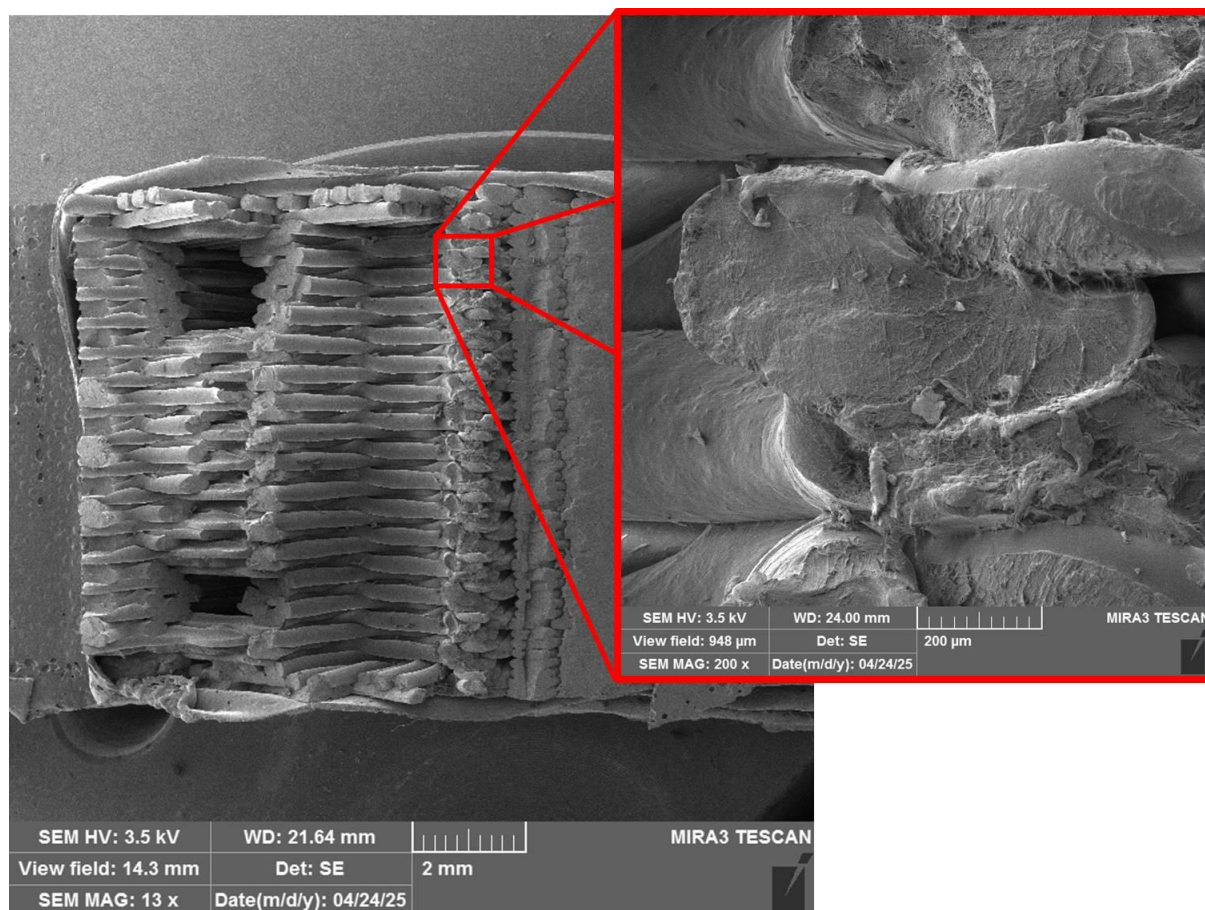
Sa smanjivanjem količine ispune vrednosti žilavosti loma opadaju do oko 1.8 MPa $\sqrt{m}$ za 50% količine ispune pri visini sloja od 0.3 mm, odnosno do oko 2 MPa $\sqrt{m}$ za 50% količine ispune pri visini sloja od 0.2 mm i oko 1.3 MPa $\sqrt{m}$ za 50% količine ispune pri visini sloja od 0.1 mm. Vrednosti za niže količine ispune ne smatraju se validnim prema zahtevima LEML i moraju biti procenjene primenom EPML.

Ova razlika u ponašanju SENB epruveta sa različitim količinama ispune najbolje se može uočiti poređenjem prelomnih površina epruvete koja je zadovoljila zahteve LEML (sa 100% količinom ispune, slika 4.13) i epruvete iz serije koja se mora opisati prema EPML (sa 40% količinom ispune, slika 4.14). Posmatra se isključivo deo prelomne površine na kojem je rasla prslina, prikazan na slikama 4.13 i 4.14 u uveličanom prikazu.

Naime, na slici 4.13 uočava se manje izražena fibrilacija i prelomna površina koja u izvesnoj meri podseća na površinu karakterističnu za krti lom polimernih materijala [85]. Odnosno, primetan je manji broj iščupanih vlakana u odnosu na slučaj prikazan na slici 4.14. Međutim, u poređenju sa optičkom mikroskopijom (slika 4.4), gde prelomna površina jasnije ukazuje na karakteristike krtog loma, SEM analiza pokazuje da je fibrilacija prisutna u određenoj meri i na površinama koje na optičkim snimcima imaju izgled karakterističan za krti lom. Pri većim količinama ispune prisutna je veća količina materijala koja trpi jednako opterećenje, dok se kod manjih količina ispune (slika 4.14) pretpostavlja pojava većih lokalnih deformacija na opterećenim mestima, što može biti razlog nemogućnosti interpretacije rezultata primenom principa LEML.

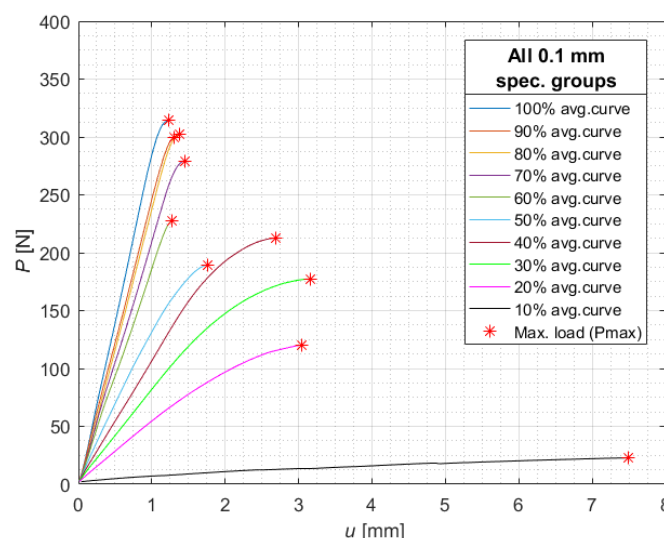


Slika 4.13 SEM mikroskopija prelomne površine SENB epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm i količinom ispune od 100%, sa uveličanim prikazom dela u kojem je rasla prslina.



Slika 4.14 SEM mikroskopija prelomne površine SENB epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm i količinom ispune od 40%, sa uveličanim prikazom dela u kojem je rasla prslina.

Mehanički odziv reprezentativnih rezultata prikazan je na slici 4.15. Uočava se da veće količine ispune (od 60% do 100%) imaju znatno veći udeo linearnog dela krive u odnosu na ostale količine ispune (od 20% do 50%), dok se rezultati za količinu ispune od 10%, kao što je već naglašeno, smatraju nevalidnim. Na osnovu ispitivanja žilavosti loma PLA materijala sa različitim količinama ispune i visinama sloja može se zaključiti da se samo oko polovine serija može tumačiti primenom principa LEML, dok je za serije sa manjim količinama ispune ($\leq 50\%$) neophodna dopuna rezultata primenom principa EPML.



Slika 4.15 Dijagram sila-pomeranje za reprezentativne rezultate svih količina ispune za visinu sloja od 0.1 mm.

4.3. Rezultati ispitivanja žilavosti loma prema EPML

Na osnovu prethodno prikazanih rezultata, za količine ispune od 10% do 50% žilavost loma je potrebno proceniti primenom principa EPML. Na ovaj način moguće je odrediti kritičnu vrednost J_{IC} na osnovu konstruisane J - R krive.

Kako je već naglašeno u prethodnim poglavljima, J - R kriva se može konstruisati na dva načina, primenom:

- Metode sa više uzoraka;
- Metode sa jednim uzorkom.

Obe metode imaju određene prednosti i nedostatke. Kod metode sa više uzoraka analitički proračun je relativno jednostavan, ali je eksperimentalni deo veoma zahtevan. Naime, potreban je veliki broj uzoraka, pri čemu njihov tačan broj nije unapred određen, jer je cilj da se za svaki naredni uzorak sa većim priraštajem dužine prsline što bolje reprodukuje mehanički odziv prethodne epruvete. Nasuprot tome, kod metode sa jednim uzorkom eksperimentalni deo je relativno jednostavan, pošto je dovoljno koristiti samo dva uzorka, dok je analitički deo složeniji i podložniji greškama u proračunu [64,66,96].

U ovom istraživanju predlaže se nova hibridna metodologija za konstrukciju J - R krivih na osnovu jednog uzorka, uz korišćenje dodatnih uzoraka radi poboljšanja prikupljanja podataka. Predložena hibridna metoda se analitički bazira na metodi sa više uzoraka, te koristi mogućnost određivanja trenutka početka stabilnog rasta prsline, slično metodi sa jednim uzorkom, uz primenu xFEM-a, DIC sistema i statističkih alata, koji zajedno omogućavaju određivanje potrebnih podataka za konstrukciju J - R krive.

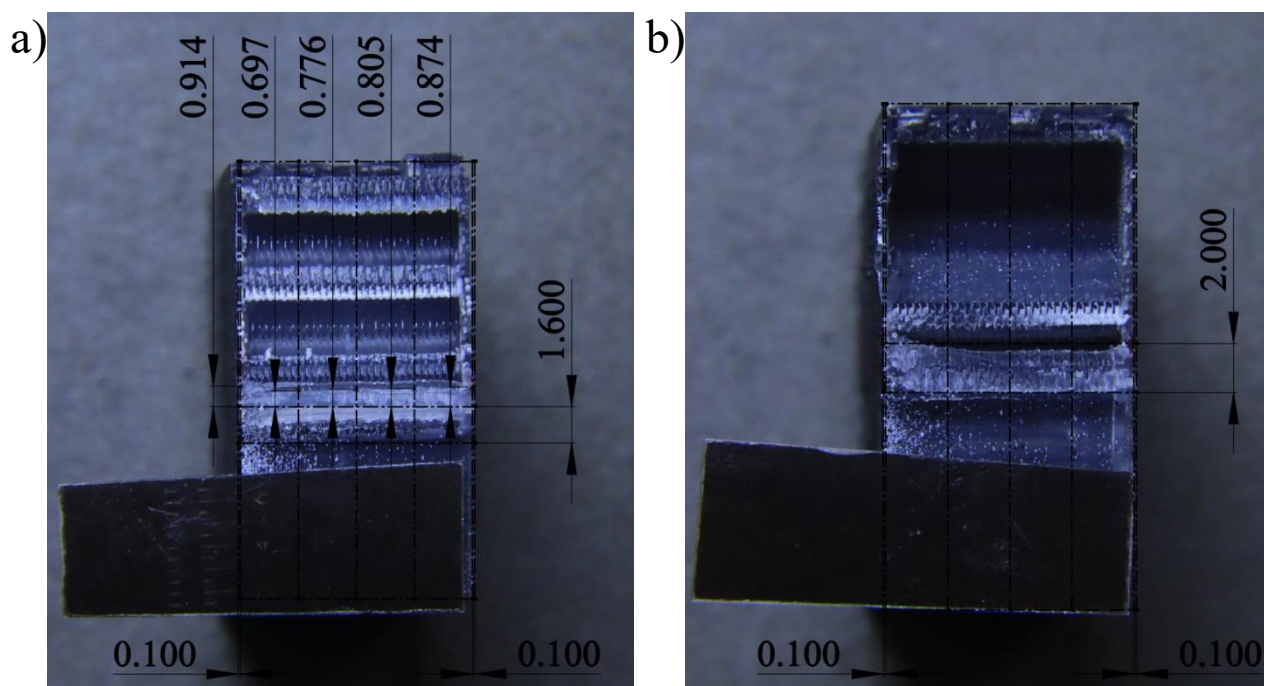
Pošto serije epruveta sa 50% količinom ispune samo delimično zadovoljavaju uslove za određivanje žilavosti loma prema LEMML, epruvete koje nisu zadovoljile principe LEMML mogu se koristiti za određivanje vrednosti J_{IC} . Dalje, dobijene vrednosti J_{IC} mogu se, preračunavanjem u K_{JIC} prema jednačini (2.37), uporediti sa prethodno dobijenim vrednostima K_{IC} , čime bi se izvršila verifikacija primenjene metode. Konačni cilj je da se izračunaju vrednosti J_{IC} za količine ispune od 10% do 40%, zatim preračunaju u K_{JIC} prema jednačini (2.37), kako bi se na jedinstven način uporedile vrednosti žilavosti loma za sve razmatrane količine ispune i visine sloja.

Kod procene dužine prsline, ova hibridna metoda obuhvata tri segmenta:

- Određivanje početka stabilnog rasta prsline;
- Propagaciju prsline;
- Maksimalnu vrednost dužine prsline (a_{max}).

Dobijena dužina prsline nakon ispitivanja SENB epruveta se određuje prema standardu ASTM D6068 [65] na način da se dužina meri na pet karakterističnih mesta na prelomnoj površini (slika 3.19). Na krajevima prelomne površine merenje se vrši na rastojanju od 0.1 mm od površine epruvete, pri čemu se te dve vrednosti usrednjavaju i zajedno sa preostale tri vrednosti unutar epruvete koriste za određivanje srednje dužine prsline. U ovom istraživanju merenje na prelomnim površinama je izvršeno pomoću Canon (Canon, Tokio, Japan) DSLR kamere na Stomatološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, postavljene u fiksiran položaj, dok je na svaku epruvetu postavljana merna skala radi očitavanja dužine prsline. Sama procena dužine prsline vršena je u programskom paketu SolidWorks (Dassault Systèmes, Velizi Vilakuble, Francuska), kao što je prikazano na slici 4.16a.

Merenje dužine prsline izvršeno je na epruvetama sa količinama ispune od 30% do 50%, dok na epruvetama od 10% i 20% zbog nedovoljne količine materijala nije bilo moguće pouzdano odrediti dužinu prsline, te su one izuzete iz daljeg istraživanja (slika 4.16b).



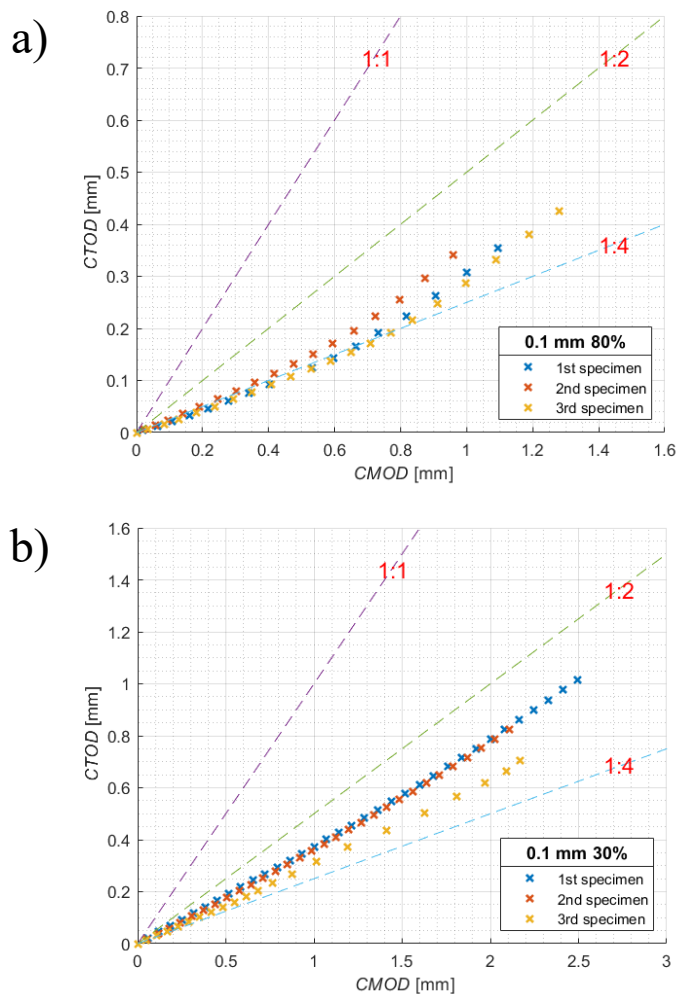
Slika 4.16 Merenje karakterističnih dužina prsline na prelomnim površinama SENB epruveta prema standardu ASTM D6068 [65] za: a) visinu sloja 0.1 mm i količinu ispune 50%; b) visinu sloja 0.1 mm i količinu ispune od 20%.

Izmerene karakteristične vrednosti za količine ispune od 30% do 50% za sve tri visine sloja prema ASTM D6068 [65] standardu, date su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4 Karakteristične tačke merene prema ASTM D6068 [65] za navedene epruvete.

Parametar i broj	Tačka 1	Tačka 2	Tačka 3	Tačka 4	Tačka 5	a_{max} [mm]
0.1mm 50% 01	0.914	0.697	0.776	0.805	0.874	0.7930
0.1mm 50% 02	0.638	0.560	0.628	0.795	/	0.6553
0.1mm 50% 03	0.996	0.830	0.693	0.624	/	0.7858
0.1mm 40% 01	0.903	0.687	0.766	0.678	0.577	0.7178
0.1mm 40% 02	1.170	0.717	0.639	0.609	0.678	0.7223
0.1mm 40% 03	1.070	0.685	0.597	0.578	0.725	0.6894
0.1mm 30% 01	0.805	0.717	0.726	0.923	0.707	0.7805
0.1mm 30% 02	1.159	0.727	0.707	0.629	0.736	0.7526
0.1mm 30% 03	1.139	0.756	0.776	0.520	0.717	0.7450
0.2mm 50% 01	1.120	0.992	0.727	0.786	0.550	0.8350
0.2mm 50% 02	0.930	0.718	0.727	0.737	0.894	0.7735
0.2mm 50% 03	0.946	0.799	0.740	0.937	0.572	0.8088
0.2mm 40% 01	0.805	0.721	0.717	0.639	0.619	0.6973
0.2mm 40% 02	0.902	0.726	0.707	0.804	0.814	0.7738
0.2mm 40% 03	0.823	0.765	0.745	0.774	0.676	0.7584
0.2mm 30% 01	0.698	0.580	0.737	0.659	1.061	0.7139
0.2mm 30% 03	0.805	0.668	0.618	0.785	0.919	0.7333
0.3mm 50% 01	0.951	1.133	0.864	0.667	0.529	0.8510
0.3mm 50% 02	0.745	0.696	0.824	1.010	1.186	0.8739
0.3mm 50% 03	0.982	/	/	0.845	0.875	0.8868
0.3mm 40% 01	0.787	0.883	0.747	0.686	0.636	0.7569
0.3mm 40% 02	0.707	0.756	0.766	0.865	0.894	0.7969
0.3mm 40% 03	0.854	0.717	0.648	/	0.993	0.7628
0.3mm 30% 01	0.726	0.648	0.588	0.500	0.930	0.6410

Kao što je naglašeno u prethodnim poglavljima, parametar otvaranja prsline, iako nema dovoljno teorijskih osnova, pruža odličnu procenu stanja oko vrha prsline. Kako bi se, kao u [80], sagledala zavisnost CMOD-a i CTOD-a, na slici 4.17 je prikazan odnos CMOD – CTOD za dve serije epruveta visine sloja od 0.1 mm, odnosno za 80% količine ispune (slika 4.17a) i 30% količine ispune (slika 4.17b). Na slici su ucrtane linije koje predstavljaju različite odnose CMOD-a i CTOD-a, radi lakšeg sagledavanja njihove međusobne zavisnosti (odnosi 1:1, 1:2 i 1:4).

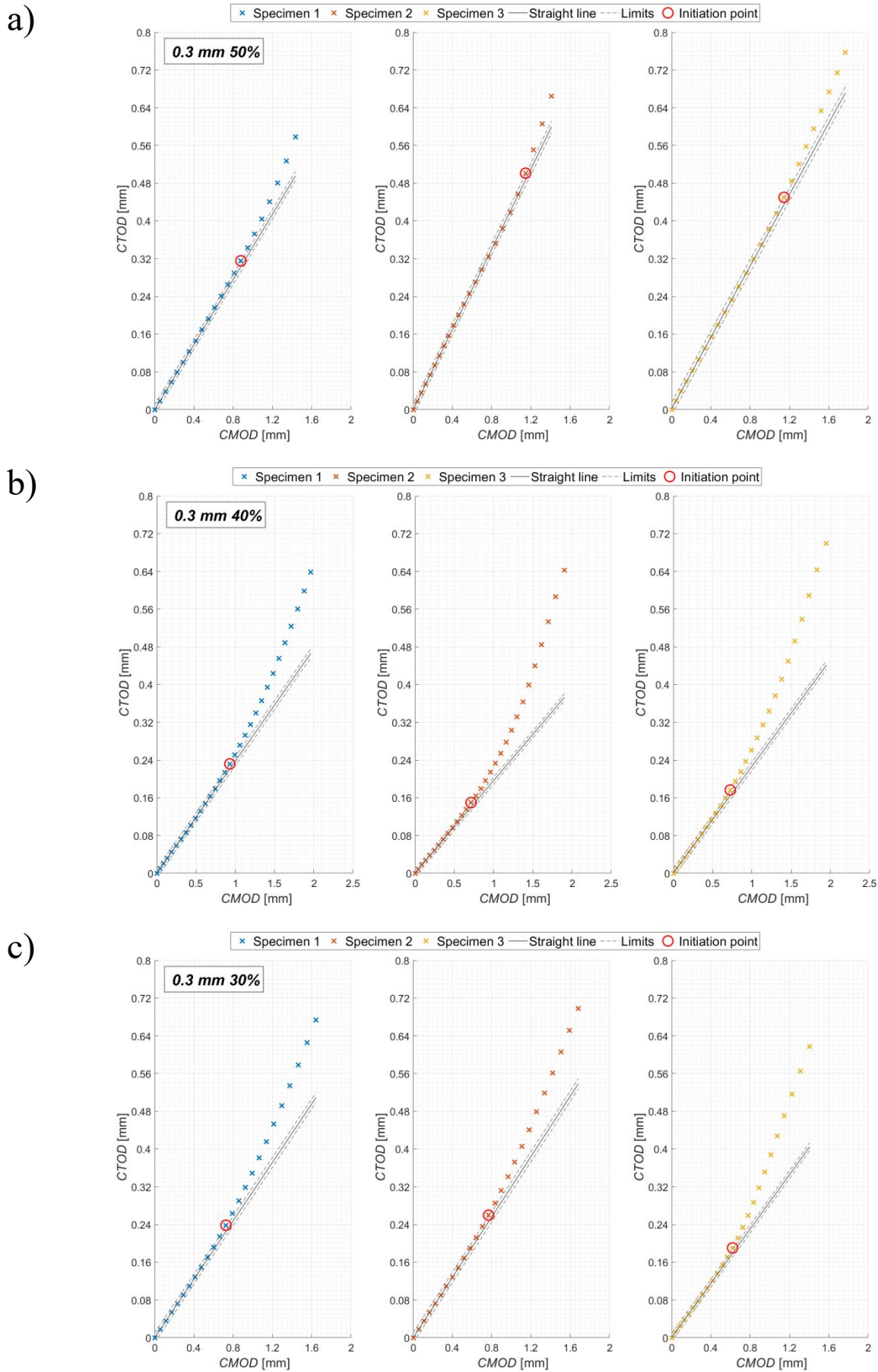


Slika 4.17 Odnos CMOD – CTOD za serije sa visinom sloja od 0.1 mm: a) 80% količine ispune; b) 30% količine ispune.

Na slici se uočava da su vrednosti CTOD-a veće u odnosu na CMOD kod manjih količina ispune i da su bliže odnosu 1:2, dok je na primer, kod 80% količine ispune ovaj odnos pretežno 1:4. Kako je prethodno naglašeno, manje količine ispune najverovatnije imaju veći stepen lokalne deformacije u odnosu na veće količine ispune, što se može odraziti i na odnos ove dve veličine otvaranja prsline. Važno je naglasiti i da se, na osnovu slike 4.17, ovaj odnos CMOD-a i CTOD-a na početku može smatrati linearnim, nakon čega sledi brži porast CTOD-a.

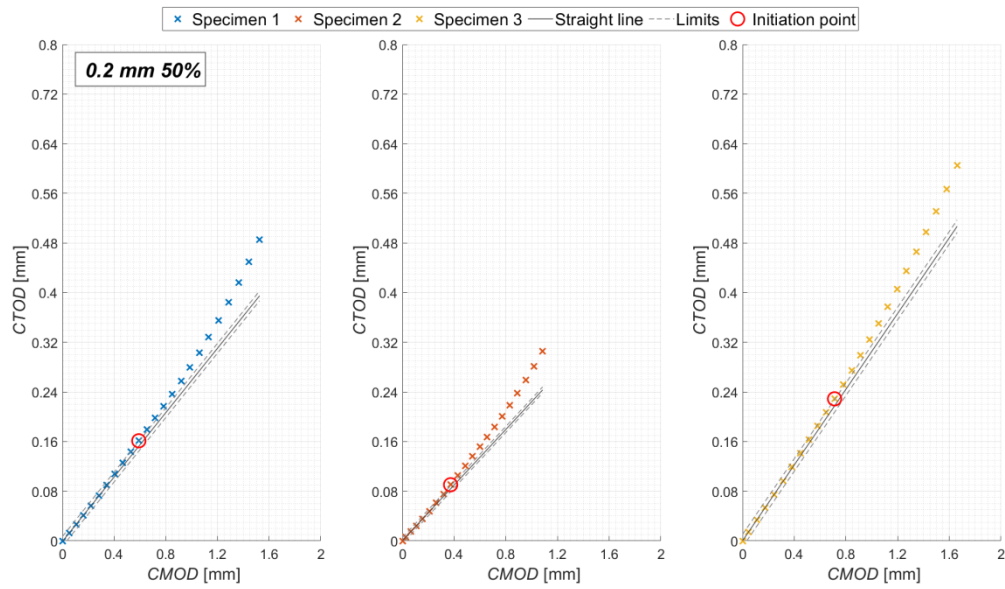
Na osnovu zaključka da kada CTOD raste brže od CMOD-a može da se pretpostavi odvijanje određenog procesa oko vrha prsline, u ovom slučaju usvojeno je da se na linearnu zavisnost CMOD-a i CTOD-a postavi referentna linija. Prema Velsu [42], otvaranje prsline ukazuje na nastajanje novih površina prsline, pa je usvojeno da prekoračenje odnosa za $\pm 2\%$ u odnosu na referentnu liniju predstavlja početak otvaranja prsline oko njenog vrha, odnosno početak fenomena stvaranja novih površina prsline – početak njenog stabilnog rasta. Granična vrednost od $\pm 2\%$ usvojena je po ugledu na parametre $J_{0.2}$ i $\sigma_{0.2}$.

Na slikama 4.18 – 4.20 je prikazana ova zavisnost za posmatrane serije SENB epruveta, sa količinama ispune od 30% do 50%, za sve tri navedene visine sloja.

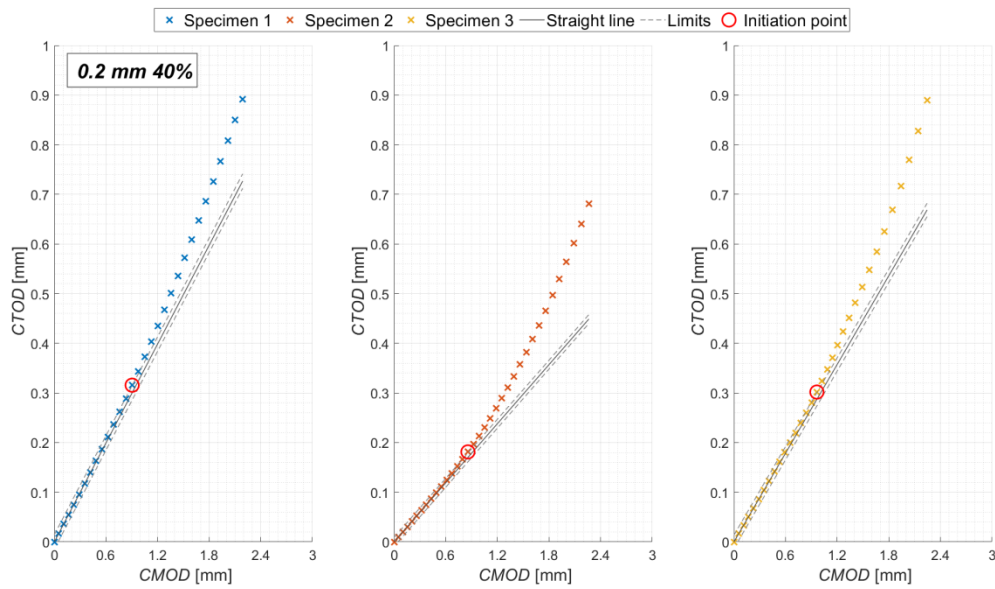


Slika 4.18 Odnos CMOD – CTOD za 0.3 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

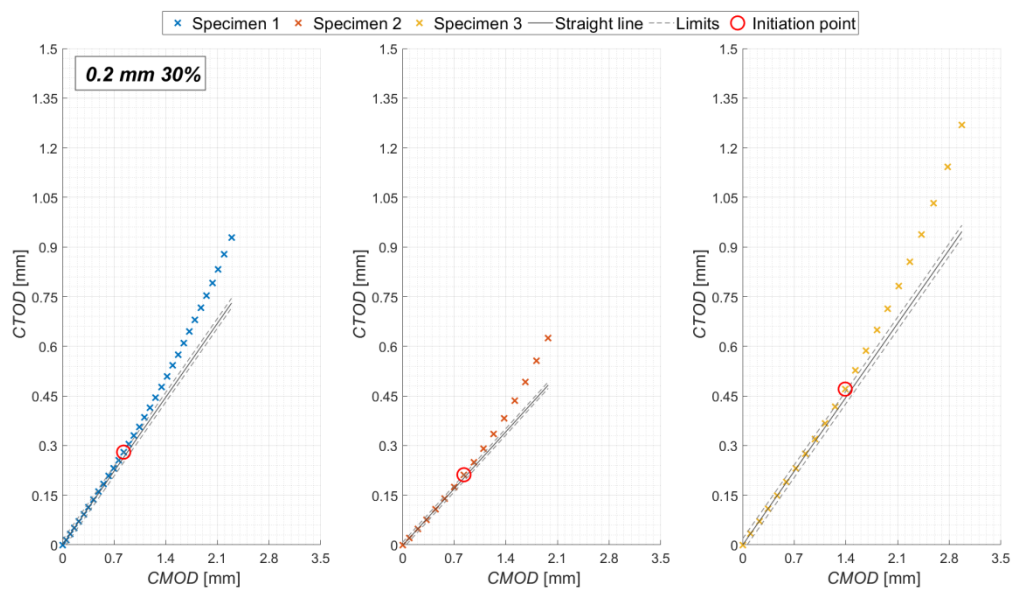
a)



b)

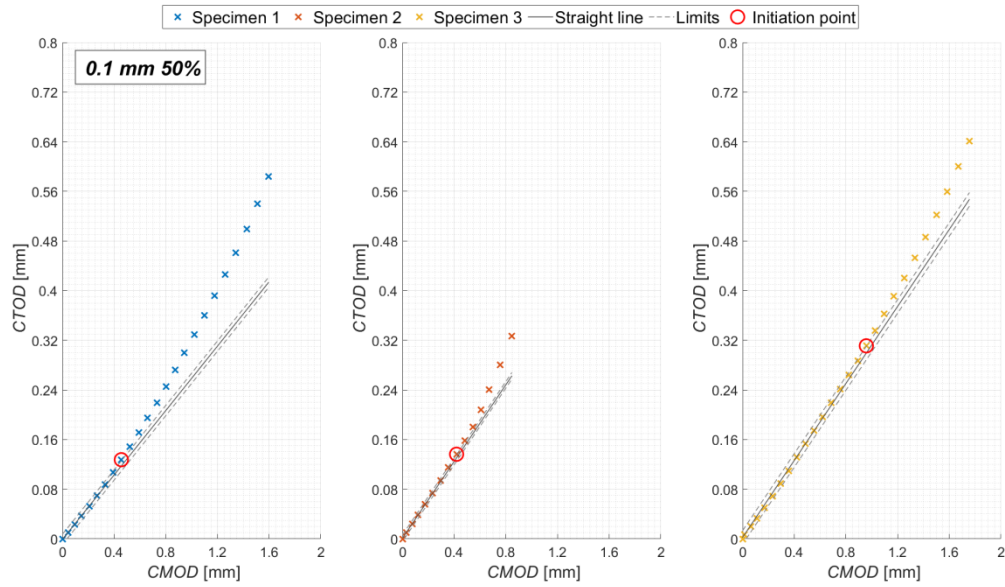


c)

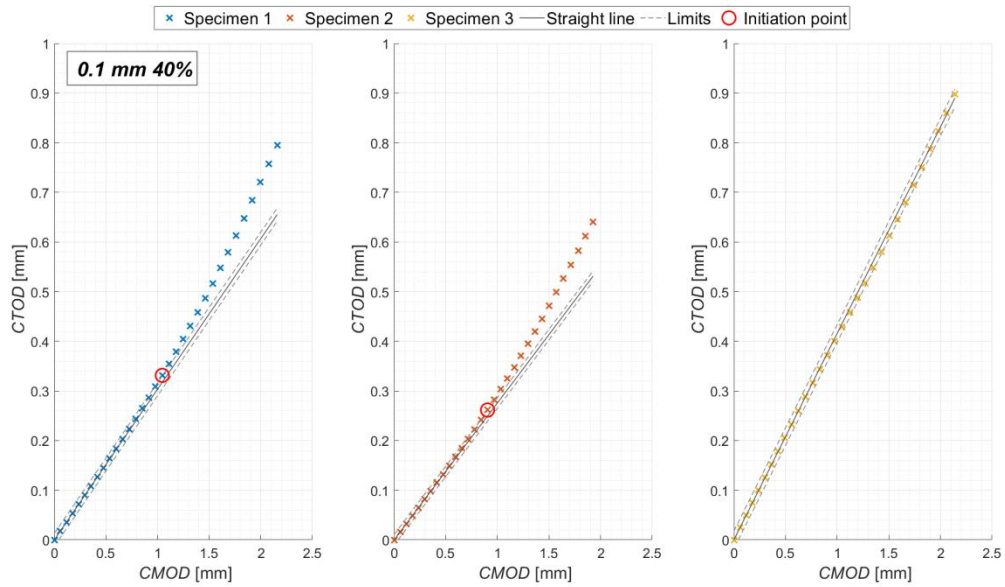


Slika 4.19 Odnos CMOD – CTOD za 0.2 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

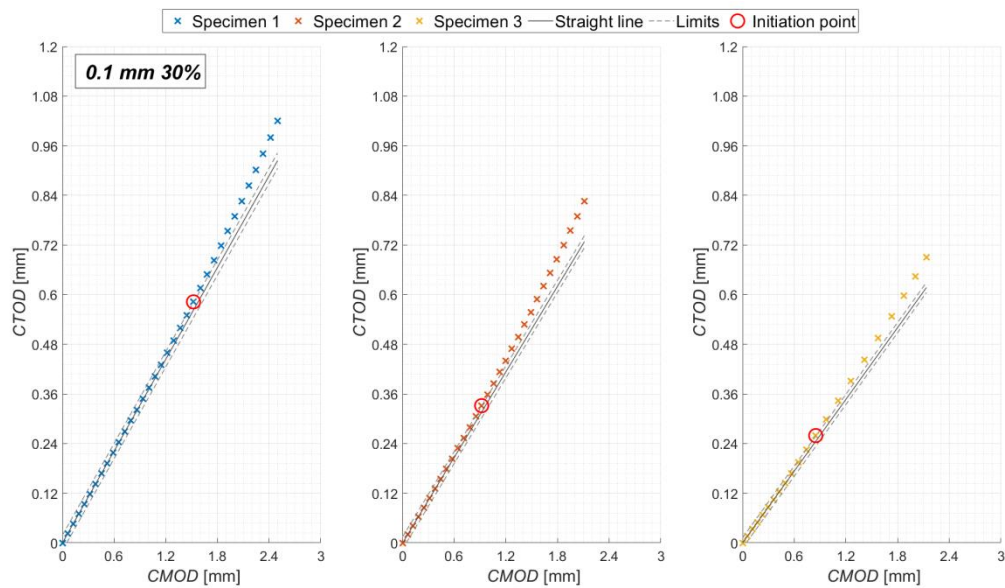
a)



b)



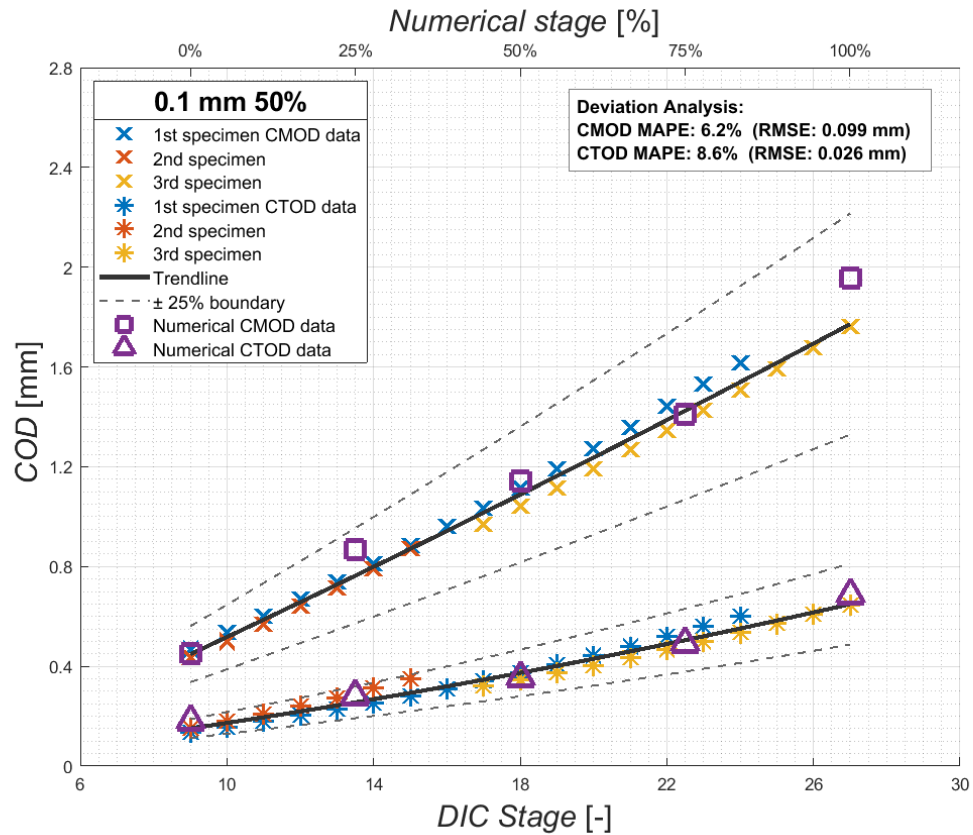
c)



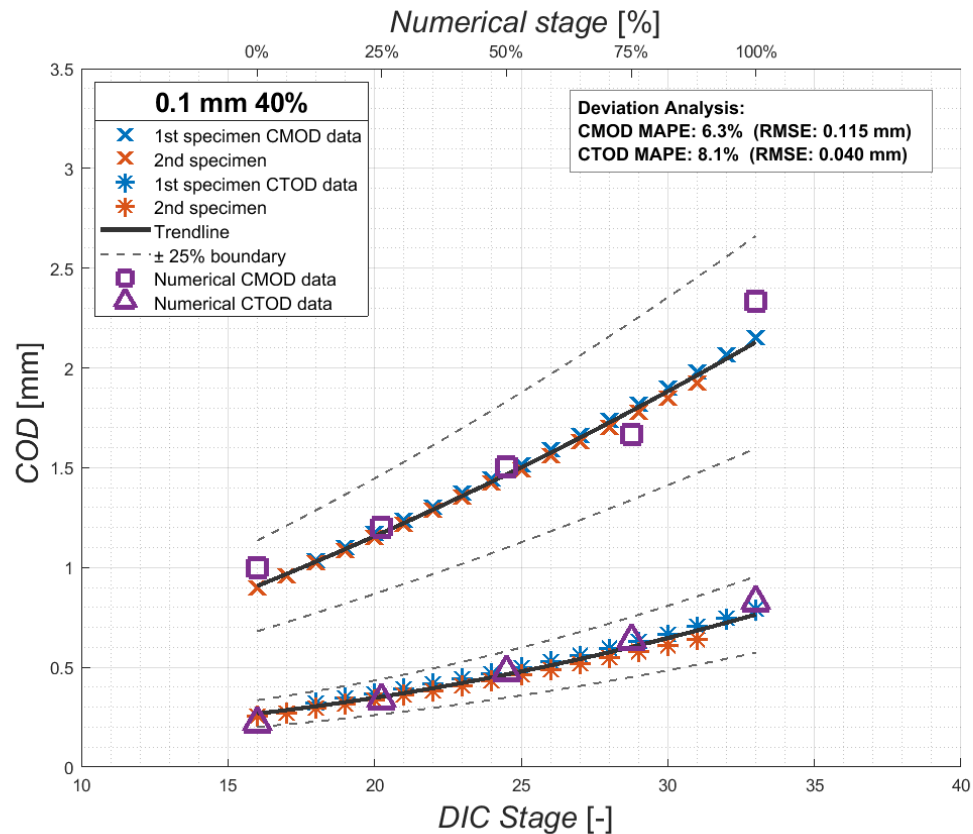
Slika 4.20 Odnos CMOD – CTOD za 0.1 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

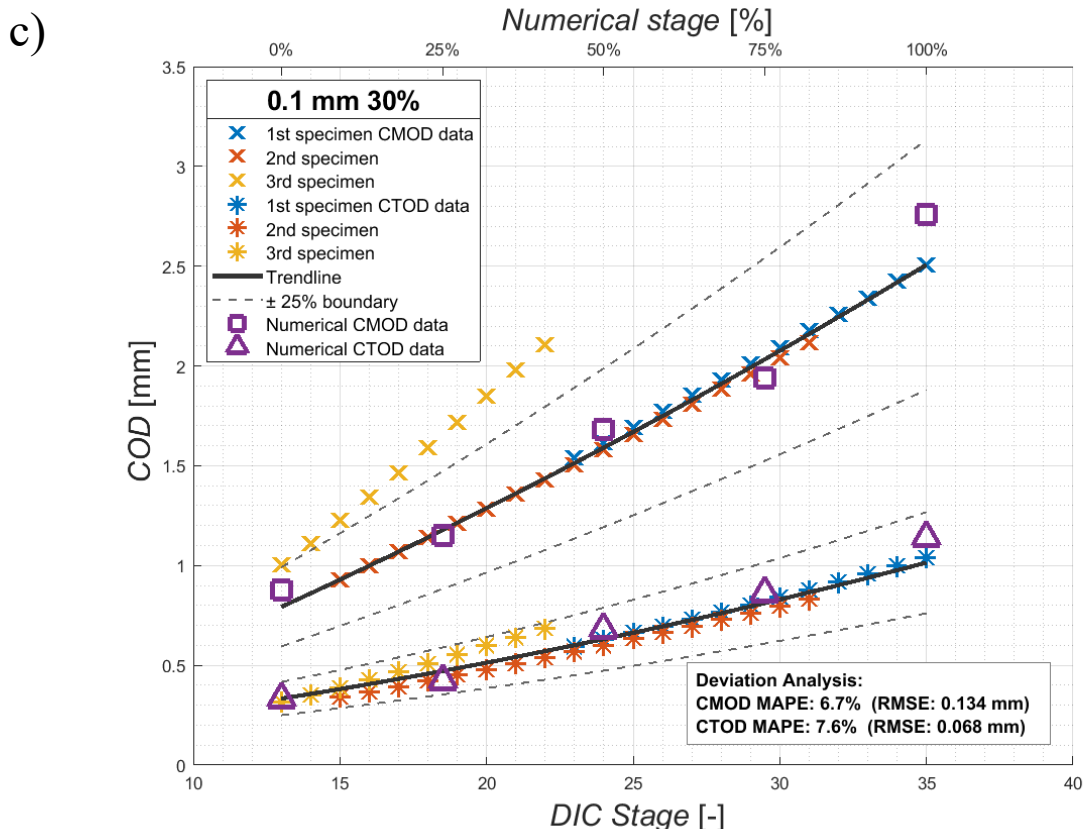
Pošto se kod metode sa više uzoraka priraštaj dužine prsline određuje na prelomnoj površini svakog uzorka pojedinačno, dok se kod metode sa jednim uzorkom određuje analitički, kod ove hibridne metode priraštaj dužine prsline se određuje na osnovu dobijenih vrednosti numeričke simulacije statičkog rasta prsline (slika 3.20), dok se njena verifikacija u odnosu na eksperimentalne rezultate vrši na osnovu vrednosti CTOD i CMOD (slika 4.21).

a)



b)

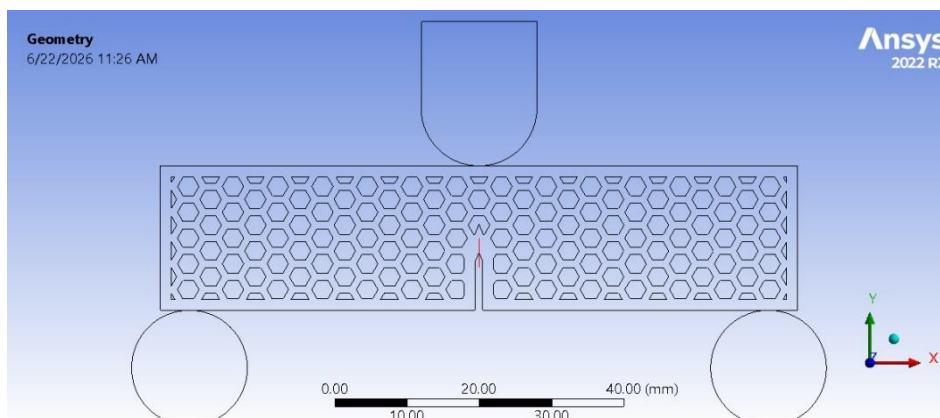




Slika 4.21 Verifikacija numeričke simulacije statičkog rasta prsline na modelima SENB epruvete za 0.1 mm visinu sloja: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

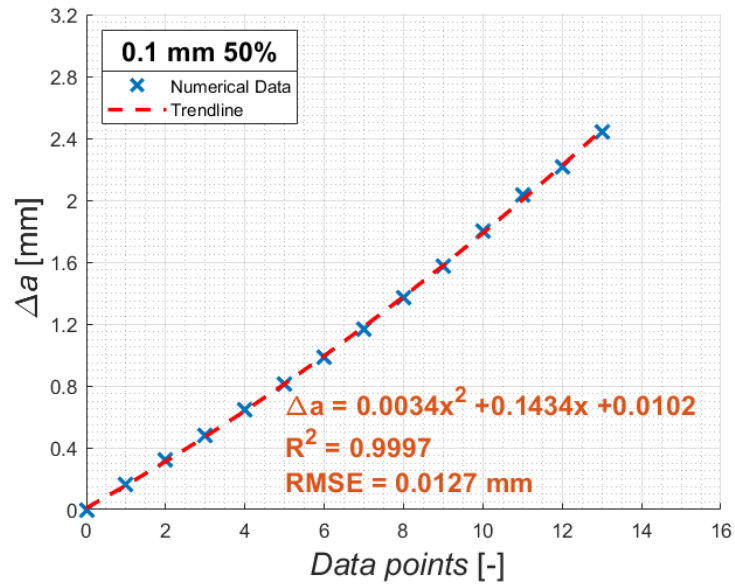
Naime, iz numeričkih simulacija su uzete vrednosti CMOD-a i CTOD-a pri 0%, 25%, 50%, 75% i 100% propagacije prsline i postavljene na gornju skalu dijagrama prikazanih na slici 4.21. Vrednost otvaranja prsline pri 0% rasta je uzeta neposredno pre trenutka početka stabilnog rasta prsline na numeričkim modelima. Svi eksperimentalni rezultati prikazani su uz numeričke vrednosti, uz odstupanje CMOD-a ne veće od 7%, odnosno CTOD-a ne veće od 9%. Numerički model je time verifikovan (sve vrednosti su u okviru dozvoljenih odstupanja od $\pm 25\%$), a veće odstupanje CTOD-a u odnosu na CMOD može se objasniti manjim vrednostima CTOD-a.

U numeričke modele inkorporirane su odgovarajuće unutrašnje strukture saća (slika 4.22). Za vrednosti priraštaja prsline dobijene iz numeričkih simulacija statičkog rasta prsline može se uspostaviti polinomska zavisnost između dobijenih tačaka, koja se dalje može koristiti za određivanje vrednosti priraštaja prsline u okviru ove hibridne metode. Dijagrami za visinu sloja od 0.1 mm i količine ispune od 50%, 40% i 30%, sa dobijenim polinomskim zavisnostima i njihovom tačnošću, prikazani su na slici 4.23.

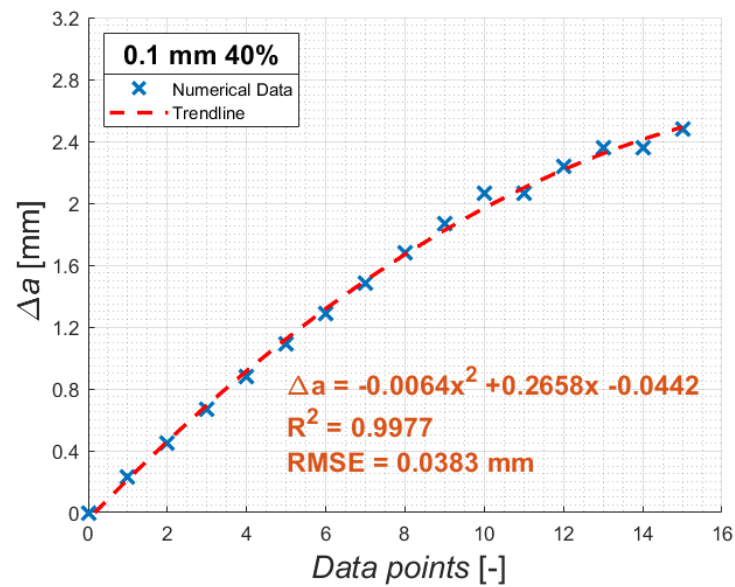


Slika 4.22 Prikaz unutrašnje strukture saća na numeričkom modelu SENB epruvete.

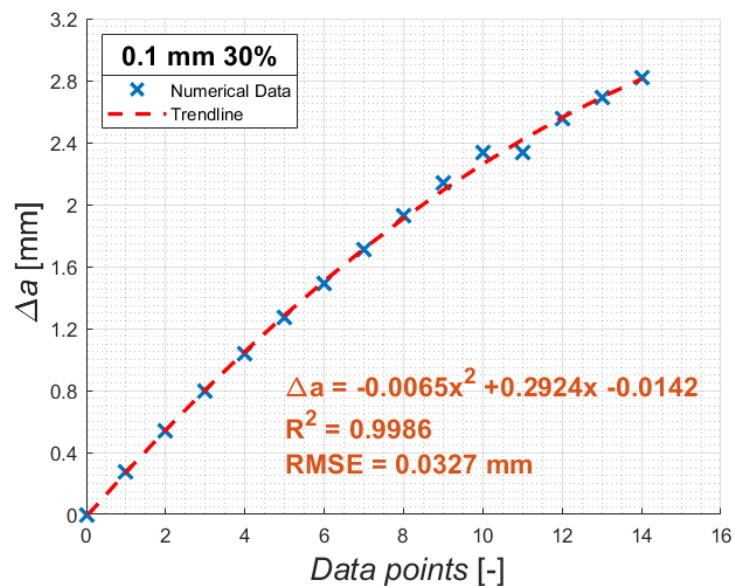
a)



b)



c)



Slika 4.23 Dijagrami priraštaja prsline u numeričkim simulacijama za 0.1 mm visinu sloja i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Radi jednostavnosti, numeričke simulacije su rađene isključivo za visinu sloja 0.1 mm, a dobijene polinomske zavisnosti su dalje korišćene i za ostale visine sloja.

Dalje, kod procene maksimalne vrednosti dužine prsline (a_{max}) treba imati u vidu da izmerene vrednosti na prelomnim površinama SENB epruveta obuhvataju i vrednosti dužine prsline nakon dostizanja maksimalne vrednosti sile, odnosno kada ona počinje da pada (slika 3.17). Kod metode sa više uzoraka bilo koja epruveta da je premašila vrednost maksimalne sile jednostavno se izuzima iz istraživanja. Iz deformacione teorije plastičnosti, na kojoj se bazira J integral, jasno proizilazi da pri rasterećenju J integral ne može više da opisuje stanje u okolini vrha prsline.

Na slici 3.17 plavom bojom je obeležena regija od interesa za računanje J integrala, a crvenom bojom deo podataka koji se ne koristi u analizi. Ideja hibridne metode je da se pristupi višestrukoj linearnoj regresiji, koja služi za potvrdu doprinosa pojedinačnih promenljivih. Regiju nakon dostizanja maksimalne sile opisuje potencijalna energija tog dela (U_{post}), odnosno površina ispod njenog dijagrama sila-pomeranje. Ako se formira precizan statistički model prema relaciji (2.63) i ustanovi doprinos te potencijalne energije ukupnoj dužini prsline (tabela 4.5), iz dobijene jednačine se taj deo može ukloniti, čime se dobija korigovana maksimalna dužina prsline (tabela 4.6).

Tabela 4.5 Statistički modeli višestruke linearne regresije za količine ispune od 30%, 40% i 50%.

Statistički model	Konstantan član	Maksimalna sila (P_{max})	Maksimalno pomeranje (d_{max})	Otvaranje vrha prsline (CTOD)	Pot.energija nakon P_{max} (U_{post})	Koeficijent determinacije (R^2)
50%	0.365	0.001	0.091	/	0.390	0.975
40%	0.477	0.001	/	0.030	0.305	0.915
30%	0.545	0.001	-0.012	/	0.366	0.939

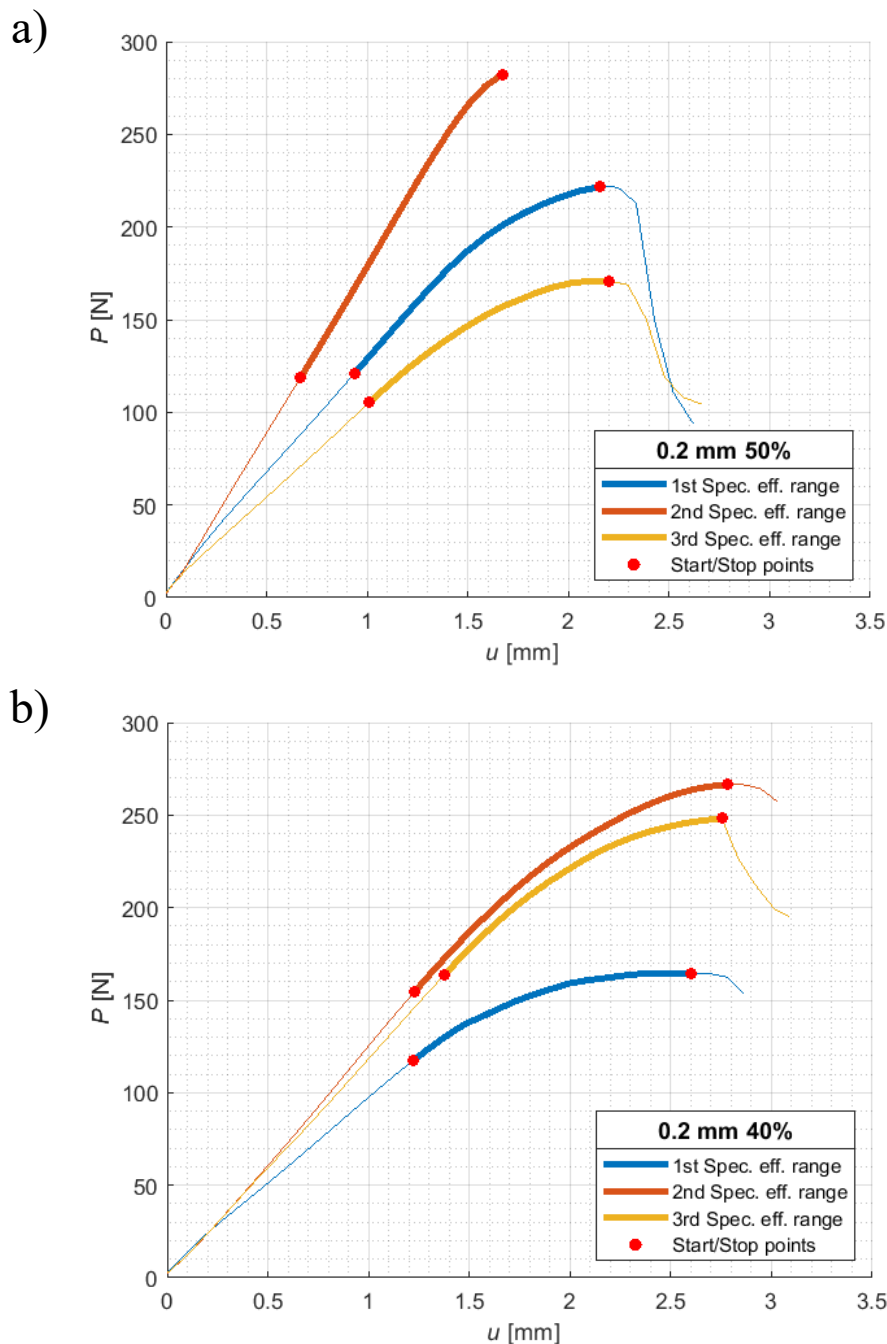
Tabela 4.6 Početne (a_{max}) i korigovane (a_{corr}) vrednosti maksimalne dužine prsline.

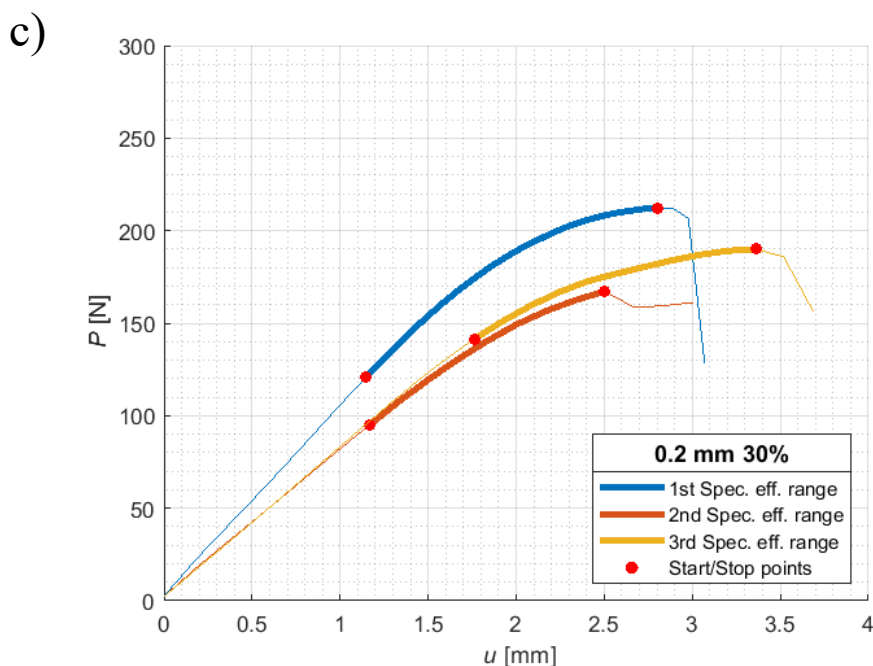
Parametar i broj	a_{max} [mm]	a_{corr} [mm]
0.1mm 50% 01	0.7930	0.7724
0.1mm 50% 02	0.6553	0.6413
0.1mm 50% 03	0.7858	0.7740
0.1mm 40% 01	0.7178	0.7084
0.1mm 40% 02	0.7223	0.7069
0.1mm 40% 03	0.6894	0.6722
0.1mm 30% 01	0.7805	0.7399
0.1mm 30% 02	0.7526	0.7318
0.1mm 30% 03	0.7450	0.7231
0.2mm 50% 01	0.8350	0.8035
0.2mm 50% 02	0.7735	0.7726
0.2mm 50% 03	0.8088	0.7804
0.2mm 40% 01	0.6973	0.6725
0.2mm 40% 02	0.7738	0.7550
0.2mm 40% 03	0.7584	0.7364
0.2mm 30% 01	0.7139	0.6972
0.2mm 30% 03	0.7333	0.7043
0.3mm 50% 01	0.8510	0.8180
0.3mm 50% 02	0.8739	0.8513
0.3mm 50% 03	0.8868	0.8277
0.3mm 40% 01	0.7569	0.7197
0.3mm 40% 02	0.7969	0.7700
0.3mm 40% 03	0.7628	0.7303
0.3mm 30% 01	0.6410	0.5933

Iz tabele 4.5 se vidi da sva tri formirana statistička modela (30%, 40% i 50%) daju preciznu predikciju ($R^2 > 0.9$) i da potencijalna energija regije nakon dostignute maksimalne sile doprinosi dužini prsline sa 0.305 – 0.390 mm po džulu [J] energije u toj regiji. Pored ove potencijalne energije, članovi formiranih jednačina su i maksimalna sila (P_{max}), maksimalno pomeranje (d_{max}) i otvaranje vrha prsline (CTOD). Na većini dijagrama sila-pomeranje u ovom istraživanju ova regija je znatno manja od glavnog dela krive, te je očekivano da su korekcije dužine prsline relativno male (tabela 4.6). U nastavku se više neće pominjati korigovana maksimalna dužina prsline, već će se ona smatrati stvarnom maksimalnom dužinom prsline ($a_{max} = a_{corr}$).

Takođe, radi jednostavnosti, u statističkim modelima je razmatrana samo visina sloja od 0.1 mm, a dobijene vrednosti su dalje korišćene i za ostale visine sloja.

Kao rezultat procene dužine prsline, od početka stabilnog rasta do dostizanja maksimalne sile, na slici 4.24 su podebljani i crvenim tačkama ograničeni delovi mehaničkih odziva SENB epruveta u kojima se odvija rast prsline od interesa (od početka stabilnog rasta do trenutka pre rasterećenja).





Slika 4.24 Dijagrami sila-pomeranje sa označenim delom odziva koji odgovara rastu prsline od interesa za SENB epruvete sa 0.2 mm visinom sloja i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količinom ispune.

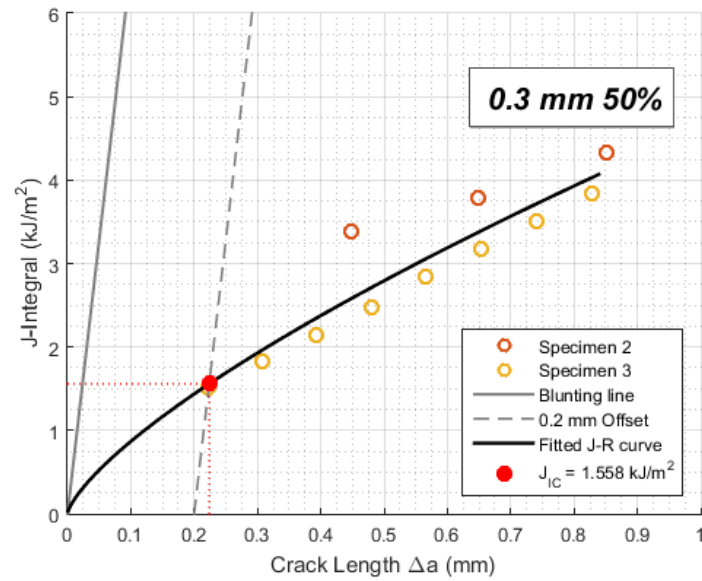
Vrednosti J integrala se najpre proračunavaju za slučaj bez rasta prsline (J_0) prema jednačini (2.31), a zatim se dobijene vrednosti priraštaja dužine prsline (Δa) koriste za proračun J integrala prema jednačini (2.33). Treba imati u vidu da se u obzir uzimaju samo vrednosti potencijalne energije povezane sa rastom prsline, te se energija indentacije mora proračunati (slika 3.21) i oduzeti od ukupne energije ispod krive sila-pomeranje (do P_{max}), prema jednačini (2.32).

Za tako dobijene parove vrednosti J integrala i priraštaja dužine prsline (Δa) konstruišu se J - R krive (slike 4.25 – 4.27), uzimajući u obzir i liniju zatupljenja prema jednačini (2.36). Naime, konstruisane su J - R krive za visinu sloja od 0.3 mm (slika 4.25), visinu sloja od 0.2 mm (slika 4.26) i za visinu sloja od 0.1 mm (slika 4.27), za grupe epruveta sa 50% (a), 40% (b) i 30% (c) količine ispune. Vrednosti konstanti C_1 i C_2 za konstrukciju navedenih J - R krivih, kao i vrednosti koeficijenta R^2 , J_{IC} i proračunatog K_{JIC} date su u tabeli 4.7.

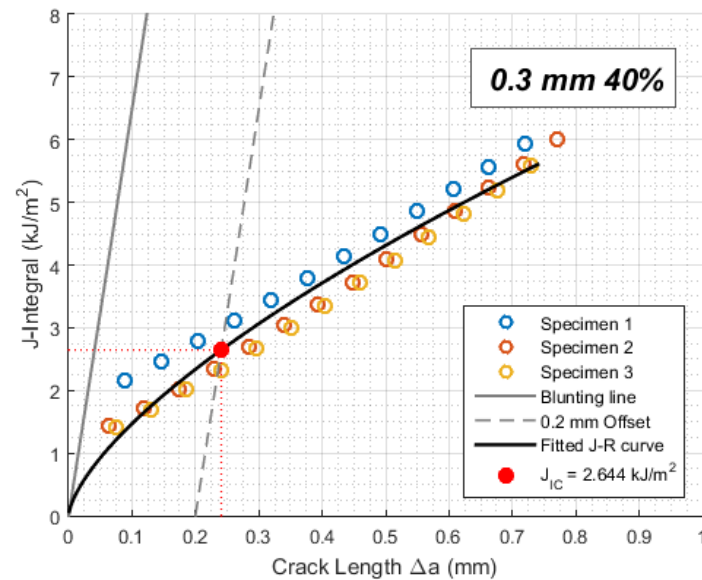
Tabela 4.7 Vrednosti C_1 i C_2 , R^2 , J_{IC} i proračunatog K_{JIC} za sve razmatrane J - R krive.

Parametar serije	C_1 [-]	C_2 [-]	R^2 [-]	J_{IC} [kJ·m ⁻²]	K_{JIC} [MPa√m]
0.3 mm 50%	4.621	0.726	0.859	1.558	1.932
0.3 mm 40%	6.856	0.669	0.949	2.644	2.449
0.3 mm 30%	6.724	0.797	0.975	2.130	2.118
0.2 mm 50%	5.847	0.858	0.947	1.618	2.107
0.2 mm 40%	7.591	0.705	0.803	2.787	2.690
0.2 mm 30%	7.568	0.884	0.736	2.101	2.251
0.1 mm 50%	4.656	0.958	0.999	1.067	1.716
0.1 mm 40%	6.371	0.701	0.977	2.294	2.448
0.1 mm 30%	6.481	0.734	0.869	2.242	2.332

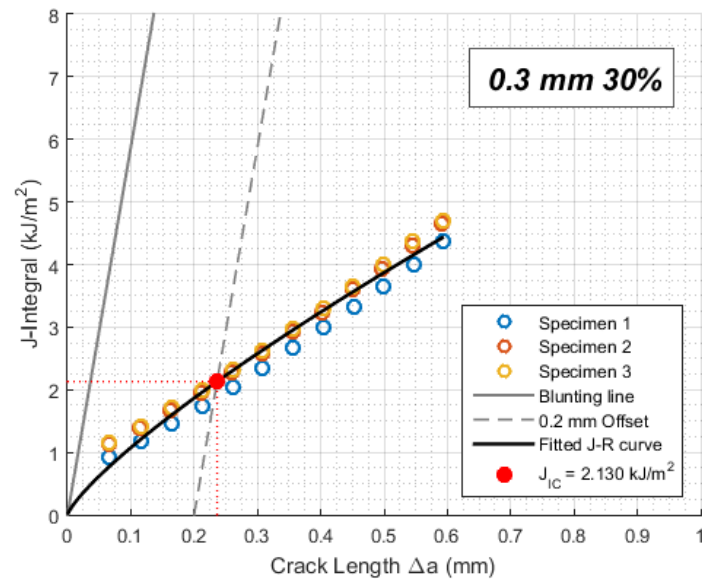
a)



b)

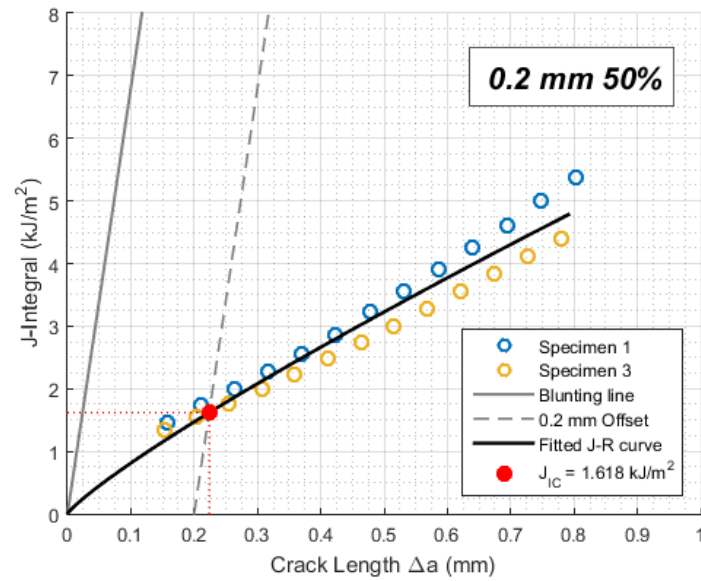


c)

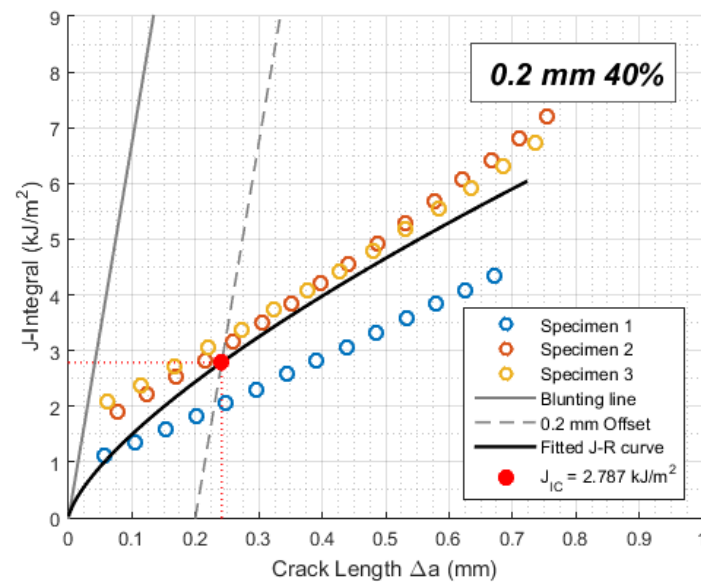


Slika 4.25 Dijagram J - R krivih sa vrednostima J_{IC} za visinu sloja od 0.3 mm i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

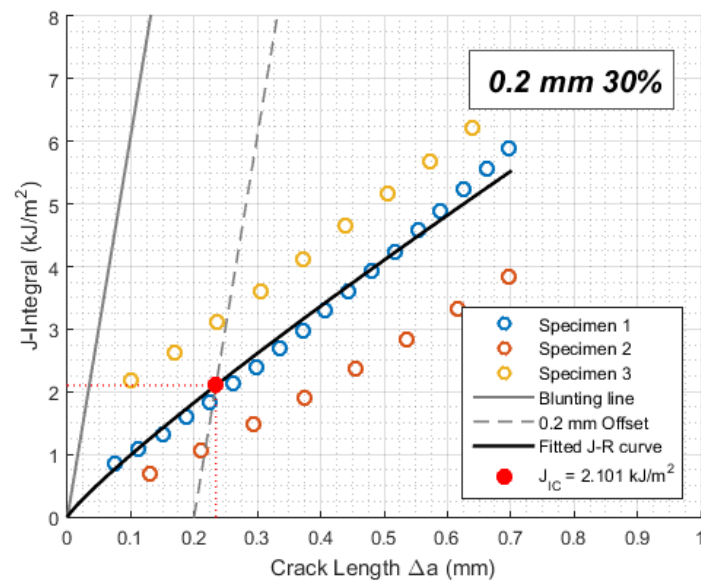
a)



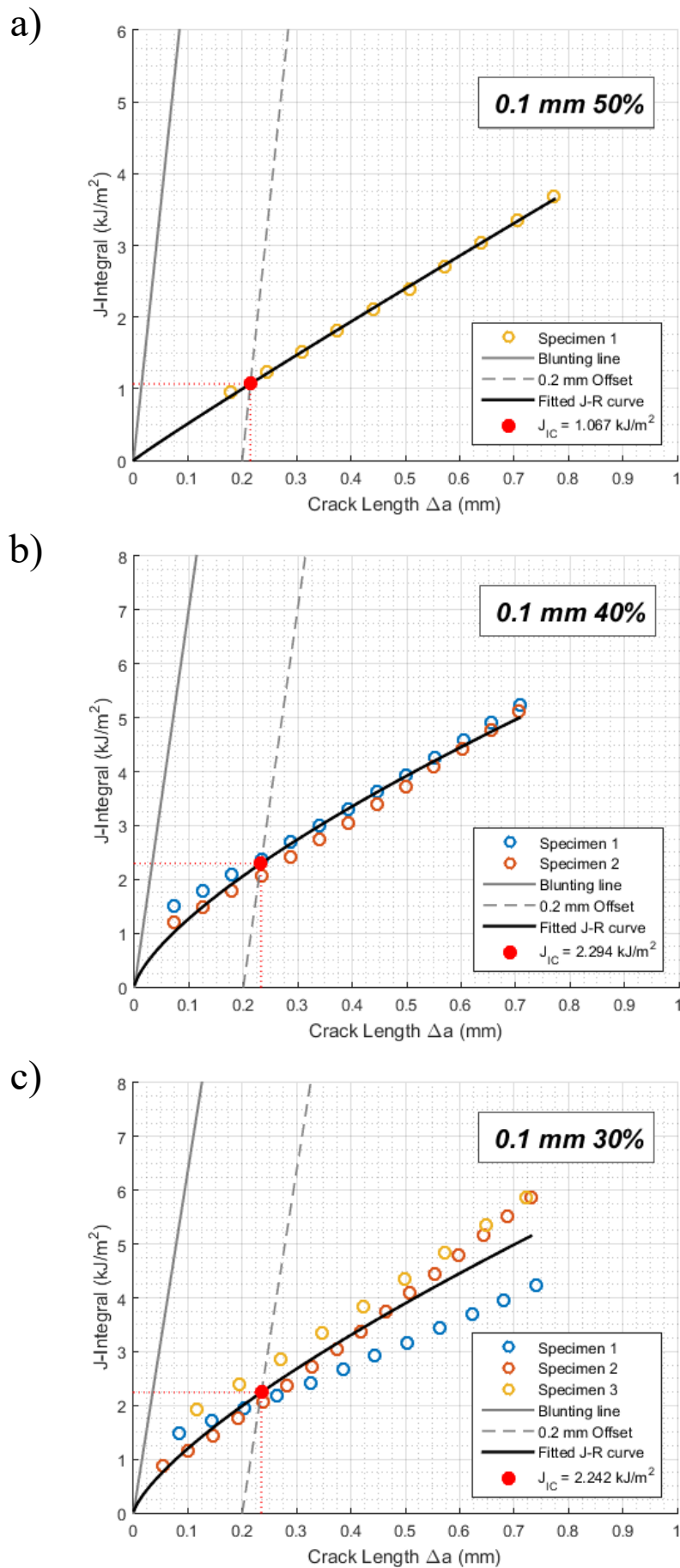
b)



c)



Slika 4.26 Dijagram J - R krivih sa vrednostima J_{IC} za visinu sloja od 0.2 mm i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.



Slika 4.27 Dijagram J - R krivih sa vrednostima J_{IC} za visinu sloja od 0.1 mm i: a) 50%; b) 40%; c) 30% količine ispune.

Iz tabele 4.7 i slika 4.25 – 4.27 vidi se da količina ispune od 40% daje najviše vrednosti J_{IC} za sve tri visine sloja u poređenju sa preostale dve količine ispune. Pored toga, vrednosti J_{IC} su više za količinu ispune od 30% nego za količinu ispune od 50%.

Prethodno je na slikama 4.13 i 4.14 naglašeno da pri manjim količinama ispune polimerni materijal trpi veće lokalne deformacije. Budući da je u ovom istraživanju takvo ponašanje uočeno za sve tri visine sloja, može se pretpostaviti da se pri količini ispune od 50% javlja prelaz iz kvazikrtog u elasto-plastično ponašanje (slika 4.12) [81], dok pri količini ispune od 40% materijal ispoljava izražene lokalne deformacije. Pri količini ispune od 30% već dolazi do degradacije mehaničkih osobina usled male količine materijala koja nosi opterećenje.

Verifikacija postignutih rezultata pokazana je u tabeli 4.8, preračunavanjem vrednosti J_{IC} u K_{JIC} prema jednačini (2.37) za količinu ispune od 50%, koja je pokazala polovičan učinak pri ispitivanju žilavosti loma prema LEML za sve tri visine sloja. Na taj način, dobijene vrednosti J_{IC} za epruvete koje nisu ispunile zahteve standarda ASTM D5045 [60] upoređene su sa vrednostima dobijenim za epruvete koje su te zahteve ispunile, a njihovo odstupanje izračunato je prema jednačini (4.1):

$$\text{Odstupanje}[\%] = \frac{K_{JIC} - K_{IC}}{K_{IC}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Tabela 4.8 Poređenje vrednosti K_{IC} i K_{JIC} i njihovih odstupanja za verifikaciju hibridne metode.

Visina sloja	K_{IC} [MPa√m]	K_{JIC} [MPa√m]	Odstupanje [%]
0.3 mm	1.798	1.932	7.453
0.2 mm	2.023	2.109	4.251
0.1 mm	1.473	1.716	16.497

Pošto su odstupanja manja od 20%, a u slučaju visine sloja od 0.3 mm i 0.2 mm manja od 8%, smatra se da je hibridna metoda predložena u ovom istraživanju za konstruisanje J - R krivih i određivanje vrednosti J_{IC} validirana. Time se stiče uslov za jednoznačno poređenje svih rezultata žilavosti loma, dobijenih prema LEML i EPML, za ispitane epruvete svih količina ispune i visine sloja (tabela 4.9). Od 100% do 60% količine ispune korišćeni su rezultati K_{IC} , odnosno rezultati K_{JIC} od 50% do 30% količine ispune. U tabeli 4.9 korišćene su usrednjene vrednosti K_{IC} prikazane na slici 4.12, dok su vrednosti K_{JIC} podebljane.

Tabela 4.9 Vrednosti žilavosti loma prema LEML i EPML za različite količine ispune i visine sloja.

K_{IC} / K_{JIC} [MPa√m]	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
0.3 mm	2.510	2.427	2.204	2.180	2.049	1.932	2.449	2.118
0.2 mm	2.284	2.468	2.188	1.810	2.036	2.107	2.690	2.251
0.1 mm	2.270	2.200	2.191	2.040	1.681	1.716	2.448	2.332

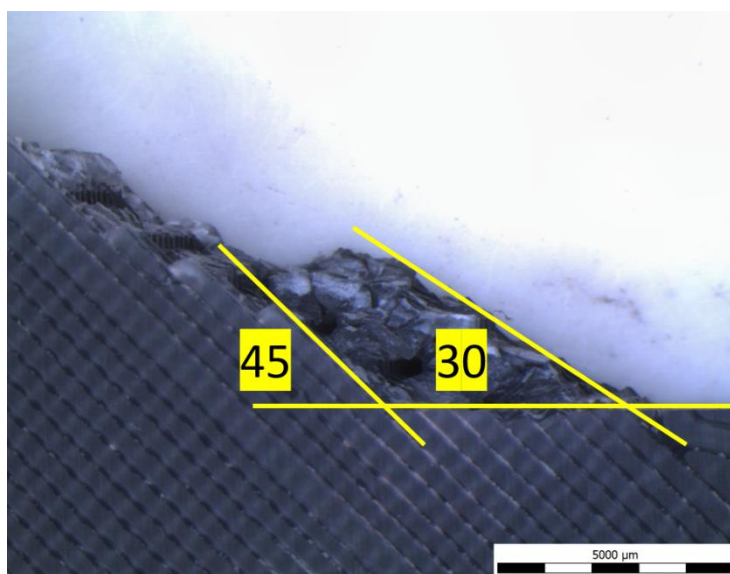
Analizom rezultata prikazanih u tabeli 4.9 jasno se uočava uticaj količine ispune na žilavost loma nezavisno od visine sloja. Pri količinama ispune od 100% do 60% materijal pokazuje pretežno krto ponašanje, čime su ispunjeni uslovi za primenu LEML. Pri ispuni od 50% dolazi do izraženijeg lokalnog tečenja materijala u okolini prsline, dok se pri 40% uočava povećanje elasto-plastične žilavosti loma, izražene preko J_{IC} , odnosno K_{JIC} . Ovo se može pripisati povoljnoj geometriji unutrašnje strukture saća, koja omogućava veću lokalnu deformaciju. Međutim, daljim smanjenjem količine materijala dolazi do smanjenja nosivosti, odnosno pada vrednosti žilavosti loma.

Epruvete sa 10% i 20% količine ispune su, kako je ranije naglašeno, izuzete iz istraživanja zbog nemogućnosti određivanja žilavosti loma prema LEML, odnosno procene dužine prsline prema EPML.

4.4. Rezultati ispitivanja zamornog rasta prsline PLA materijala

Ispitivanja zamornog rasta prsline sprovedena su na C(T) epruvetama od navedenog PLA materijala, za sve tri visine sloja i količinu ispune od 100%. Cilj ovog segmenta istraživanja je određivanje kinetike rasta prsline i dobijanje parametara otpornosti na rast zamorne prsline za svaku pojedinačnu visinu sloja. Kao i kod ispitivanja na zatezanje, korišćene su epruvete punog poprečnog preseka, kako bi se odredile karakteristike osnovnog materijala.

Za razliku od prethodnih ispitivanja, ovde visina sloja ne predstavlja samo parametar koji utiče na konačne rezultate, već direktno utiče i na validnost samog eksperimenta. Naime, kod epruveta sa najvećom visinom sloja (0.3 mm) došlo je do skretanja prsline iz primarne ravni i njenog daljeg rasta pod uglom definisanim rektilinearnom orijentacijom niti ($-45/45^\circ$, slika 3.2), dok je u unutrašnjosti epruvete prsline rasla pod uglom od 30° . Na slici 4.28 prikazan je izgled prelomne površine navedene epruvete posmatrane sa bočne strane, koja je snimana 2D DIC sistemom radi praćenja i merenja rasta prsline.



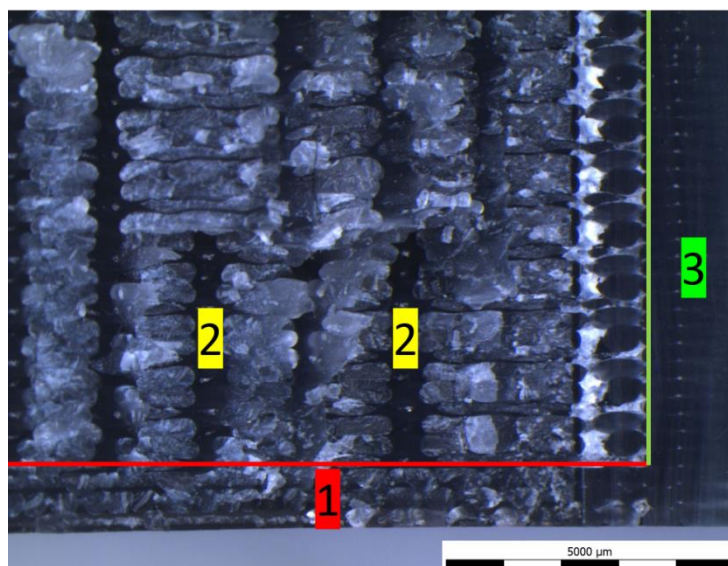
Slika 4.28 Prelomna površina C(T) epruvete sa 0.3 mm visinom sloja, pogled sa bočne strane [79].

Na prelomnoj površini C(T) epruvete mogu se izdvojiti tri karakteristične oblasti (slika 4.29):

- Oblast 1: spoljašnji (konturni) slojevi;
- Oblast 2: unutrašnja struktura saća;
- Oblast 3: glatka površina inicijalne prsline.

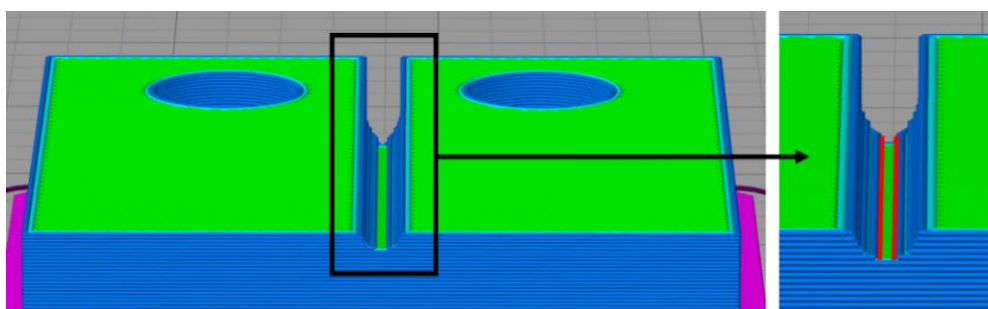
Spoljašnji slojevi predstavljaju gotovo neporoznu strukturu koja okružuje unutrašnju ispunu, a odlikuje ih kontinualno slaganje niti pod uglom $-45/45^\circ$. Na prelomnoj površini unutrašnje strukture saća uočavaju se šupljine koje se prostiru duž cele širine epruvete, a koje zapravo predstavljaju unutrašnjost pojedinačnih ćelija saća.

Kako kod C(T) epruveta sa visinom sloja od 0.3 mm dolazi do skretanja prsline iz primarne ravni, kao i do razlike u pravcu njenog prostiranja između slojeva, jasno je da je u ovom slučaju prisutno složeno naponsko stanje. Naime, pored dominantnog Moda I (otvaranje prsline) prisutan je i uticaj Moda II (uzdužno smicanje), što onemogućava interpretaciju rezultata primenom K_I . Standard ASTM E647-5 [172] propisuje dozvoljenu promenu pravca prostiranja prsline u odnosu na primarnu ravan od najviše 20° , čime je dokazano da je validnost ovog ispitivanja narušena [79].



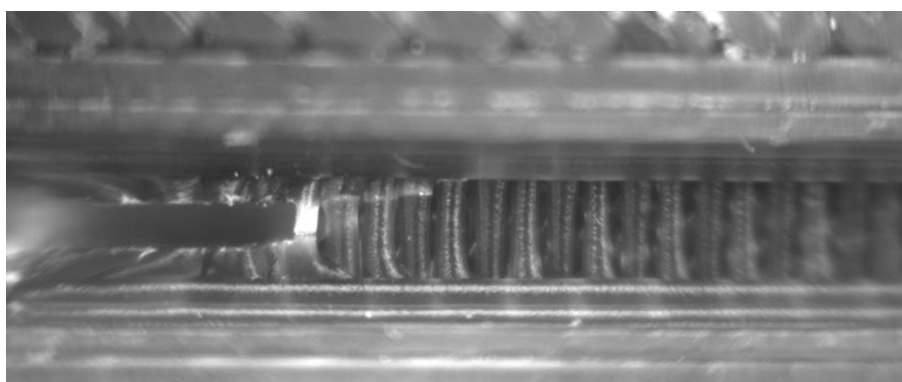
Slika 4.29 Karakteristične oblasti na prelomnoj površini C(T) epruvete [79].

Radi sprečavanja skretanja prsline i njenog zadržavanja u primarnoj ravni povećanjem naponskog ograničenja, na C(T) epruvetama visine sloja 0.3 mm primenjeni su bočni zarezi poluprečnika 1.5 mm, koji su aditivno proizvedeni u obliku latiničnog slova „U” (slika 3.25). Međutim, usled sukcesivnog slaganja slojeva, umesto glatkog profila zareza dolazi do pojave stepenastog efekta (*engl. stair-stepping effect*). Na slici 4.30 prikazan je model C(T) epruvete u softveru Simplify3D (Simplify3D, Sinsinati, SAD), gde je sa desne strane označena zona u kojoj 2D DIC sistem posmatra rast prsline (ograničena crvenim linijama).



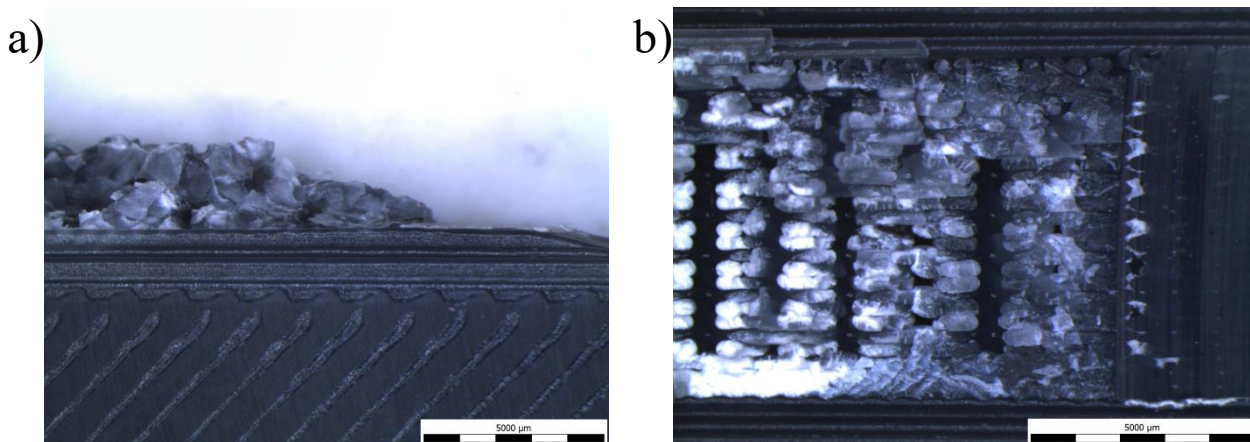
Slika 4.30 Softverski prikaz stepenastog efekta kod aditivno proizvedenih bočnih zareza sa označenom zonom za posmatranje rasta prsline [79].

Usled navedenog stepenastog efekta, ubrzo nakon početka rasta, prslina je nastavila da se kreće iza isturenih (gornjih) slojeva bočnog zareza. Pošto je njeno dalje napredovanje ostalo sakriveno od 2D DIC kamere, onemogućeno je optičko praćenje i beleženje dužine prsline (slika 4.31) [79].



Slika 4.31 Prikaz zaklonjenog rasta prsline u zoni bočnog zareza zabeležen 2D DIC sistemom [79].

Snimci optičke mikroskopije potvrđuju da je prslina nastavila da raste iza ivica bočnih zareza (slika 4.32a). Detaljnijim pregledom snimka uočava se da je putanja prsline tokom ispitivanja oscilovala između gornje i donje ivice zarez, na obe strane epruvete. Pored toga, na gornjem i donjem delu slike 4.32b se jasno vidi slojevita struktura profila zarez, koja je uzrokovala navedeno skretanje i optičko zaklanjanje vrha prsline.

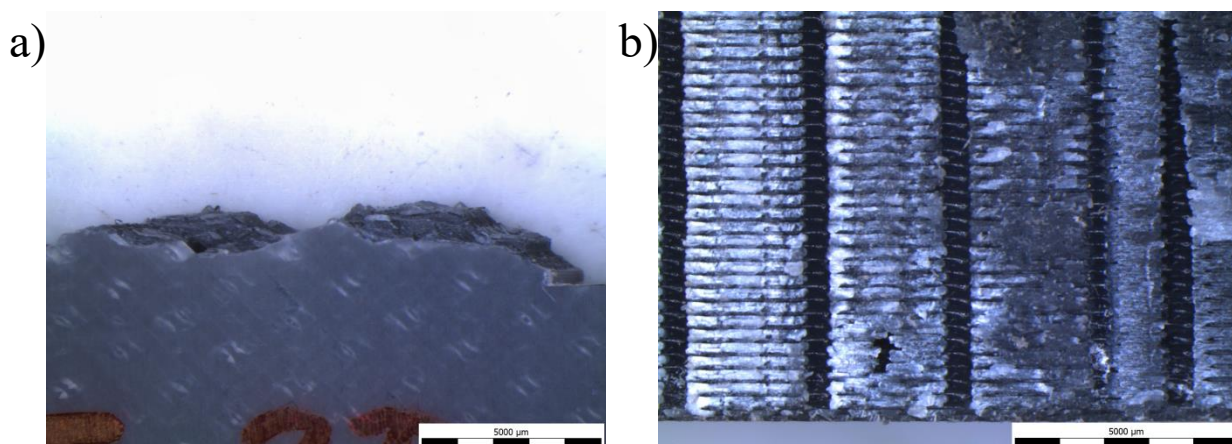


Slika 4.32 Prelomna površina C(T) epruvete sa visinom sloja od 0.3 mm i izrađenim bočnim zarezima: a) pogled sa bočne strane; b) pogled odozgo [79].

Za razliku od visine sloja od 0.3 mm, kod manje visine sloja (0.1 mm) prisutna je znatno kompaktnija struktura sa manjim dimenzijama unutrašnjih šupljina saća. Takođe, problemi skretanja prsline iz primarne ravni, koji su zabeleženi kod visine sloja od 0.3 mm, ovde nisu bili prisutni, pa samim tim nije bilo ni potrebe za primenom bočnih zarez. Na slici 4.33a prikazana je prelomna površina C(T) epruvete sa bočne strane, gde se jasno uočava da je prslina rasla u primarnoj ravni, bez značajnijih odstupanja.

Na slici 4.33b prikazan je izgled prelomne površine odozgo, na kojoj se uočava jasan kontrast između tamnije i svetlije oblasti. Tamnija zona, kako je objašnjeno u [85], odgovara stabilnom rastu zamorne prsline, dok svetlija zona predstavlja oblast statičkog loma, odnosno dostizanja K_{IC} , koja za visinu sloja od 0.1 mm i količinu ispune od 100% iznosi $2.27 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (tabela 4.9) [79].

Kao vizuelni dodatak, makroskopski prikaz navedenih epruveta nakon ispitivanja zamornog rasta prsline dat je na slici 4.34.



Slika 4.33 Prelomna površina C(T) epruvete sa visinom sloja od 0.1 mm: a) pogled sa bočne strane; b) pogled odozgo [79].



Slika 4.34 Makroskopski izgled C(T) epruveta nakon završenog ispitivanja zamornog rasta prsline za: a) 0.3 mm (glatka epruveta); b) 0.3 mm sa bočnim zarezima; c) 0.1 mm visine sloja [79].

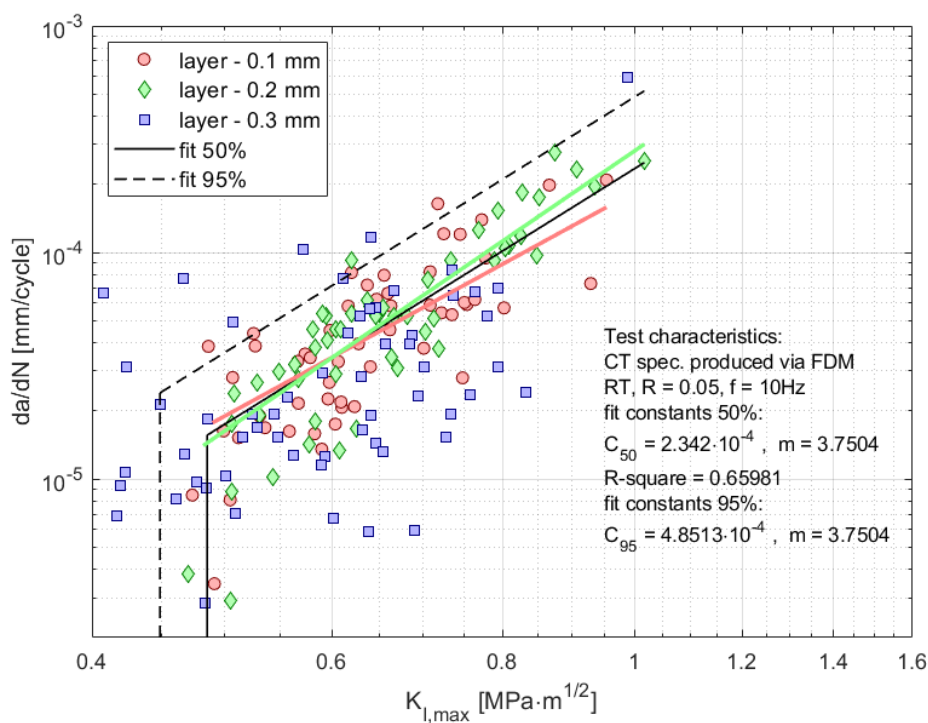
Dobijeni rezultati kinetike rasta zamorne prsline za C(T) epruvete interpretirani su pomoću Parisove jednačine (2.41), koja se pokazala pogodnom za polimere u radovima [85,103,173,174]. U ovom istraživanju umesto ΔK u jednačini (2.41) korišćena je maksimalna vrednost faktora intenziteta napona u ciklusu ($K_{I,max}$) izražena u $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Brzine rasta prsline ispod 10^{-6} mm/ciklusu nisu uzimane u razmatranje, s obzirom na to da se nalaze ispod praga rasta prsline (K_{th}).

Iako nisu uključeni u dalju analizu, rezultati dobijeni za epruvete sa visinom sloja od 0.3 mm nezavisno su obrađeni. Pored poteškoća u verifikaciji rezultata, ove epruvete karakteriše i izraženo rasipanje eksperimentalnih podataka, što se ogleda u niskoj vrednosti koeficijenta determinacije ($R^2 = 0.3276$). Iz navedenih razloga, uzimaju se u razmatranje isključivo 0.1 mm i 0.2 mm visine sloja, kao i njihova kombinacija (tabela 4.10). Koeficijenti C_{50} i C_{95} predstavljaju vrednosti Parisovog koeficijenta C izračunate metodom najmanjih kvadrata za srednju vrednost, odnosno kao konzervativna procena koja obuhvata 95% eksperimentalnih podataka.

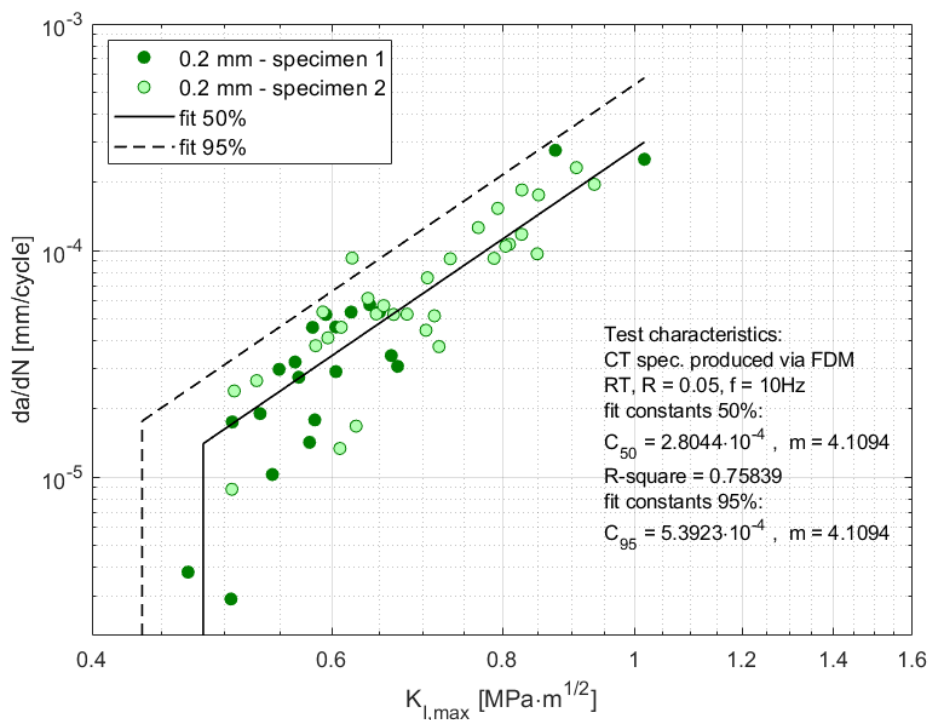
Tabela 4.10 Koeficijenti Parisove jednačine za razmatrane visine sloja i njihovu kombinaciju.

Parisovi koeficijenti i R^2	Visina sloja [mm]		
	0.1	0.2	kombinovano (0.1 + 0.2)
C_{50} [mm·ciklus ⁻¹ ·(MPa√m) ^{-m}]	$1.8498 \cdot 10^{-4}$	$2.8044 \cdot 10^{-4}$	$2.3420 \cdot 10^{-4}$
C_{95} [mm·ciklus ⁻¹ ·(MPa√m) ^{-m}]	$4.0376 \cdot 10^{-4}$	$5.3923 \cdot 10^{-4}$	$4.8513 \cdot 10^{-4}$
m [-]	3.2904	4.1094	3.7504
R^2 [-]	0.5428	0.7584	0.6598

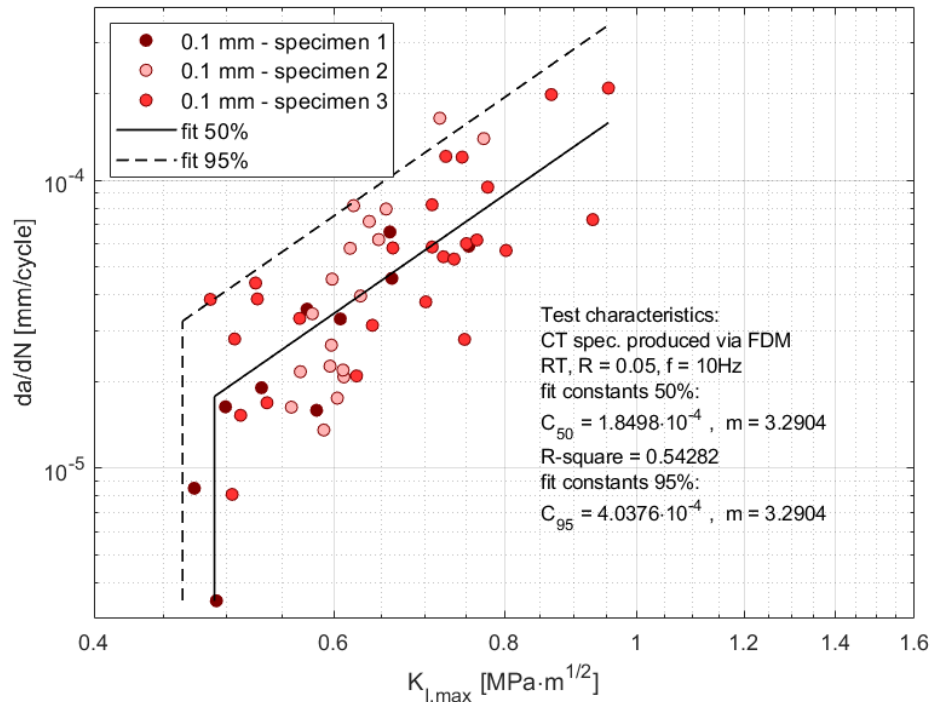
Sve eksperimentalne vrednosti brzine rasta zamorne prsline PLA materijala, uključujući i podatke isključene iz dalje analize, prikazane su na slici 4.35. Sa dijagrama je jasno uočljivo izraženo rasipanje podataka za visinu sloja od 0.3 mm. Vrednosti praga rasta prsline (K_{th}) iznose oko $0.45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ za 0.2 mm i 0.1 mm, dok za visinu sloja od 0.3 mm ova vrednost iznosi oko $0.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Kraj stabilnog rasta i prelazak u oblast nestabilnog (ubrzanog) rasta prsline uočava se pri oko $1.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ za ukupan skup podataka, odnosno pri oko $0.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ za visinu sloja od 0.1 mm. Dijagrami brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za pojedinačne visine sloja od 0.2 mm i 0.1 mm dati su na slikama 4.36 i 4.37, respektivno.



Slika 4.35 Dijagram brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za sve ispitane visine sloja.

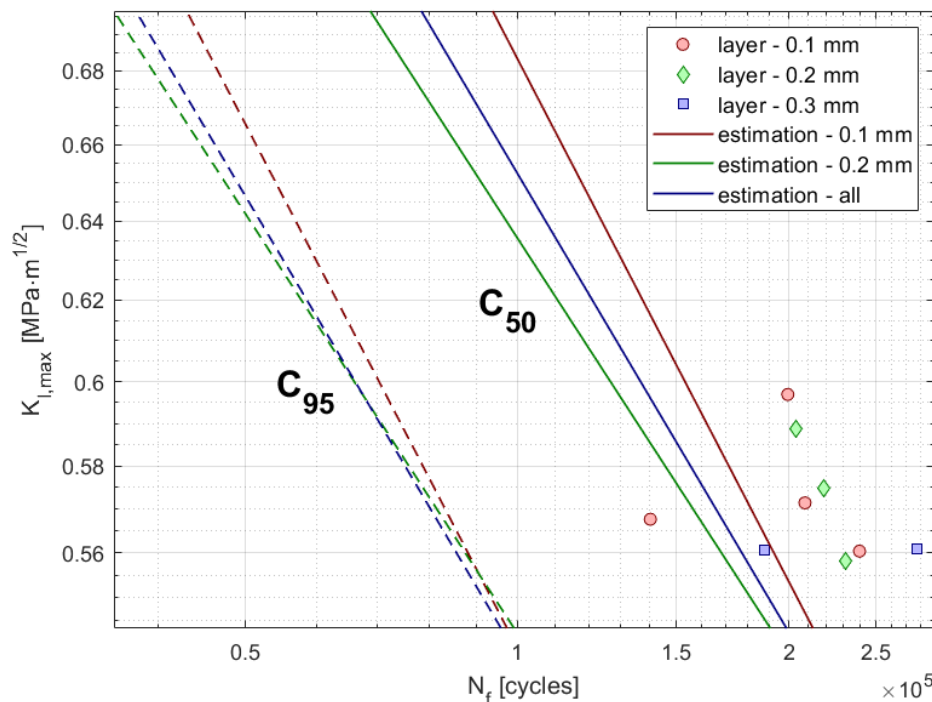


Slika 4.36 Dijagram brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za 0.2 mm visinu sloja.



Slika 4.37 Dijagram brzine rasta zamorne prsline u zavisnosti od $K_{I,max}$ za 0.1 mm visinu sloja.

Na slici 4.36 uočava se da su za visinu sloja od 0.2 mm u analizu uključene svega dve epruvete. Razlog za smanjen broj usvojenih epruveta je isti kao i kod visine sloja od 0.3 mm – neispunjavanje zahteva standarda ASTM E647-5 [172] usled skretanja pravca prostiranja prsline za više od 20° u odnosu na primarnu ravan. Sledeći korak obuhvata ispitivanje C(T) epruveta bez beleženja rasta prsline, pri čemu je praćen isključivo ukupan broj ciklusa prema jednačini (2.44). Cilj ovog postupka je verifikacija tačnosti Parisovih koeficijenata prikazanih u tabeli 4.10 analizom dobijenih rezultata na dijagramu zamornog veka zavisnosti $K_{I,max}$ od broja ciklusa do loma N_f (slika 4.38).



Slika 4.38 Dijagram zamornog veka ispitanih C(T) epruveta ($N_f - K_{I,max}$).

Dijagram zamornog veka ispitanih C(T) epruveta pokazuje da koeficijent C_{50} daje značajno bolju predikciju zamornog veka ispitanog PLA materijala u odnosu na C_{95} , te će se on primarno razmatrati u daljem istraživanju.

Pored toga, dobijeni koeficijent C_{50} primetno bolje opisuje rezultate za visinu sloja od 0.1 mm, što je jasno uočljivo na slici 4.38. Vredi napomenuti da se rast prsline u ovom istraživanju odvijao od inicijalnih 17 mm do konačnih 40 mm, dok je maksimalna sila (P_{max}) varirala u opsegu od 195 N do 250 N. Takođe, primećeno je da je prslina inicijalno porasla za 0.5 mm nakon 30000 ciklusa kod visine sloja od 0.1 mm. Dakle, rezultati ovog segmenta istraživanja poslužili su za definisanje odgovarajućih Parisovih koeficijenata (C i m) namenjenih numeričkim simulacijama modela ortopedskih pločica sa različitim količinama ispune (slika 3.33).

U nastavku istraživanja razmatraju se isključivo numerički modeli ortopedskih pločica količine ispune od 10% do 100%, sa inkrementom 10% (ukupno 10 modela). Za proračun su usvojeni Parisovi koeficijenti za visinu sloja od 0.1 mm (C_{50} i m), usled najpovoljnije procene brzine rasta zamorne prsline, odnosno činjenice da su sve ispitane C(T) epruvete za ovu visinu sloja zadovoljile zahteve standarda ASTM E647-5 [172], kao i najuspešnije verifikacije koeficijenta C_{50} na dijagramu zamornog veka, prikazanog na slici 4.38.

4.5. Rezultati numeričkih simulacija i statističke obrade podataka modela ortopedskih pločica

Numeričke simulacije zamornog rasta prsline sprovedene su na deset modela ortopedskih pločica sa količinama ispune od 10% do 100%, sa inkrementom 10% (slika 3.33). Korišćeni su granični uslovi kao u [36-40], odnosno simulirani su uslovi eksperimentalnog ispitivanja propisani standardom ASTM F382 [122], sa dva jednaka, simetrično postavljena opterećenja i oslonca (slika 3.30). Kao rezultati numeričkih simulacija razmatrane su vrednosti faktora intenziteta napona, koji se u analizi rezultata dobijenih iz softverskog paketa Ansys Mechanical (Ansys, Kenonsburg, SAD) najčešće označavaju kao *SIF* (engl. *Stress Intensity Factor*), zatim maksimalna dužina prsline (a_{max}) i ukupan broj ostvarenih ciklusa zamornog rasta prsline do loma (N_f), prikazani u tabeli 4.11. Poseban fokus je stavljen na utvrđivanje razlika u mehaničkom ponašanju između analiziranih numeričkih modela. Stoga, kako je naglašeno u prethodnom poglavlju, amplituda opterećenja je desetostruko smanjena u odnosu na vrednosti predviđene standardom ASTM F382 [122] (sa 3.9 kN na 390 N), radi pouzdanije komparacije numeričkih modela.

Tabela 4.11 Rezultati numeričkih simulacija zamornog rasta prsline za sve razmatrane modele [30].

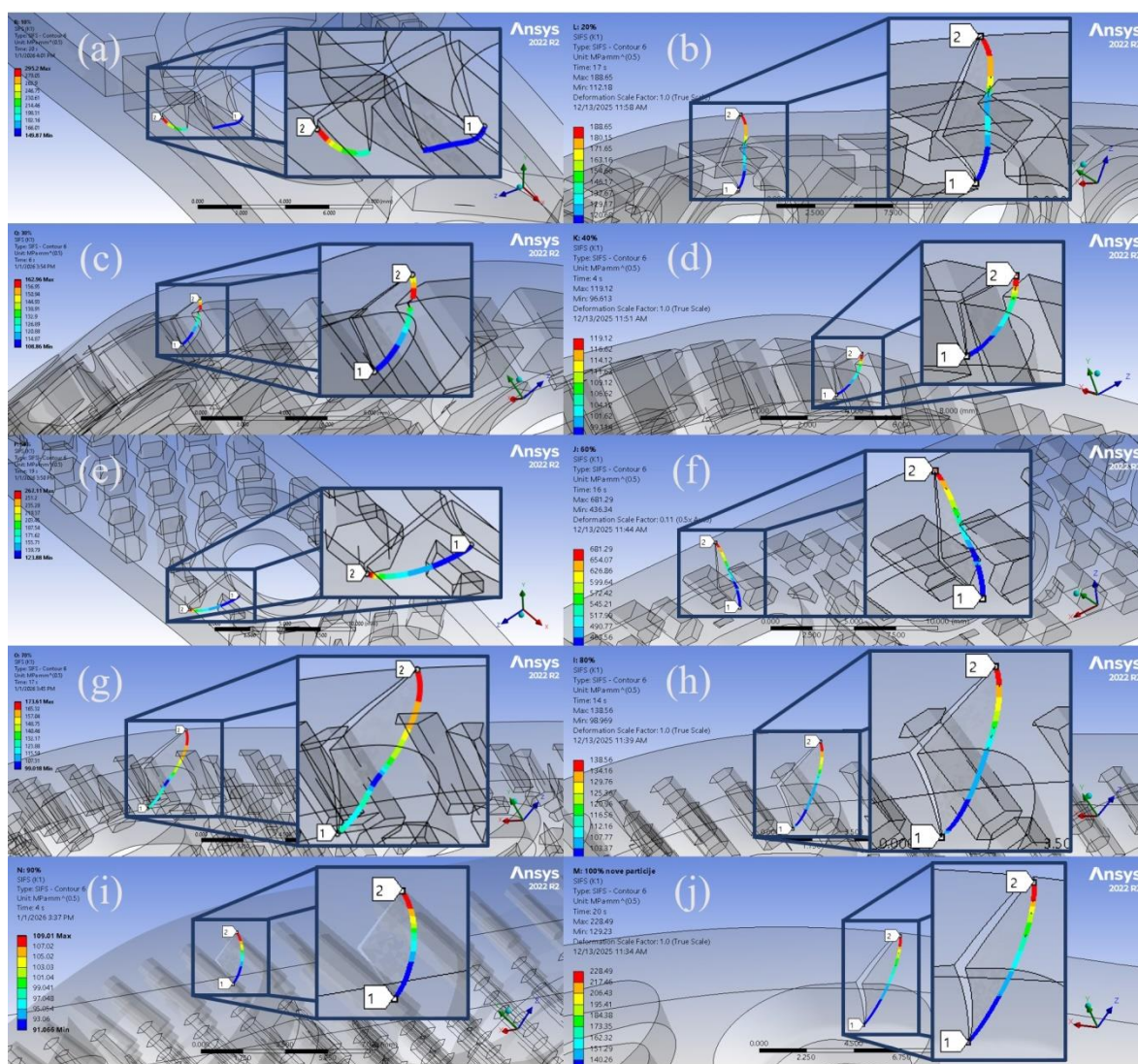
Numerički model količine ispune [%]	<i>SIF</i> [MPa√mm]	a_{max} [mm]	N_f [-]
10	295.2	2.23	12513
20	188.65	2.39	23789
30	162.96	0.92	12970
40	119.12	0.83	14293
50	267.11	2.07	26950
60	681.29	1.72	486
70	173.61	2.11	24244
80	138.56	1.71	24596
90	109.01	0.93	15567
100	228.49	2.26	23966

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 4.11 jasno se vidi da količina ispune, pri načinu na koji bi ortopedske pločice bile aditivno proizvedene, nema presudan uticaj na mehaničko ponašanje usled zamornog rasta prsline. Iako u tabelama 4.1, 4.2 i 4.9 količina ispune ima dokazano presudan značaj, treba imati u vidu da su kod ispitivanja na zatezanje (tabele 4.1 i 4.2) i ispitivanja žilavosti loma (slika 4.12 i tabela 4.9) analizirani centralni delovi epruveta. Za razliku od toga, kod ortopedskih pločica inicijalna prslina nalazi se na jednom od otvora, u čijem se neposrednom okruženju nalazi izraženo nasumičan raspored aditivno proizvedenih niti koje formiraju okolnu unutrašnju strukturu saća.

Kod numeričkih modela sa količinom ispune od 20%, 50%, 70%, 80% i 100% ukupan ostvareni broj ciklusa zamornog rasta prsline do loma premašuje 20000, a izuzev modela sa 80% ispune, svi navedeni modeli ostvarili su maksimalnu dužinu prsline (a_{max}) veću od 2 mm. U prilog navedenoj tvrdnji da količina ispune nema presudan značaj u ovom slučaju ide i podatak da su numerički modeli sa količinom ispune od 20% i 100% ostvarili uporediv preostali radni vek i maksimalnu dužinu prsline.

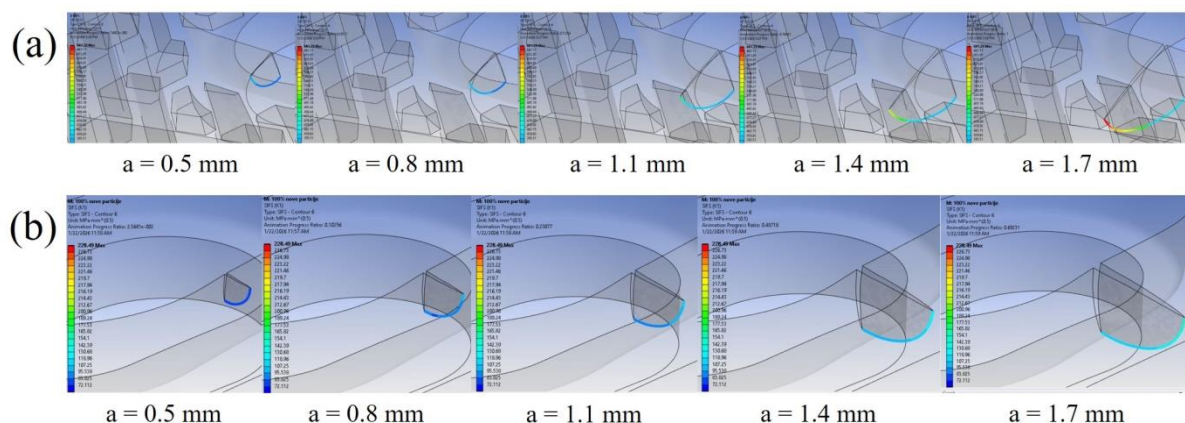
Kod prethodno navedenih modela rast zamorne prsline nije bio ometan nailaskom na okolnu unutrašnju strukturu saća, te se rast prsline odvijao nesmetano. Nasuprot tome, najizraženije odstupanje uočeno je kod modela sa 60% ispune, kod kojeg je ostvaren svega 486 ciklusa, uz vrednost SIF -a od $681.29 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Iako u ovom slučaju prsline nije bila opstruirana nailaskom na unutrašnju šupljinu pojedinačnog saća, njena početna pozicija nalazila se u neposrednoj blizini jedne od šupljina, što je dovelo do izraženih koncentracija napona u području oko vrha prsline. Ovaj slučaj pokazuje da položaj unutrašnje strukture saća, odnosno šupljina unutar nje, u odnosu na položaj inicijalne prsline može imati značajniji uticaj na preostali zamorni vek nego njen položaj u odnosu na putanju rasta prsline.

Kod modela sa 30%, 40% i 90% količine ispune rast prsline je bio prekinut nailaskom na unutrašnju šupljinu saća, zbog čega su ostvarene manje maksimalne dužine prsline (a_{max}) i kraći preostali zamorni vek. Mogućnost poboljšanja preostalog zamornog veka optimizacijom unutrašnje strukture potvrđuje model sa 50% količinom ispune, kod kojeg je ostvaren najveći broj ciklusa od svih analiziranih modela (26950, tabela 4.11). Model sa 10% količine ispune ostvario je sličnu maksimalnu dužinu prsline kao model sa 20% ispune, kod kojeg je zabeležena najveća dužina prsline od 2.39 mm (tabela 4.11). Sve navedeno potvrđuje da se otpornost na zamorni rast prsline ne može neposredno povezati samo sa količinom ispune. Izgled rasta zamorne prsline u svim modelima i vrednosti SIF -a duž fronta prostiranja, prikazane bojama, dati su na slici 4.39 [30].

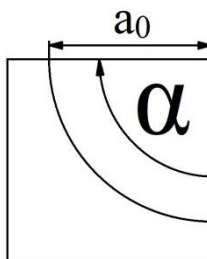


Slika 4.39 Vrednosti SIF -a duž fronta rasta prsline za numeričke modele ortopedskih pločica sa: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100% ispune.

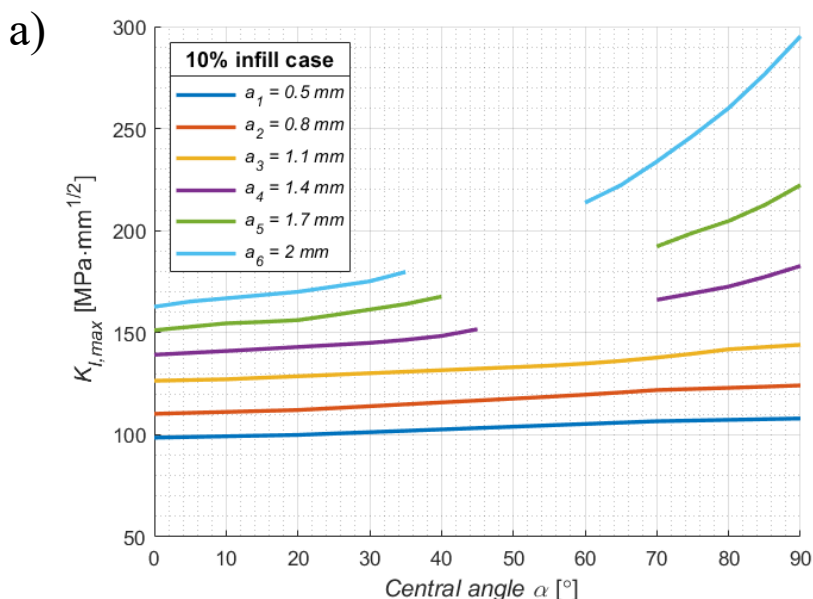
Kod većine numeričkih modela tokom simulacija uočena je promena oblika fronta prsline od početnog kružnog oblika inicijalne prsline ka izraženo eliptičnom obliku, što je povezano sa prelaskom u nestabilni rast zamorne prsline. Ova promena je naročito izražena kod numeričkih modela u kojima je horizontalno prostiranje prsline dostizalo kraj ortopedske pločice, pri čemu je došlo i do porasta vrednosti SIF -a. U daljoj analizi razmatrane su vrednosti SIF -a duž fronta prsline pri priraštajima dužine prsline od 0.5 mm, 0.8 mm, 1.1 mm, 1.4 mm, 1.7 mm (slika 4.40), a kod modela kod kojih je prslina dalje napredovala i pri priraštajima od 2.0 mm i 2.3 mm. Radi dalje analize uveden je centralni ugao α , koji definiše položaj tačke duž fronta prsline [124]. Prikaz ugla α u početnom trenutku kada je prslina kružnog oblika, dat je na slici 4.41. Cilj je konstruisati dijagrame zavisnosti vrednosti SIF -a, odnosno $K_{I,max}$ od centralnog ugla α , kako bi se detaljnije procenilo stanje fronta prsline tokom numeričkih simulacija za sve modele (slika 4.42) [30].

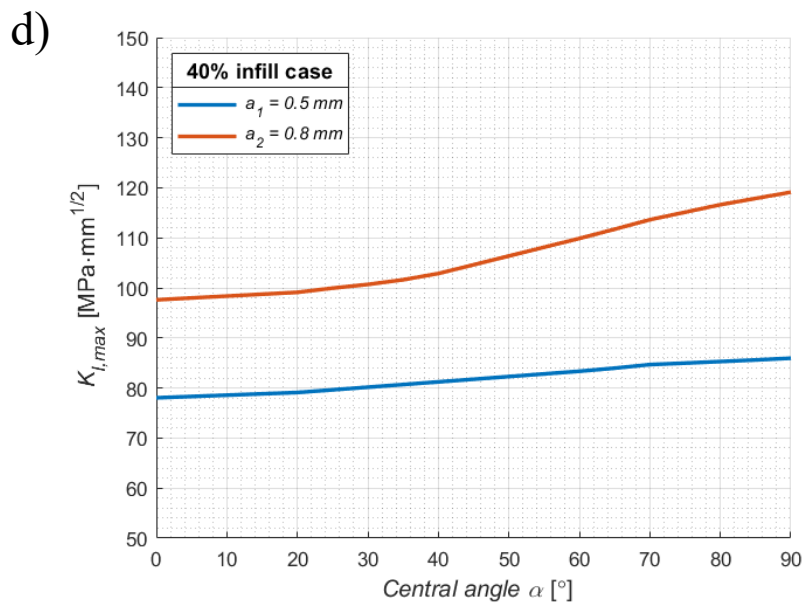
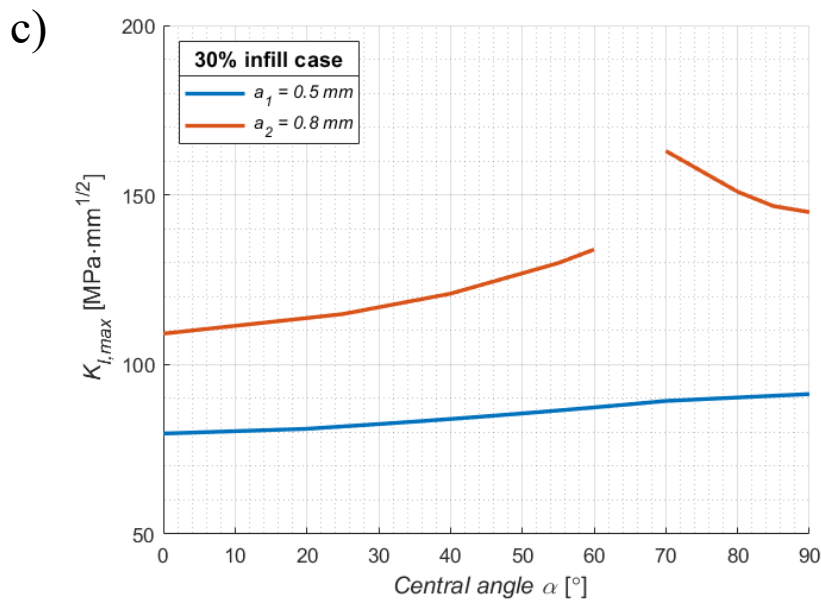
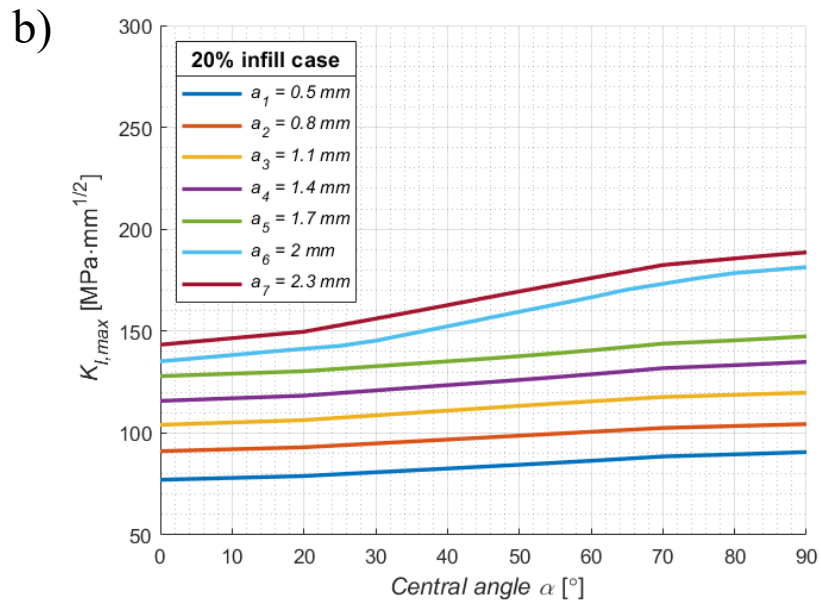


Slika 4.40 Evolucija oblika fronta prsline od kružnog ka eliptičnom za modele sa: a) 60%; b) 100% količinom ispune [30].

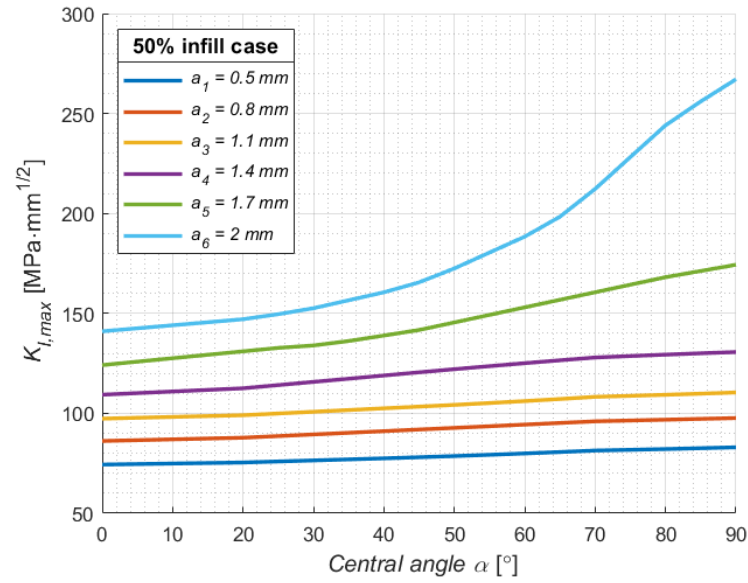


Slika 4.41 Prikaz centralnog ugla α u početnom trenutku prsline [30].

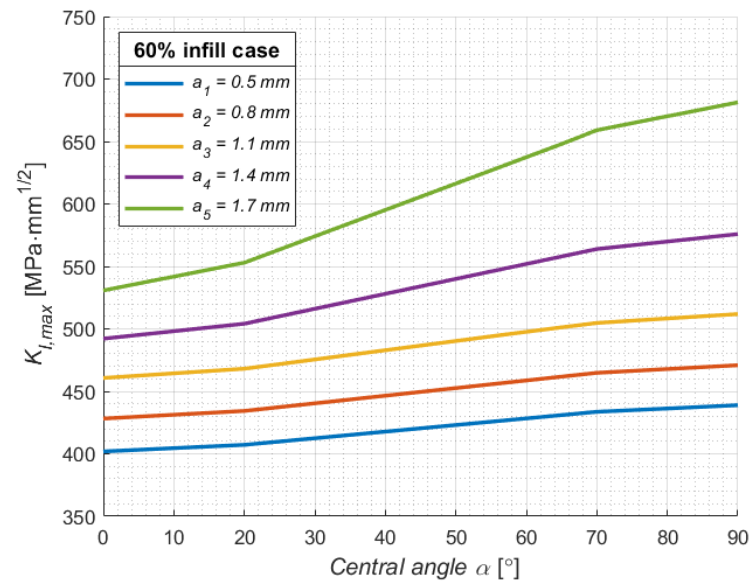




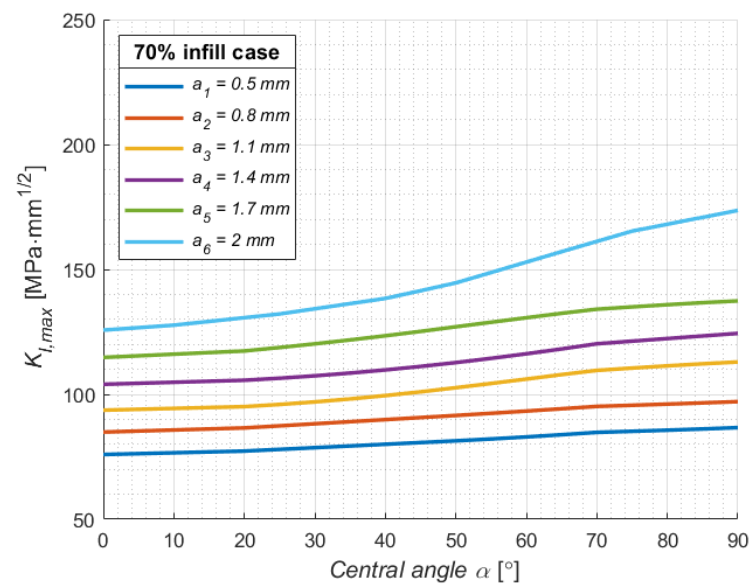
e)

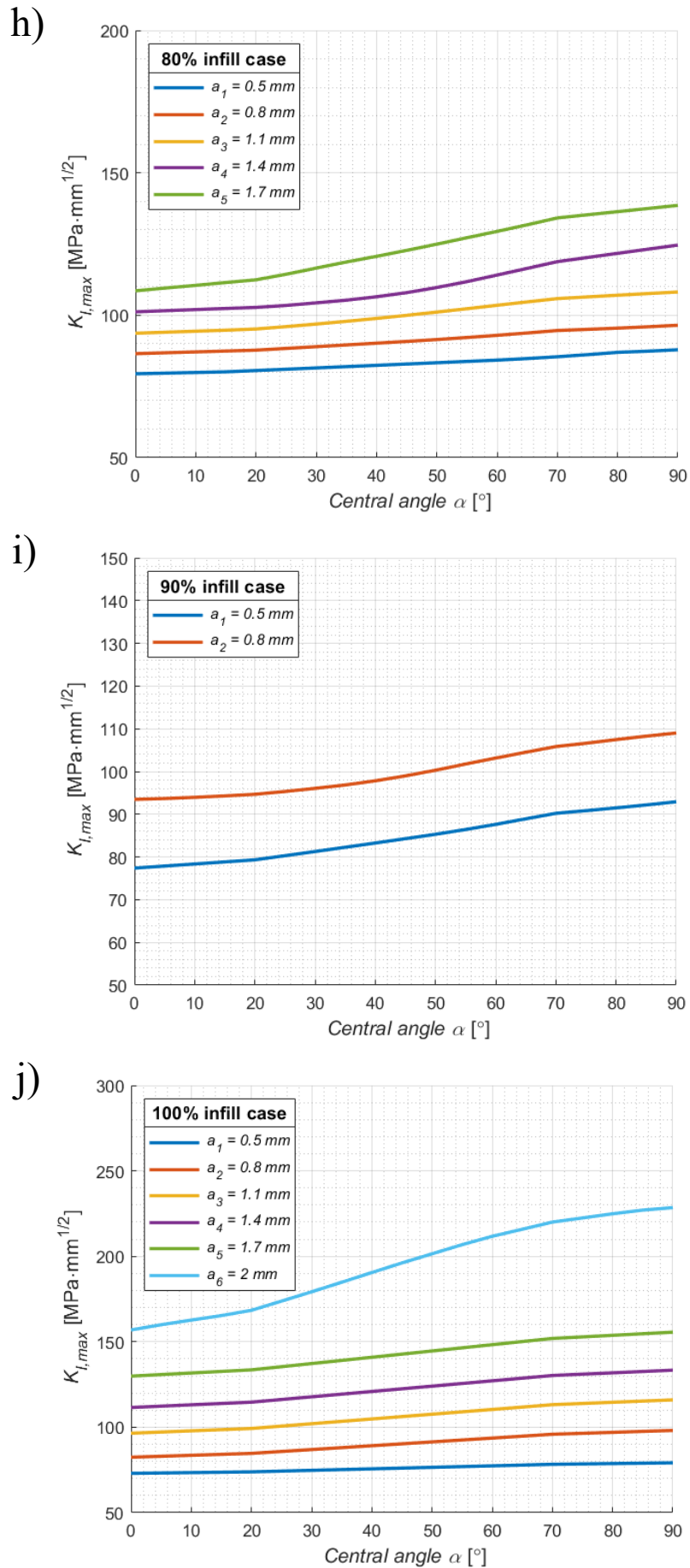


f)



g)





Slika 4.42 Dijagrami zavisnosti SIF -a, odnosno $K_{I,max}$, od centralnog ugla α za modele: a) 10%; b) 20%; c) 30%; d) 40%; e) 50%; f) 60%; g) 70%; h) 80%; i) 90%; j) 100% ispune.

Promena oblika fronta prsline iz kružnog u eliptični može se uočiti u kasnijim fazama rasta prsline pri centralnom uglu α većem od 60° , što je slučaj kod modela sa 20% (slika 4.42b), 50% (slika 4.42e), 70% (slika 4.42g), 80% (slika 4.42h) i 100% (slika 4.42j) količinom ispune. Nasuprot tome, kod modela sa 30% (slika 4.42c), 40% (slika 4.42d) i 90% (slika 4.42i) ispune nije ostvaren dovoljan priraštaj dužine prsline za dostizanje faze promene oblika fronta prsline, zbog čega su vrednosti SIF -a bile niže od $150 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

Kod numeričkih modela sa 10% (slika 4.42a) i 60% (slika 4.42f) količinom ispune takođe je došlo do promene oblika fronta prsline, pri čemu je u oba slučaja priraštaj dužine prsline premašio 1.7 mm. Međutim, usled visokih vrednosti SIF -a, koje su prelazile $295 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, odnosno $680 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$, ovi modeli su ostvarili kratak preostali zamorni vek. Iznenadna interakcija između prsline i obližnje unutrašnje strukture, odnosno šupljina pojedinačnih saća, dovela je do prekida rasta prsline. Ovo predstavlja osnovni razlog za nedostatak podataka u slučajevima modela sa 10% (slika 4.42a) i 30% (slika 4.42c) količine ispune. Vredi istaći da kod modela sa 10% ispune unutrašnja šupljina saća nije prekinula postepeni porast vrednosti SIF -a sve dok se prslina nije približila slobodnoj površini, za razliku od modela sa 30% ispune kod kojeg je došlo do naglog porasta vrednosti SIF -a na ivicama saća na koje je prslina naišla u završnoj fazi rasta.

Pretpostavka je da rezultat ne zavisi od količine ispune celog modela ortopedске pločice, već pre svega od količine materijala u okolini prsline. Pomoću softverskog paketa SolidWorks (Dassault Systèmes, Velizi Vilakuble, Francuska) procenjena je površina poprečnog preseka u ravni rasta prsline, kao i zapremina materijala u sloju debljine (t) oko razmatrane prsline, pri čemu je debljina sloja varirana od 0.2 mm do 5 mm (slika 3.32; tabela 4.12).

Tabela 4.12 Površina poprečnog preseka i zapremina materijala u okolini prsline za različite debljine u rasponu $t = 0.2 - 5 \text{ mm}$.

Količina ispune [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pop. presek [mm^2]	14.19	18.16	14.47	15.17	17.89	18.49	18.51	18.04	17.53	18.51
$t = 0.2 \text{ mm}$ [mm^3]	2.84	3.63	2.89	3.04	3.58	3.69	3.70	3.61	3.51	3.70
$t = 0.5 \text{ mm}$ [mm^3]	7.10	9.07	7.24	7.59	8.95	9.18	9.25	9.05	8.78	9.25
$t = 1 \text{ mm}$ [mm^3]	14.19	17.97	14.52	15.18	17.93	18.16	18.36	18.13	17.90	18.51
$t = 2 \text{ mm}$ [mm^3]	28.38	34.52	29.81	30.99	36.09	35.21	35.22	36.43	36.41	37.02
$t = 3 \text{ mm}$ [mm^3]	42.55	49.55	46.52	47.92	54.36	51.24	51.42	54.08	54.70	55.56
$t = 4 \text{ mm}$ [mm^3]	56.75	64.47	62.90	65.58	71.83	67.82	68.75	71.11	71.15	74.23
$t = 5 \text{ mm}$ [mm^3]	71.10	79.64	78.77	83.17	88.70	85.42	87.70	88.56	89.58	93.23

Radi procene uticaja veličine poprečnog preseka i zapremine materijala u okolini prsline sprovedena je ANOVA metoda. Rezultati prve analize pokazali su slabu prediktivnu sposobnost modela, sa vrednošću $R^2 = 0.133$ za procenu preostalog zamornog veka, odnosno vrednostima $R^2 = 0.436$ i 0.138 za predikciju maksimalne dužine prsline i vrednosti SIF -a, respektivno. Međutim, izuzimanjem rezultata za količinu ispune od 60% iz analize, prediktivna sposobnost modela poboljšana je na $R^2 = 0.758$ za procenu preostalog zamornog veka, što ukazuje na snažnu korelaciju. Modeli za procenu maksimalne dužine prsline (a_{max}) i vrednosti SIF -a su ostali slabi, sa R^2 vrednostima od približno 0.1 u oba slučaja. Pearsonovi koeficijenti korelacije i procenjene p -

vrednosti prikazani su u tabeli 4.13 za procenu preostalog zamornog veka, vrednosti maksimalne dužine prsline (a_{max}) i vrednosti SIF -a.

Tabela 4.13 Pearsonov koeficijent korelacije (r) i p -vrednost za sve modele izuzev 60% ispune.

	N_f [-]		a_{max} [mm]		SIF [$MPa\sqrt{mm}$]	
	Pearson (r)	p -vrednost	Pearson (r)	p -vrednost	Pearson (r)	p -vrednost
Pop. presek [mm^2]	0.888	0.0014	0.463	0.2095	-0.102	0.7934
$t = 0.2$ mm [mm^3]	0.887	0.0014	0.46	0.2128	-0.105	0.7888
$t = 0.5$ mm [mm^3]	0.887	0.0014	0.458	0.2156	-0.107	0.7833
$t = 1$ mm [mm^3]	0.861	0.0029	0.41	0.2732	-0.136	0.728
$t = 2$ mm [mm^3]	0.802	0.0093	0.263	0.4949	-0.196	0.6133
$t = 3$ mm [mm^3]	0.708	0.0329	0.082	0.8335	-0.254	0.5099
$t = 4$ mm [mm^3]	0.678	0.0448	0.021	0.9575	-0.273	0.4777
$t = 5$ mm [mm^3]	0.625	0.0717	-0.026	0.9463	-0.325	0.3941

Kao što se vidi u tabeli 4.13, statistički značajni rezultati ($p < 0.05$) uočavaju se pri proceni preostalog zamornog veka za debljine posmatrane zapremine do $t = 4$ mm. Uticaj površine poprečnog preseka uporediv je sa uticajem lokalne zapremine materijala samo do $t = 1$ mm, a $t = 2$ mm se može smatrati prelaznim slučajem. Kada je reč o Pearsonovoj korelaciji, veoma jaka korelacija ($r = 0.8 - 1.0$) se uočava do $t = 2$ mm, dok se preostali slučajevi mogu smatrati samo jakim korelacijama ($r = 0.5 - 0.79$).

Ovime je pokazano da rezultati preostalog zamornog veka sa visokom preciznošću zavise od površine poprečnog preseka u ravni rasta prsline i zapremine materijala u okolini prsline debljine do $t = 1$ mm, dok se veoma jaka korelacija između ovih parametara i preostalog zamornog veka uočava i za debljine do $t = 2$ mm. Kada je reč o maksimalnoj dužini prsline (a_{max}) i vrednosti SIF -a, statistički modeli ukazuju na nepostojanje validne korelacije, odnosno na to da površina poprečnog preseka i zapremina materijala u okolini prsline ne utiču značajno na ove veličine.

4.6. Diskusija rezultata

Rezultati prikazani u ovom istraživanju obuhvataju ispitivanja na zatezanje, ispitivanja žilavosti loma prema LEML i EPML, kao i ispitivanja zamornog rasta prsline, sa ciljem određivanja odgovarajućih parametara za numeričke simulacije procene mehaničkog ponašanja aditivno proizvedenih delova od PLA polimera. U razmatranje je uzeta geometrija ortopedске pločice, budući da se prema [14], PLA polimerni materijal razmatra kao potencijalni materijal za izradu biomedicinskih naprava, odnosno struktura namenjenih primeni u ortopediji [26-28].

Parametri aditivne proizvodnje uzeti u obzir u ovom istraživanju su količina ispune i visina sloja. Razmatran je ukupan spektar od 10% do 100% količine ispune, sa inkrementom od 10%, za sve tri moguće visine sloja (0.3 mm, 0.2 mm i 0.1 mm), čime je obuhvaćeno ukupno 30 kombinacija ovih parametara.

Ispitivanja na zatezanje su rađena za epruvete od 90% i 100% količine ispune za sve tri visine sloja. Namera je bila da se time proceni mehaničko ponašanje korišćenog PLA materijala, a serije sa 90% količinom ispune su poslužile za interpolaciju sa istraživanjem [3], koje je rađeno za opseg ispuna od 10% do 90%. Time je izvršena procena mehaničkih osobina na zatezanje za sve navedene kombinacije ova dva parametra aditivne proizvodnje. Primarno je ovaj tip ispitivanja namenjen za procenu RSD stanja u okolini vrha prsline (slika 1.17a) prema jednačini (2.10) kod sprovedenih ispitivanja žilavosti loma SENB epruveta. Nevezano za primarnu namenu, uočeno je da količina ispune dominantno utiče na dobijene rezultate, što je prikazano u tabelama 4.1 i 4.2. Najbolje mehaničke osobine, u pogledu zatezne čvrstoće i modula elastičnosti, ostvarene su pri većim količinama ispune i manjim visinama sloja. Ipak, treba imati u vidu da i kod epruveta sa 100% količinom ispune dobijena struktura nije sasvim homogena. Naime, pošto unutrašnjost strukture čini saće, šupljine koje se nalaze unutar pojedinačnih saća kao i unutrašnje šupljine između niti unutar sloja i između susednih slojeva su vizuelno uočljive na optičkom mikroskopu, kao što je prikazano na slici 4.4. Postizanje homogene strukture delova izrađenih FDM tehnologijom predstavlja izazov u praksi već više od decenije, naročito u kontekstu proizvodnje samih uređaja, a u manjoj meri optimizacijom parametara aditivne proizvodnje na postojećim komercijalnim uređajima, poput onog korišćenog u ovom istraživanju (slika 3.1).

Polazna tačka ispitivanja žilavosti loma aditivno proizvedenih epruveta od PLA materijala je bila da se materijal ponaša kvazi-krto [74-78,83-85]. Stoga su ispitivanja sprovedena prema standardu ASTM D5045 [60] koji predviđa mogućnost procene žilavosti loma na C(T) ili SENB epruvetama. U ovom segmentu istraživanja svaka razmatrana SENB serija se sastojala od četiri epruvete, aditivno proizvedene u jednom procesu. Pri tome, jedna epruveta je poslužila kao rezerva u slučaju nepredviđenih otkaza ili drugih grešaka tokom ispitivanja. Osim poštovanja zahteva standarda [60], pri ispitivanju je korišćena i 3D DIC kamera (slika 3.11) radi procene pravca rasta prsline korišćenjem virtuelnih mernih traka, ali i procene otvaranja prsline na mestima vrha zareza (CMOD) i okoline vrha prsline (CTOD). Tokom obrade rezultata je uočeno da serije epruveta nižih količina ispune ne zadovoljavaju zahtevani kriterijum sile, kojim se procenjuje linearnost mehaničkog odziva tokom ispitivanja. Posebno je interesantno zapažanje da pri količini ispune od 50% dolazi do delimičnog neispunjavanja kriterijuma sile kod sve tri razmatrane visine sloja. Time je eliminisana hipoteza o slučajnom karakteru ove pojave.

Analiza validnih rezultata ispitivanja žilavosti loma prema LEML pokazala je da količina ispune značajno doprinosi dobijenim vrednostima K_{IC} , gde veće količine ispune obezbeđuju veću otpornost na nastanak krtoг loma. Uočena je razlika u uticaju visine sloja na rezultate ispitivanja na zatezanje u odnosu na rezultate ispitivanja žilavosti loma. Iako su manje visine sloja doprinele boljim mehaničkim osobinama, u slučaju SENB epruveta ispitanih u konfiguraciji savijanja u tri tačke (slike 3.6 i 3.7) uočen je suprotan trend. Pretpostavka je da pri savijanju veća debljina niti kod većih visina sloja (0.3 mm) donosi veću lokalnu krutost na vrhu prsline i time pruža veći otpor

njenom otvaranju. Dobijeni rezultati za 100% količinu ispune su uporedivi sa istraživanjem [84], s tim da su visoke vrednosti K_{IC} u istraživanjima [49,76] najverovatnije posledica neispunjenosti RSD uslova, usled korišćenja epruveta debljine manje od 10 mm.

Ispitivanja žilavosti loma prema LEML nisu obuhvatila serije količina ispune od 10% do 40%, s tim da delimično validni rezultati ispitanih serija od 50% mogu da posluže za verifikaciju u nastavku istraživanja. Naime, ispitivanja žilavosti loma prema EPML predviđaju mogućnost ispitivanja putem dve različite metode, koje pojedinačno zahtevaju određene uslove koji nisu uvek ostvarivi u praksi, naročito u slučaju nehomogenih struktura aditivno proizvedenih delova. Metoda sa više uzoraka prema standardu ASTM D6068 [65] zahteva veliki broj epruveta kako bi se ostvarila ponovljivost rezultata na najmanje sedam epruveta. Imajući u vidu da ovo istraživanje obuhvata 30 serija, jasno je ograničenje koje ovakav postupak predstavlja. Druga metoda, koja se zasniva na ispitivanju dva uzorka (naziv: „metoda sa jednim uzorkom”), nosi određene analitičke izazove, ali pruža mogućnost određivanja početka stabilnog rasta prsline analitičkim putem, bez potrebe za ispitivanjem velikog broja epruveta.

Jedan od ključnih doprinosa ovog istraživanja jeste razvoj hibridne metode kojom se analitički određuju tri važna stanja prsline:

- početak stabilnog rasta;
- njen priraštaj;
- konačni razmatrani rast.

Polazna ideja za određivanje početka stabilnog rasta prsline je prikazana u istraživanju [61] kroz odnos CMOD – CTOD. Iako početak nelinearnosti odziva na dijagramu sila-pomeranje SENB epruvete ukazuje na odvijanje određenih procesa u materijalu, samo neki od lokalnih parametara procene stanja prsline mogu da posluže u ovom slučaju. Pošto otvaranje prsline prema Velsu [42] teoretski ukazuje na stvaranje novih površina prsline (njenom rastu), a uzimanjem u obzir odnosa CMOD – CTOD može se naslutiti da gubitak početne linearnosti u korist bržeg rasta CTOD (u odnosu na CMOD) otkriva trenutak kraja procesa zatupljenja oko vrha prsline i očekivanog početka njenog stabilnog rasta. Na slici 4.24 su prikazani dijagrami sila-pomeranje za razmatrane serije epruveta jedne visine sloja, sa podebljanim delom u kom je ostvaren rast od interesa. Dakle, početak stabilnog rasta prsline ne odgovara globalnom početku nelinearnog odziva na dijagramu, već mu prethodi, odnosno početak stabilnog rasta prsline predstavlja uzrok nelinearnog odziva na dijagramu sila-pomeranje.

Priraštaj rasta prsline određen je numerički, očitavanjem vrednosti sa simuliranog modela, nakon čega je uspostavljena polinomska zavisnost. Dobijeno je inženjerski zadovoljavajuće poklapanje, uz vrednosti $R^2 > 0.99$. Verifikacija numeričkih modela statičkog rasta prsline izvršena je na CTOD i CMOD vrednostima, pri čemu je dobijeno maksimalno odstupanje ispod 9% za CTOD, odnosno 7% za CMOD. Konačni razmatrani rast podrazumeva vrednost rasta prsline u trenutku postizanja maksimalne vrednosti sile. Ovaj trenutak je sa stanovišta teorije J integrala važan, jer prema energetskom kriterijumu J integral ne opisuje ponašanje materijala u fazi rasterećenja. Pošto dobijen priraštaj prsline (slika 4.16) uključuje i vrednosti priraštaja nastalih u fazi rasterećenja (slika 3.21) korišćeni su statistički alati kojima je moguće proceniti uticaj ove faze na ukupan rezultat dužine prsline. Metodom višestruke linearne regresije razvijeni su statistički modeli koji pokazuju poklapanje $R^2 > 0.91$ (tabela 4.5), kojima je procenjen uticaj potencijalne energije ove faze na dijagramu sila-pomeranje. Pošto potencijalna energija opisuje ovaj deo dijagrama, a njegovim izuzimanjem iz postavljenih jednačina dobija se neophodna korekcija dužine prsline koja ukazuje na njenu vrednost kada je postignuta maksimalna sila u mehaničkom odzivu SENB epruvete, odnosno kada je navedena potencijalna energija bila jednaka nuli.

Uz tako dobijene vrednosti dužine prsline i određivanjem vrednosti J integrala prema jednačinama (2.31) i (2.33), u programskom paketu MATLAB (MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, SAD) dobijeni su parovi vrednosti za konstrukciju J - R krivih, prema jednačini (2.34),

uzimajući u obzir liniju zatupljenja koja poštuje jednačinu (2.36). J - R krive za sve tri visine sloja i količine ispune u rasponu od 30% do 50% prikazane su na slikama 4.25-27. Serije epruveta od 10% i 20% nisu ušle u razmatranje zbog nemogućnosti očitavanja priraštaja prsline sa prelomnih površina epruveta (slika 4.16b). Vrednosti dobijenih J_{IC} prikazane su u tabeli 4.7, sa rasponom vrednosti od $1.067 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (serija 0.1 mm; 50%) do $2.787 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (serija 0.2 mm; 40%). Upoređivanjem rezultata između serija vidi se da količina ispune od 40% poseduje najviše vrednosti, a kao i kod procene žilavosti loma prema LEML, primetno veće vrednosti J_{IC} su prisutne kod rezultata većih visina sloja, zbog istog karaktera opterećenja kod procena žilavosti loma prema LEML i EPML (savijanje u tri tačke).

U istraživanju [85] dobijene su vrednosti J_{IC} prema metodi sa više uzoraka, u rasponu od 5.75 do $6.8 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$. U istom istraživanju je rađena procena žilavosti loma prema ASTM D5045 [60] gde su dobijene nevalidne vrednosti prema kriterijumu sile u rasponu $5\text{--}7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, što se i za slučaj visokih vrednosti J_{IC} može objasniti uzimanjem u obzir debljine epruvete od samo 8 mm (slika 1.32). Nažalost, ispitivanja žilavosti loma prema EPML za kvazi-krte PLA polimerne materijale su izuzetno retka u literaturi, pre svega zbog toga što metoda sa više uzoraka inače predstavlja značajan eksperimentalni izazov i najčešće se primenjuje za materijale koji imaju veliki eksploatacioni potencijal (pre svega se tu misli na metalne materijale). Ovim putem treba istaći i činjenicu da u istraživanju [85] nije konstruisana linija zatupljenja za dobijanje vrednosti J_{IC} prema ASTM D6068 [65] (slika 1.33).

Na kraju ispitivanja žilavosti loma prema EPML urađena je verifikacija vrednosti K_{IC} i preračunatih vrednosti K_{JIC} prema jednačini (2.37) za seriju epruveta sa 50% količine ispune, u sve tri visine sloja. Naime, delimična validnost serija sa ovom količinom ispune omogućava verifikaciju preračunatih vrednosti K_{JIC} dobijenih procenom prema EPML sa validnim vrednostima K_{IC} dobijenim prema LEML (tabela 4.8). Na ovaj način, dobijena su odstupanja od oko 4% i 7% za 0.2 mm i 0.3 mm visinu sloja, respektivno. Kod visine sloja od 0.1 mm zabeleženo je najveće odstupanje od oko 16%. Time se potvrđuje validnost predložene hibridne metode za procenu vrednosti J_{IC} .

Zatim, preračunate vrednosti K_{JIC} su uparene sa validnim vrednostima K_{IC} (tabela 4.9) i ustanovljeno je da vrednosti žilavosti loma opadaju sa smanjenjem količine ispune, ali usled velike lokalne deformacije niti u okolini vrha prsline pri nižim količinama ispune dolazi do skoka kritične vrednosti faktora intenziteta napona posle tranzitnih 50%. Naime, za sve tri visine sloja vrednosti K_{JIC} za 30% i 40% količine ispune su oko ili premašuju odgovarajuću vrednost K_{IC} za 100% količinu ispune. Ipak, kako je objašnjeno u teorijskom delu, pored toga što postoji relacija koja povezuje K_{IC} i J_{IC} (2.37), one fenomenološki opisuju različite trenutke rasta prsline, te ove zaključke treba uzeti sa određenim stepenom rezerve. Ali, ovime je dokazano da primarno kvazi-krt materijal, kao što je PLA, može odgovarajućom manipulacijom unutrašnje strukture da pokaže i onu stranu ponašanja koja je karakteristična za većinu termoplastičnih materijala, a tu se misli na izraženo viskoelastično-viskoplastično ponašanje.

Pri planiranju numeričkih simulacija statičkog i zamornog rasta prsline imalo se u vidu konstruisanje odgovarajućih modela materijala koji bi najvernije opisali ponašanje termoplastičnog materijala, poput PLA. Isprva su razmatrani tro-mrežni modeli materijala za opis viskoelastičnog-viskoplastičnog ponašanja poput pominjanih TNM i TNV modela, ali usled ranije pominjanih poteškoća (koje će takođe biti pomenute i u narednim rečenicama) ipak je odlučeno da su linearno-elastični modeli materijala u ovom slučaju opravdani.

TNM modeli za sve tri visine sloja pri 100% količini ispune su konstruisani sa poklapanjem od $R^2 > 0.999$. Na ovaj način se kalibrisao model materijala koji odgovara „punom” poprečnom preseku, a unutrašnja struktura saća implementira se direktno u strukturu numeričkog modela (slike 3.33 i 4.22). Ipak, TNM model zadovoljava potrebe mehaničkog odziva i podesan je isključivo za numeričke analize raspodele napona i deformacija za strukture koje ne sadrže diskontinuitete tipa

prslina. Za numeričke modele statičkog i zamornog rasta prsline koristi se nadograđena verzija TNM modela, odnosno TNV. Radi kalibracije ovog modela materijala, pored rezultata ispitivanja na zatezanje do loma pri više brzina opterećenja moraju da se koriste i rezultati relaksacije materijala, kao i rezultati ponavljanih ciklusa sa sukcesivno većim opterećenjem (slika 3.5). Međutim, pri tim eksperimentalnim ispitivanjima je uočeno da PLA materijal nije mogao da izdrži ni 30 sekundi relaksacije pri deformaciji od 1.5%, odnosno ni 120 sekundi pri deformaciji od 1.1%, iako je podešeno vreme relaksacije bilo 20 minuta. Na osnovu takvih eksperimentalnih podataka nije bilo moguće formirati dovoljno pouzdan konstitutivni model materijala, te je jedina preostala opcija bila primena linearno-elastičnog modela, koji je dostupan u softverima za numeričke simulacije, poput softvera Abaqus (Dassault Systèmes, Velizy Vilakuble, Francuska) i Ansys Mechanical (Ansys, Kenonsburg, SAD).

Radi pripreme numeričkih simulacija zamornog rasta prsline na modelima ortopedskih pločica moralo se pristupiti eksperimentalnom ispitivanju zamornog rasta prsline radi utvrđivanja validnih Parisovih koeficijenata prema jednačini (2.41). Naime, razmatrane su sve tri visine sloja (0.3 mm, 0.2 mm i 0.1 mm) za 100% količinu ispune, radi dobijanja karakteristika materijala. Pri 0.3 mm i 0.2 mm uočen je rast prsline van primarne ravni, s tim da su sve epruvete sa 0.3 mm visinom sloja pokazale nedostatak validnosti prema ASTM E647-5 [172], dok je kod 0.2 mm rezultat bio polovičan. Kod 0.3 mm visine sloja pristupljeno je aditivnoj proizvodnji bočnih zareza (slika 3.25) da bi se uvelo naponsko ograničenje u okolini vrha prsline. Tehnička poteškoća je nastala usled rasta zamorne prsline ispod aditivno proizvedenih slojeva bočnog zareza, čime je onemogućeno očitavanje priraštaja rasta prsline tokom ispitivanja. Stoga su epruvete sa 0.3 mm visinom sloja izuzete iz dalje analize. Zatim, u sledećem koraku su ispitane C(T) epruvete bez beleženja priraštaja rasta prsline, a uzimao se u obzir samo konačan broj ciklusa prema jednačini (2.44). Dobijene vrednosti su upisane na dijagram zamornog rasta prsline (slika 4.38) i tu je jasno uočljivo da Parisov koeficijent C_{50} značajno bolje opisuje zamorni vek od koeficijenta C_{95} . Takođe, na dijagramu zamornog veka jasno se vidi razlika u rezultatima verifikacije preostale dve visine sloja, što ide u korist visini sloja od 0.1 mm.

Numeričke simulacije zamornog rasta prsline na deset modela ortopedskih pločica sa količinom ispune od 10% do 100% sprovedene su na osnovu rezultata Parisovih koeficijenata za 0.1 mm visinu sloja i za razliku od rezultata ispitivanja na zatezanje i žilavosti loma prema LEML i EPML, uočeno je da dobijene vrednosti iz simulacija, poput SIF -a, a_{max} i N_f ne zavise direktno od same vrednosti količine ispune. Naime, rezultati isprva ne pokazuju nikakvu pravilnost, a neki od modela sa nižim količinama ispune su dali uporedive ili čak bolje rezultate od modela iz suprotnog spektra. Pristupljeno je i analizi $K_{I,max}$ u zavisnosti od ustanovljenog centralnog ugla na prslini (slika 4.41), kako bi se razmotrila i njena promena oblika iz početnog kružnog u eliptični oblik, koji prethodi nestabilnom rastu prsline, kako je ranije navedeno u [36-40]. Na slici 4.42 se jasnije može videti zašto dobijeni rezultati po količinama ispune imaju gotovo nasumičan raspored, odnosno zašto je došlo do ranijeg prekida numeričke simulacije kod određenih modela. Naime, unutrašnja struktura u okolini prsline pored konačnog broja ostvarenih ciklusa utiče i na raspodelu i razvoj vrednosti SIF -a, odnosno $K_{I,max}$, duž fronta prsline. Kod nekih modela došlo je do ranijeg prekida simulacija usled nailaska prsline na okolne strukture saća, pri čemu je prslina u tom trenutku imala početni kružni oblik (slika 4.42c, 4.42d i 4.42i). Takođe, unutrašnja struktura iako nije u putanji rasta prsline može da utiče na porast vrednosti SIF -a što je bilo presudno kod modela sa 60% ispune, koji je ostvario najmanji broj ciklusa (tabela 4.11; slika 4.42f).

Sledeća pretpostavka je bila da na konačne rezultate iz tabele 4.11 utiče pre svega površina poprečnog preseka u ravni rasta prsline, kao i zapremina okolnog materijala. Stoga su u softverskom paketu SolidWorks (Dassault Systèmes, Velizy Vilakuble, Francuska) procenjene vrednosti poprečnog preseka i okolne zapremine materijala debljine od 0.2 mm do 5 mm (slika 3.32; tabela 4.12) i izvršena je statistička analiza pomoću ANOVA metode i Pearsonovog koeficijenta korelacije uz pomoć kojih je utvrđeno da poprečni presek i zapremina okolnog materijala do 1 mm debljine daju visoku pouzdanost predikcije ukupnog broja ciklusa N_f . Zapravo

do te debljine zapremina utiče uporedivo sa poprečnim presekom, a statistički zadovoljavajući rezultati su dobijeni do debljine od 4 mm, pri kojoj je još uvek ispunjen uslov $p < 0.05$ za ANOVA metodu, odnosno do debljine od 2 mm gde je Pearsonov koeficijent korelacije r u domenu veoma jake korelacije [140].

U slučaju maksimalnog priraštaja dužine prsline α_{max} i vrednosti SIF -a navedene statističke metode ne postižu zadovoljavajuće rezultate.

5. Zaključak

U okviru ovog istraživanja izvršena je obuhvatna eksperimentalna, numerička i statistička analiza uticaja ključnih parametara aditivne proizvodnje na mehaničko ponašanje i otpornost na lom aditivno proizvedenih delova, primenjenih na modelu ortopedske pločice. Fokus istraživanja je bio na ispitivanju uticaja količine ispune i visine sloja, koje su u dostupnoj literaturi pokazale dominantan uticaj na ponašanje izrađenih delova, sa i bez uključenih defekata tipa prsline.

Izvršena su eksperimentalna ispitivanja na zatezanje, ispitivanja žilavosti loma prema LEML i EPML, kao i ispitivanja zamornog rasta prsline. Istraživanje je obuhvatilo i numeričke analize statičkog rasta prsline pri proceni žilavosti loma prema EPML, kao i numeričke simulacije zamornog rasta prsline na modelima ortopedskih pločica. Takođe, izvršene su statističke analize kao alat za procenu dužine prsline pri određivanju žilavosti loma prema EPML, kao i za analizu rezultata dobijenih numeričkim simulacijama zamornog rasta prsline na modelima ortopedskih pločica različitih količina ispune.

Budući da se PLA polimerni materijal u literaturi često karakteriše kao materijal sa takozvanim „kvazi-krtim” ponašanjem, ispitivanja žilavosti loma najpre su sprovedena prema zahtevima LEML. Rezultati su pokazali da primenjeni parametri aditivne proizvodnje ne utiču samo na konačne vrednosti žilavosti loma, već i na samu validnost ispitivanja prema LEML. Naime, serije epruveta sa količinama ispune od 60% do 100% ispunile su zahteve definisane odgovarajućim standardom za sve tri razmatrane visine sloja. Kod količine ispune od 50% uočeno je tranzitno ponašanje, pri čemu su zahtevi LEML bili ispunjeni samo za deo razmatranih slučajeva, dok su rezultati za količine ispune od 10% do 40% morali biti interpretirani primenom principa EPML. Činjenica da je isti trend uočen kod sve tri razmatrane visine sloja isključuje mogućnost da je ovakvo ponašanje posledica slučajnosti.

Dosadašnja saznanja ukazuju na postojanje dva načina određivanja žilavosti loma primenom principa EPML, odnosno dve metode konstrukcije J - R krivih, na osnovu kojih se određuje kritična vrednost faktora intenziteta napona. Obe metode karakterišu određene poteškoće pri konstrukciji J - R krive. Naime, metoda sa više uzoraka zahteva visoku ponovljivost mehaničkog odziva epruveta, pri čemu se svaka naredna epruveta ispituje pri većem opterećenju u odnosu na prethodnu. Iako je ova metoda samim tim zahtevna sa aspekta eksperimentalne realizacije, dodatnu poteškoću u ovom istraživanju predstavlja primena polimernog materijala, koji karakteriše izražena anizotropija. Pored toga, sam proces aditivne proizvodnje dovodi do formiranja makroskopskih šupljina u izrađenom delu, koje nastaju između nanesenih niti materijala, kao i usled formiranja unutrašnje strukture dela koja, bez obzira na zadatu količinu ispune, ne može biti u potpunosti ispunjena. Iako je metoda sa više uzoraka eksperimentalno zahtevna, ona omogućava analitički jednostavno određivanje priraštaja prsline, od početka njenog stabilnog rasta pa sve do vrednosti priraštaja pri dostizanju maksimalne sile tokom ispitivanja.

Druga metoda, koja u svom nazivu pominje jedan uzorak, zasniva se na određivanju žilavosti loma praćenjem procesa na jednoj epruveti sa unesenom prslinom, uz poređenje sa rezultatima dobijenim na referentnoj epruveti sa tupim vrhom. Međutim, analitički postupak je znatno zahtevniji, jer se zasniva na praćenju i razdvajanju doprinosa elastičnog i plastičnog rada tokom rasta prsline. Poređenjem mehaničkog odziva dve epruvete razdvajaju se doprinosi sile i deformacije nastali usled elastičnog ponašanja materijala od onih koji su posledica stvarnog rasta prsline. Usled navedenih analitičkih zahteva, mogućnost pojave grešaka je izraženija. Stoga je, kako se navodi u literaturi, radi potvrde rezultata dobijenih ovom metodom potrebno izvršiti ispitivanja primenom obe metode, pri čemu se rezultat dobijen metodom sa jednim uzorkom verifikuje rezultatima dobijenim metodom sa više uzoraka.

Imajući u vidu navedene prednosti i ograničenja obe postojeće metode, u okviru ovog istraživanja predložena je nova hibridna metoda za konstrukciju J - R krivih. Predložena metoda se zasniva na određivanju dve karakteristične tačke tokom procesa rasta prsline, koje definišu početak i kraj posmatranog intervala rasta, kao i na proceni priraštaja između tih tačaka.

Početak stabilnog rasta prsline procenjuje se na osnovu vrednosti otvaranja prsline na njenom vrhu (CTOD) i na ulazu u zarez (CMOD). Analizom odnosa ove dve veličine uočeno je na početku ispitivanja da je njihov odnos linearan, a daljim ispitivanjem dolazi do odstupanja od te linearnosti usled izraženijeg priraštaja vrednosti CTOD u odnosu na CMOD. Dalje, primećeno je da do gubitka linearnosti odnosa CMOD – CTOD dolazi neposredno pre pojave nelinearnosti globalnog mehaničkog odziva, koja se manifestuje na dijagramu sila-pomeranje. Na osnovu toga može se zaključiti da proces početka stabilnog rasta prsline najpre nastupa lokalno, u okolini njenog vrha, kroz povećanje otvaranja prsline, a tek potom dovodi do pojave nelinearnosti u globalnom mehaničkom odzivu materijala. Na taj način, promena CMOD – CTOD predstavlja osetljiviji pokazatelj početka stabilnog rasta prsline u odnosu na promenu globalnog mehaničkog odziva.

Predložena metoda nazvana je „hibridnom” jer se za određivanje priraštaja prsline i kraja procesa rasta od interesa primenjuju numeričke simulacije i statistički modeli, respektivno. Priraštaj prsline određuje se na osnovu dobijene polinomske zavisnosti koja opisuje njen rast, izvedene iz numeričkih simulacija statičkog rasta prsline na modelima sa odgovarajućom unutrašnjom strukturom saća. Poklapanje polinomske zavisnosti sa numerički dobijenim podacima ocenjeno je kao veoma zadovoljavajuće ($R^2 > 0.99$). Verifikacija numeričkih simulacija izvršena je poređenjem vrednosti otvaranja prsline, pri čemu maksimalno odstupanje u slučaju CMOD nije prelazilo 7%, odnosno 9% u slučaju CTOD.

Činjenica da energetski kriterijum J integrala zahteva da eksperimentalni podaci obuhvataju isključivo fazi opterećenja, a ne i rasterećenja, uslovlja je potrebu za korekcijom konačnih priraštaja prsline očitanih optičkom metodom. Jedna od poteškoća bila je određivanje konačnog priraštaja prsline, budući da su epruvete ispitivane do loma, kojem je prethodilo rasterećenje sile. Stoga su primenom statističkih modela zasnovanih na višestrukoj linearnoj regresiji formirani modeli sa visokim stepenom poklapanja sa eksperimentalnim vrednostima ($R^2 > 0.91$). Na osnovu ovih modela ustanovljen je uticaj potencijalne energije u oblasti rasterećenja na dijagramu sila-pomeranje. Budući da je maksimalna sila dostignuta neposredno pre početka rasterećenja, odnosno u trenutku kada je potencijalna energija u oblasti rasterećenja jednaka nuli, iz konstruisanih jednačina višestruke linearne regresije uklonjen je član koji opisuje doprinos ove energije. Na taj način izvršena je korekcija konačne vrednosti dužine prsline, čime je određena njena vrednost koja odgovara trenutku dostizanja maksimalne sile.

Iz poznatih jednačina određuju se odgovarajuće vrednosti J integrala, nakon čega se dobijene vrednosti unose na dijagram i konstruiše se J - R kriva i linija zatupljenja prema poznatim zakonima. Na osnovu preseka J - R krive i linije zatupljenja određuje se kritična vrednost J integrala (J_{IC}). Verifikacija predložene hibridne metode izvršena je na osnovu rezultata dobijenih za serije epruveta sa količinom ispune od 50%, koje su pokazale tranziciono ponašanje i samo delimično ispunile zahteve LEML. Ove serije su predstavljale odgovarajuću osnovu za verifikaciju rezultata dobijenih primenom EPML, jer je bilo moguće uporediti rezultate sa validnim vrednostima žilavosti loma određenim prema LEML. U tu svrhu, vrednosti J_{IC} dobijene primenom EPML preračunate su u odgovarajuće vrednosti K_{JIC} . Validnost predložene metode potvrđena je odstupanjem od 4% za visinu sloja od 0.2 mm do 16% za visinu sloja od 0.1 mm. Dobijene vrednosti K_{JIC} potom su uparene sa odgovarajućim validnim vrednostima K_{IC} , čime je omogućeno jednoznačno poređenje vrednosti žilavosti loma između svih serija epruveta.

Jedan od glavnih nalaza ovog istraživanja je zapažanje da se pri nižim količinama ispune, neposredno ispod tranzicione vrednosti od 50%, odnosno pri količini ispune od 40%, javlja izražena lokalna deformacija unutrašnje strukture saća. Kao posledica toga, dobijaju se veće vrednosti J_{IC} ,

koje nakon preračunavanja u K_{JIC} dostižu ili čak premašuju vrednosti K_{IC} dobijene za epruvete sa 100% količine ispune. Ipak, i ovde treba naglasiti da, iako postoji relacija između K_{IC} i J_{IC} , ove veličine opisuju različite trenutke rasta prsline. Stoga dobijene preračunate vrednosti K_{JIC} treba tumačiti sa rezervom.

Ispitivanja zamornog rasta prsline sprovedena su na C(T) epruvetama sa 100% količinom ispune i za sve tri razmatrane visine sloja (0.3 mm, 0.2 mm i 0.1 mm) sa ciljem karakterizacije dinamičkog ponašanja PLA materijala sa inicijalno unesenom prslinom. Odstupanje prsline od pravca glavne ravni njenog prostiranja uočeno je kod većih visina sloja (0.3 mm i 0.2 mm). Pri visini sloja od 0.3 mm nije bilo moguće dobiti epruvete sa pravilnim rastom prsline, dok je pri visini sloja od 0.2 mm zahtevani pravac rasta ostvaren kod približno polovine ispitanih epruveta (2/5). Kod visine sloja od 0.3 mm pristupilo se aditivnoj proizvodnji epruveta sa bočnim zarezima. Međutim, usled stepenaste geometrije aditivno izrađenih bočnih zarez, oni su tokom ispitivanja predstavljali optičku barijeru, budući da je prslina ubrzo nakon početka propagacije skrenula iza bočnog zarez. Zatim je dijagram zamornog veka poslužio za verifikaciju vrednosti Parisovih koeficijenata, pri čemu je za visinu sloja od 0.1 mm uočeno najbolje poklapanje rezultata dobijenih primenom Parisovog koeficijenta C_{50} sa vrednostima broja ciklusa određenim na epruvetama kod kojih priraštaj prsline nije praćen. Stoga su vrednosti Parisovih koeficijenata određenih za visinu sloja od 0.1 mm korišćene u numeričkim simulacijama zamornog rasta prsline na modelima ortopedskih pločica.

Numeričke simulacije zamornog rasta prsline izvršene su na modelima ortopedskih pločica sa količinama ispune od 10% do 100%, pri čemu su korišćene vrednosti Parisovih koeficijenata za visinu sloja od 0.1 mm. Kao i kod numeričkih simulacija statičkog rasta prsline, za opis mehaničkog ponašanja materijala primenjen je linearno-elastični model, usled nemogućnosti kalibracije odgovarajućeg viskoelastično-viskoplastičnog modela materijala. Naime, na osnovu eksperimentalno dobijenih mehaničkih odziva pri različitim brzinama opterećenja najpre je kalibrisan TNM model, koji je ostvario veoma dobro poklapanje sa eksperimentalnim rezultatima ($R^2 > 0.999$). Međutim, budući da su u okviru ovog istraživanja razmatrane numeričke simulacije sa unesenim defektom tipa prsline, TNM model nije bio dovoljan. Ovaj model materijala je prvenstveno namenjen simulaciji ponašanja struktura bez uvedenih diskontinuiteta, odnosno on primarno služi za određivanje naponsko-deformacionog stanja u strukturi bez uračunatih defekata.

Za kalibraciju TNV modela, pored eksperimentalnih rezultata korišćenih za kalibraciju TNM modela, rađena su i ispitivanja relaksacije materijala, kao i ispitivanja epruveta podvrgnutih ciklusima rastućeg opterećenja. Usled brzog otkaza PLA epruveta tokom ovih ispitivanja nije bilo moguće obezbediti dovoljan eksperimentalni skup podataka za pouzdanu kalibraciju TNV modela. Stoga je umesto odgovarajućeg viskoelastično-viskoplastičnog modela materijala u numeričkim simulacijama zamornog rasta prsline na modelima ortopedskih pločica primenjen linearno-elastični model.

Dobijeni rezultati numeričkih simulacija na modelima ortopedskih pločica pokazuju izvesnu nasumičnost u rasporedu vrednosti ukupno ostvarenog broja ciklusa opterećenja, priraštaja dužine prsline i faktora intenziteta napona. Za razliku od toga, rezultati eksperimentalnih ispitivanja na zatezanje i ispitivanja žilavosti loma pokazali su jasno dominantan uticaj količine ispune, tako da postoji relativno pravilan trend porasta vrednosti od najnižih pri količini ispune od 10% ka najvišim vrednostima pri 100% količini ispune.

Ovakva razlika u dobijenim rezultatima numeričkih simulacija se može objasniti položajem prsline i lokalnom geometrijom simuliranih modela. Dakle, kod ispitivanja na zatezanje i ispitivanja žilavosti loma na SENB epruvetama najviše je opterećen centralni deo epruvete, odnosno inicijalna prslina je bila pozicionirana na vrhu zarez, koji je u centralnom delu epruvete. Kod modela ortopedskih pločica situacija je drugačija, jer su inicijalne prsline smeštene u bočnom delu modela, na mestu jednog od otvora. Uvedene su dve simetrične prsline na modelu, a analiza je fokusirana na

jednu od njih. Dakle, ponašanje prsline tokom propagacije najverovatnije je uslovljeno lokalnom konfiguracijom unutrašnje strukture saća, koja se razlikuje između pojedinačnih modela nezavisno od nominalno zadate količine ispune. Pri tome, važno je istaći da je geometrija unutrašnje strukture saća u numeričkim modelima definisana na osnovu prikaza iz softvera za pripremu aditivne proizvodnje, tako da korišćeni modeli verno reprezentuju unutrašnju strukturu koja bi bila formirana tokom procesa izrade. Potvrda tvrdnji o uticaju lokalne konfiguracije unutrašnje strukture saća dobijena je analizom vrednosti faktora intenziteta napona duž fronta prsline kod svih razmatranih modela ortopedskih pločica.

Korišćenjem statističkih alata, odnosno analize varijanse (ANOVA) i Pearsonovog koeficijenta korelacije, ispitan je uticaj površine poprečnog preseka u ravni prostiranja prsline, kao i zapremine okolnog materijala debljine od 0.2 mm do 5 mm, na rezultate numeričkih simulacija. Najizraženija povezanost sa ukupnim brojem ciklusa opterećenja je uočena upravo za površinu poprečnog preseka i zapreminu okolnog materijala do debljine od 1 mm. Međutim, statistička zavisnost utvrđena je i za veće debljine, do 4 mm na osnovu ANOVA metode, odnosno do 2 mm primenom Pearsonovog koeficijenta korelacije. Za razliku od ukupnog broja ciklusa opterećenja, za priraštaj dužine prsline i vrednosti faktora intenziteta napona nije utvrđena odgovarajuća zakonitost primenom navedenih statističkih alata.

Svi dobijeni rezultati ovog istraživanja ukazuju na značajan uticaj parametara aditivne proizvodnje, poput količine ispune i visine sloja, na otpornost na lom modela ortopedskih pločica izrađenih od PLA polimernog materijala. Ovime je pokazano da mogućnost manipulacije unutrašnje strukture aditivno proizvedenih delova ne utiče samo na njihove osnovne mehaničke osobine, već i na način nastanka i propagacije prsline, što je od posebnog značaja za procenu pouzdanosti ovakvih struktura. Tokom radnog veka izrađenog dela može doći do nastanka i razvoja prsline usled dejstva opterećenja u eksploataciji, zbog čega poznavanje njenog ponašanja, uključujući trenutak početka stabilnog rasta i prelazak u nestabilan rast predstavlja važan podatak za procenu integriteta ovako izrađenog dela.

Vrednosti žilavosti loma predstavljaju meru sposobnosti materijala da izdrži opterećenje u prisustvu defekta tipa prsline, te njegovo određivanje predstavlja važan preduslov pri proceni ponašanja struktura, kakve su i aditivno proizvedeni delovi. U okviru ovog istraživanja uočen je naročito značajan fenomen koji se ponovio kod sve tri razmatrane visine sloja, što isključuje mogućnost slučajne varijacije eksperimentalnih rezultata. Naime, promena količine ispune kod aditivno proizvedenih delova sa inicijalno unesenim defektom tipa prsline ne utiče samo na ukupne vrednosti parametara mehanike loma, već i na lokalne uslove u okolini vrha prsline. Kod termoplastičnih materijala, kakav je PLA, smanjenje količine ispune može dovesti do promene naponskih stanja u okolini vrha prsline, tako da pri nižim količinama ispune dolazi do tranzicije od kvazi-krtog ka izraženo elasto-plastičnom ponašanju, praćenoj razvojem izraženih lokalnih deformacija u unutrašnjoj strukturi u okolini prsline. Posebno se pokazala značajna količina ispune od 40%, pri kojoj je uočena najizraženija lokalna deformacija u okolini vrha prsline. Ovakvo ponašanje ukazuje da pri određenim geometrijama unutrašnje strukture može doći do razvoja lokalnih mehanizama deformisanja u termoplastičnom PLA materijalu, koji značajno utiču na otpornost na (stabilan) rast prsline.

Imajući u vidu navedena ograničenja postojećih metoda za ispitivanja žilavosti loma prema EPML, u okviru ovog istraživanja je predložena nova hibridna metoda za konstrukciju *J-R* krivih, koja kombinuje analitičke principe postojećih metoda sa numeričkim određivanjem priraštaja prsline i statističkom korekcijom njene konačne dužine. Predložena metoda omogućava konstrukciju *J-R* krive uz smanjenje eksperimentalnih i analitičkih zahteva karakterističnih za postojeće metode, pri čemu je njena primenljivost kod PLA polimernog materijala potvrđena poređenjem sa rezultatima dobijenim primenom validne procene prema LEML.

Specifičnosti aditivne proizvodnje ispoljile su se i pri ispitivanjima zamornog rasta prsline, pri čemu je uočeno da manje visine sloja, koje rezultuju finijom strukturom konačno izrađenog dela, doprinose pravilnijem rastu prsline u primarnoj ravni očekivanog prostiranja. Nasuprot tome, veće visine sloja, koje se koriste za grublju izradu delova, mogu dovesti do odstupanja prsline od očekivanog pravca prostiranja.

Konačno, numeričke simulacije modela ortopedskih pločica premostile su ograničenja koja su onemogućavala eksperimentalno ispitivanje navedenih struktura usled nedostupnosti adekvatnih adaptera i uređaja za ispitivanje zamora materijala (pulzatora). Eksperimentalno verifikovane vrednosti Parisovih koeficijenata, uz primenu odgovarajućih eksperimentalno određenih mehaničkih osobina, omogućile su numeričko predviđanje zamornog rasta prsline i procenu ponašanja ortopedskih pločica pri cikličnom opterećenju. Posebno je značajno istaći da propagacija prsline može biti uslovljena lokalnom konfiguracijom unutrašnje strukture, nezavisno od nominalno zadate količine ispune, zbog čega pri projektovanju delova izloženih visokim lokalnim naprezanjima treba razmotriti mogućnost lokalnog ojačavanja kritičnih zona. S obzirom na to da se kod aditivne proizvodnje priprema procesa izrade dela u značajnoj meri zasniva na softverskom definisanju parametara, poput količine ispune i visine sloja, dobijeni rezultati ukazuju na potrebu za razvojem softverskih rešenja koja bi omogućila identifikaciju kritičnih zona i njihovo lokalno prilagođavanje u skladu sa očekivanim opterećenjem.

Ovakav pristup mogao bi biti od posebnog značaja za budući razvoj aditivno proizvedenih biorazgradivih ortopedskih pločica, kod kojih su, pored odgovarajućih mehaničkih osobina od značaja i kontrola unutrašnje strukture, te procena njihovog ponašanja u prisustvu potencijalnih defekata. Dobijeni rezultati stoga mogu predstavljati osnovu za dalji razvoj i optimizaciju ovakvih struktura, uz neophodnu procenu njihovih mehaničkih performansi, otpornosti na rast prsline i otpornosti na lom.

6. Literatura

- [1] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2012.
- [2] Vorkapić, N., Pjević, M., Popović, M., Slavković, N., Živanović, S., 2020. An additive manufacturing benchmark artefact and deviation measurement method. *Journal of Mechanical Science and Technology* 34(7), str. 3015-3026. DOI: 10.1007/s12206-020-0633-2
- [3] Pandžić, A., Hodžić, D., Milovanović, A., 2019. Effect of infill type and density on tensile properties of PLA material for FDM process. *The 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, Vienna, Austria; Paper #074: str. 545-554. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.074
- [4] Alami, A.H., Olabi, A.G., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H., Abdelkareem, M.A., 2023. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals. *Ain Shams Engineering Journal* 14(11), 102516: str. 1-18. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102516
- [5] DeStefano, V., Khan, S., Tabada, A., 2020. Applications of PLA in modern medicine. *Engineered Regeneration* 1, str. 76-87. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.08.002
- [6] Said, L.B., Ayadi, B., Alharbi, S., Dammak, F., 2025. Recent Advances in Additive Manufacturing: A Review of Current Developments and Future Directions. *Machines* MDPI, 13, 813. DOI: 10.3390/machines13090813
- [7] Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B* 143, str. 172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [8] Popović, M., Pjević, M., Milovanović, A., Mladenović, G., Milošević, M., 2023. Printing parameter optimization of PLA material concerning geometrical accuracy and tensile properties relative to FDM process productivity. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37(2), str. 697-706. DOI: 10.1007/s12206-023-0113-6
- [9] Milovanović, A., Montanari, M., Golubović, Z., Mărghițaș, M.P., Spagnoli, A., Brighenti, R., Sedmak, A., 2024. Compressive and flexural mechanical responses of components obtained through mSLA vat photopolymerization technology. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 131, 104406. DOI: 10.1016/j.tafmec.2024.104406
- [10] Jevtić, I., Mladenović, G., Milovanović, A., Trajković, I., Đurković, M., Korolija, N., Milošević, M., 2023. The influence of printing orientation on the flexural strength of PA 12 specimens produced by SLS. *Science of Sintering* 56(1), str. 45-57. DOI: 10.2298/SOS230508031J
- [11] Milovanović, A., Sedmak, A., Grbović, A., Golubović, Z., Mladenović, G., Čolić, K., Milošević, M., 2020. Comparative analysis of printing parameters effect on mechanical properties of natural PLA and advanced PLA-X material. *Procedia Structural Integrity* 28, str. 1963-1968. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.019
- [12] Acierno, D., Patti, A., 2023. Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview. *Materials* 16, 7664. DOI: 10.3390/ma16247664
- [13] Shanmugam, V., Babu, K., Kannan, G., Mensah, R.A., Samantaray, S.K., Das, O., 2024. The thermal properties of FDM printed polymeric materials: A review. *Polymer Degradation and Stability* 228, 110902. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110902
- [14] Petersmann, S., Spoerk, M., Van De Steene, W., Üçal, M., Wiener, J., Pinter, G., Arbeiter, F., 2020. Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 104, 103611. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.103611
- [15] Milovanović, A., Milošević, M., Mladenović, G., Likozar, B., Čolić, K., Mitrović, N., 2018. Experimental Dimensional Accuracy Analysis of Reformer Prototype Model Produced by

- FDM and SLA 3D Printing Technology. In: Mitrovic, N., Milosevic, M., Mladenovic, G. (eds) *Experimental and Numerical Investigations in Materials Science and Engineering*. CNNTech 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 54. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-99620-2_7
- [16] Farah, S., Anderson, D.G., Langer, R., 2016. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, str. 367-392. DOI: 10.1016/j.addr.2016.06.012
- [17] Alauddin, M.S., Hayei, N.A.A., Sabarudin, M.A., Baharin, N.H.M., 2022. Barrier Membrane in Regenerative Therapy: A Narrative Review. *Membranes* 12(5), 444. DOI: 10.3390/membranes12050444
- [18] Quarterman, J.C., Geary, S.M., Salem, A.K., 2021. Evolution of drug-eluting biomedical implants for sustained drug delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 159, str. 21-35. DOI: 10.1016/j.ejpb.2020.12.005
- [19] Maleki, H., Azimi, B., Ismaeilimoghadam, S., Danti, S., 2022. Poly(lactic acid)-Based Electrospun Fibrous Structures for Biomedical Applications. *Applied Sciences* 12(6), 3192. DOI: 10.3390/app12063192
- [20] Shen, Y., He, X., Chen, L., 2025. Synthesis and Biomedical Applications of PLA-HPG-Based Biodegradable Nanocarriers: A Review. *Biosensors* 15(8), 502. DOI: 10.3390/bios15080502
- [21] Donate, R., Monzón, M., Alemán-Domínguez, M.E., 2020. Additive manufacturing of PLA-based scaffolds intended for bone regeneration and strategies to improve their biological properties. *e-Polymers* 20, str. 571–599. DOI: 10.1515/epoly-2020-0046
- [22] Zhao, H., Li, L., Ding, S., Liu, C., Ai, J., 2018. Effect of porous structure and pore size on mechanical strength of 3D-printed comby scaffolds. *Materials Letters* 223, str. 21-24. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.03.205
- [23] Caronna, F., Limem, S., Khoa Do, L.D., Ronan, W., Dolan, E.B., 2025. In vitro evaluation of bioabsorbable poly(lactic acid) (PLA) and poly-4-hydroxybutyrate (P4HB) warp-knitted spacer fabric scaffolds for osteogenic differentiation. *Biomedical Materials* 20(2), 025011. DOI: 10.1088/1748-605X/ada85d
- [24] Mohammadi, M.S., Bureau, M.N., Nazhat, S.N., 2014. Polylactic acid (PLA) biomedical foams for tissue engineering. In: *Biomedical Foams for Tissue Engineering Applications*; Springer: Singapore, str. 313–334. DOI: 10.1533/9780857097033.2.313
- [25] Adekoya, G.J., Ezika, A.C., Adekoya, O.C., Sadiku, E.R., Hamam, Y., Sinha Ray, S., 2023. Recent advancements in biomedical application of polylactic acid/graphene nanocomposites: An overview. *BMMat* 1(4), e12042. DOI: 10.1002/bmm2.12042
- [26] Khouri, N.G., Bahú, J.O., Blanco-Llamero, C., Severino, P., Concha, V.O.C., Souto, E.O.C., 2023. Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – A review of the literature. *Journal of Molecular Structure* 1309, 138243. DOI: 10.1016/j.molstruc.2024.138243
- [27] Saini, P., Arora, M., Ravi Kumar, M.N.V., 2016. Poly(lactic acid) blends in biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, str. 47-59. DOI: 10.1016/j.addr.2016.06.014
- [28] Tyler, B., Gullotti, D., Mangraviti, A., Utsuki, T., Brem, H., 2016. Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, str. 163-175. DOI: 10.1016/j.addr.2016.06.018
- [29] Shingvi, M.S., Zinjarde, S.S., Gokhale, D.V., 2019. Polylactic acid: synthesis and biomedical applications. *Journal of Applied Microbiology* 127(6), str. 1612–1626. DOI: 10.1111/jam.14290
- [30] Milovanović, A., Sedmak, S., Sedmak, A., Vučetić, F., Monkova, K., 2026. Influence of Infill Density on the Fatigue Performance of FDM-Manufactured Orthopaedic Plates. *Materials* 19, 816. DOI: 10.3390/ma19040816

- [31] Jee, E., Robichaux-Edwards, L., Montgomery, C., Bilderback, K., Perry, K., Massey, P.A., 2024. Polylactic acid bioabsorbable implants of the hand: A review. *J Hand Microsurg.* 16(3), 100053. DOI: 10.1016/j.jham.2024.100053
- [32] Al-Tamimi, A.A., Tlija, M., Alhamidi, A., Haider Abidi, M., Al-Ahmari, A., Al-Zahrani, S.M., 2024. A novel reinforced PLA locking compression plate to eliminate stress shielding using design for additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology* 32, str. 2127-2139. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.08.056
- [33] Xu, W., Liu, F., Nassehi, A., 2024. Optimizing Orthopaedic Bone Plates for Directed Energy Deposition with Generative Design and Topological Optimization Approaches. *Procedia CIRP* 125, str. 272-277. DOI: 10.1016/j.procir.2024.08.047
- [34] Tatić, U., Čolić, K., Sedmak, A., Mišković, Ž., Petrović, A., 2018. Evaluation of the Locking Compression Plates Stress-Strain Fields. *Technical Gazette* 25(1), str. 112-117. DOI: 10.17559/TV-20170420121538
- [35] Kim, T., Wang See, C., Li, X., Zhu, D., 2020. Orthopedic implants and devices for bone fractures and defects: Past, present and perspective. *Engineered Regeneration* 1, str. 6-18. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.05.003
- [36] Vučetić, F., Čolić, K., Grbović, A., Sedmak, A., Sedmak, S., Kirin, S., Berto, F., 2022. Numerical simulation of fatigue crack paths in orthopedic plates. *Procedia Structural Integrity* 39, str. 808–814. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.03.154
- [37] Sedmak, A., Vučetić, F., Čolić, K., Grbović, A., Božić, Ž., Sedmak, S., Lozanović Šajić, J., 2022. Fatigue crack growth in locking compression plates. *International Journal of Fatigue* 157, 106727. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106727
- [38] Sedmak, A., Vučetić, F., Čolić, K., Grbović, A., Sedmak, S., Kirin, S., Berto, F., 2022. Fatigue life assessment of orthopedic plates made of Ti6Al4V. *Engineering Failure Analysis* 137, 106259. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106259
- [39] Vučetić, F., Čolić, K., Grbović, A., Petrović, A., Sedmak, A., Kozak, D., Sedmak, S., 2020. Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Titanium Alloy Orthopaedic Plates. *Technical Gazette* 27, 6, str. 1917-1922. DOI: 10.17559/TV-20200617192027
- [40] Vučetić, F., Čolić, K., Grbović, A., Radaković, Z., Sedmak, S., 2020. Extended FEM analysis of fatigue crack growth in Ti-6Al-4V orthopaedic plates. *Procedia Structural Integrity* 28, str. 555–560. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.065
- [41] Inion Oy. Inion CPS™. Bioabsorbable Fixation System: Product Overview. Tampere, Finland: Inion Oy; 2026.
- [42] Anderson, T.L., 2005. *Fracture mechanics: Fundamentals and Applications*. 3rd ed., Boca Raton, FL: CRC Press (Taylor & Francis Group). DOI: 10.1201/9781420058215
- [43] Bajpai, P.K., Singh, I., Madaan, J., 2012. Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 27(1), str. 52-81. DOI: 10.1177/0892705712439571
- [44] Tsuji, H., 2016. Poly(lactic acid) stereocomplexes: A decade of progress. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, str. 97-135. DOI: 10.1016/j.addr.2016.04.017
- [45] Castro-Aguirre, E., Iniguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X., Auras, R., 2016. Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107, str. 333-366. DOI: 10.1016/j.addr.2016.03.010
- [46] Milovanović, A., Sedmak, A., Grbović, A., Golubović, Z., Milošević, M., 2021. Influence of second-phase particles on fracture behavior of PLA and advanced PLA-X material. *Procedia Structural Integrity* 31, str. 122-126. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.03.020
- [47] Mazur, K.E., Borucka, A., Kaczor, P., Gądek, S., Bogucki, R., Mirzawiński, D., Kuciel, S., 2021. Mechanical, Thermal and Microstructural Characteristic of 3D Printed Polylactide Composites with Natural Fibers: Wood, Bamboo and Cork. *Journal of Polymers and the Environment* 30, str. 2341–2354. DOI: 10.1007/s10924-021-02356-3

- [48] Pandžić, A., Hodžić, D., Milovanović, A., 2019. Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology. *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, str. 0555-0561. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.075
- [49] Marsavina, L., Vălean, C., Mărghitaș, M.P., Linul, E., Razavi, N., Berto, F., Brighenti, R., 2022. Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics* 274, 108766. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108766
- [50] Spoerk, M., Arbeiter, F., Cajner, H., Sapkota, J., Holzer, C., 2017. Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science* 134(41):45401. DOI: 10.1002/app.45401
- [51] Xu, J., Xu, F., Gao, G., 2021. The Effect of 3D Printing Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Parts. *Journal of Physics: Conference Series* 2133, 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/2133/1/012026
- [52] Cojocaru, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C.O., Marginean, G., 2022. The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review. *Polymers* 14, 886. DOI: 10.3390/polym14050886
- [53] Yogeshwaran, K., Das, S., 2022. Mechanical properties of fused deposition modelling processed parts: A review. *Materials Today: Proceedings*. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.137
- [54] Gao, G., Xu, F., Tang, G., Liu, Z., 2022. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines* 13, 553. DOI: 10.3390/mi13040553
- [55] Milovanović, A., Golubović, Z., Kirin, S., Babinský, T., Šulák, I., Milošević, M., Sedmak, A., 2023. Manufacturing parameter influence on FDM polypropylene tensile properties. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37, str. 5541–5547. DOI: 10.1007/s12206-023-2305-5
- [56] Li, Y., Yuan, S., Zhang, W., Zhu, J., 2023. A new continuous printing path planning method for gradient honeycomb infill structures. *Int. J Adv. Manuf. Technol.* 126, str. 719-734. DOI: 10.1007/s00170-023-11065-1
- [57] Milovanović, A., Sedmak, A., Paunić, M., Mitrović, A., Popović, M., Milošević, M., 2024. Tensile properties of pure PLA polymer dedicated for additive manufacturing. *Structural Integrity and Life* 24(3), str. 263-268. DOI: 10.69644/ivk-2024-03-0263
- [58] Sedmak, A., 2003. *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija: [monografija]*. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Zavod za grafičku tehniku TMF. ISBN: 86-7083-473-1
- [59] Milovanović, A., 2016. *Numerički proračun i analiza dizajna odabrane proteze veštačkog kuka Zimmer VerSys® CRC*. Master rad. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [60] ASTM D5045-14: Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [61] Samadian, K., Hertelé, S., De Waele, W., 2019. Measurement of CTOD along a surface crack by means of digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics* 205, str. 470-485. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.015
- [62] Hale, G.E., Ramsteiner, F., 2001. J-fracture toughness of polymers at slow speed. *European Structural Integrity Society* 28, str. 123-157. DOI: 10.1016/S1566-1369(01)80031-5
- [63] Bouaziz, M.A., Marae-Djouda, J., Zouaoui, M., Gardan, J., Hild, F., 2021. Crack growth measurement and J-integral evaluation of additively manufactured polymer using digital image correlation and FE modeling. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 44, str. 1318-1335. DOI: 10.1111/ffe.13431
- [64] Gosch, A., 2017. *Examination of J-integral methods and their applicability to tough polypropylene materials*. Master rad. Univerzitet u Leobenu, Austrija.
- [65] ASTM D6068-10: Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018.

- [66] Gosch, A., Arbeiter, F., Agnelli, S., Berer, M., Pinter, G., Baldi, F., 2020. J-testing of polymers via the load separation criterion based ESIS TC4 procedure: Effect of the specimen size. *Polymer Testing* 89, 106637. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106637
- [67] Paris, P.C., Erdogan, F., 1963. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering* 85, str. 528-533. DOI: 10.1115/1.3656900
- [68] Hutař, P., Kuběna, I., Ševčík, I., Šmíd, M., Kruml, T., Náhlík, L., 2014. Small fatigue crack propagation in Y₂O₃ strengthened steels. *Journal of Nuclear Materials* 452, str. 370-377. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.05.071
- [69] Trávníček, L., Kuběna, I., Mazánová, V., Vojtek, T., Polák, J., Hutař, P., Šmíd, M., 2021. Advantageous Description of Short Fatigue Crack Growth Rates in Austenitic Stainless Steels with Distinct Properties. *Metals* 11, 475. DOI: 10.3390/met11030475
- [70] ASTM E399-22: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [71] ASTM E1820-18: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [72] Linul, E., Marşavina, L., Stoia, D.I., 2020. Mode I and II fracture toughness investigation of Laser-Sintered Polyamide. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 106, 102497. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102497
- [73] Stoia, D.I., Linul, E., Marşavina, L., 2022. Mixed-mode I/II fracture properties of selectively laser sintered polyamide. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 121, 103527. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103527
- [74] Stoia, D.I., Marşavina, L., Linul, E., 2020. Mode I Fracture Toughness of Polyamide and Alumide Samples obtained by Selective Laser Sintering Additive Process. *Polymers* 12, 640. DOI: 10.3390/polym12030640
- [75] Marşavina, L., Stoia, D.I., Linul, E., 2021. Fracture toughness in additive manufacturing by selective laser sintering: an overview. *Material Design and Processing Communications* e254. DOI: 10.1002/mdp2.254
- [76] Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, J., Berto, F., Brighenti, R., 2020. The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity* 28, str. 1134-1139. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.128
- [77] Milovanović, A., Golubović, Z., Trajković, I., Sedmak, A., Milošević, M., Vălean, E., Marşavina, L., 2022. Influence of printing parameters on the eligibility of plane-strain fracture toughness results for PLA polymer. *Procedia Structural Integrity* 41, str. 290-297. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.05.034
- [78] Milovanović, A., Milošević, M., Trajković, I., Sedmak, A., Razavi, J., Berto, F., 2022. Crack path direction in plane-strain fracture toughness assessment tests of quasi-brittle PLA polymer and ductile PLA-X composite. *Procedia Structural Integrity* 42, str. 1376-1381. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.175
- [79] Milovanović, A., Poduška, J., Trávníček, L., Náhlík, L., Sedmak, A., Milošević, M., Berto, F., 2022. Side-groove effect on fracture mechanical fatigue testing of PLA material. *Procedia Structural Integrity* 42, str. 847-856. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.107
- [80] Milovanović, A., Babinský, T., Sedmak, A., Milošević, M., 2023. Printing parameter impact on PLA material fracture toughness results. *International scientific and professional conference, Politehnika 2023, Beograd, Srbija*.
- [81] Milovanović, A., Babinský, T., Sedmak, A., Filipović, I., Milošević, M., 2024. The effect of infill density on fracture toughness results of PLA material. *Procedia Structural Integrity* 68, str. 922-928. DOI: 10.1016/j.prostr.2025.06.151
- [82] Ayatollahi, M.R., Nabavi-Kivi, A., Bahrami, B., Yahya, M.Y., Khosravani, M.R., 2020. The influence of in plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics* 237, 107225. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107225

- [83] Kizhakkinan, U., Rosen, D.W., Raghavan, N., 2022. Experimental investigation of fracture toughness of fused deposition modeling 3D-printed PLA parts. *Materials Today: Proceedings* 70, str. 631-637. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.014
- [84] Khudiakova, A., Arbeiter, F., Spoerk, M., Godec, D., Pinter, G., 2019. Inter-layer bonding characterisation between materials with different degrees of stiffness processed by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing* 28, str. 184–193. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.006
- [85] Arbeiter, F., Spoerk, M., Wiener, J., Gosch, A., Pinter, G., 2018. Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication. *Polymer Testing* 66, str. 105-113. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.01.002
- [86] Papon, E.A., Haque, A., 2019. Fracture toughness of additively manufactured carbon fiber reinforced composites. *Additive Manufacturing* 26, str. 41–52. DOI: 10.1016/j.addma.2018.12.010
- [87] Seibert, P., Susmel, L., Berto, F., Kästner, M., Razavi, N., 2021. Applicability of strain energy density criterion for fracture prediction of notched PLA specimens produced via fused deposition modelling. *Engineering Fracture Mechanics* 258, 108103. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.108103
- [88] Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J.A., Llumà-Fuentes, J., Gómez-Gras, G., Puig, D., 2017. Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing. *Procedia Manufacturing* 13, str. 872-879. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.146
- [89] Ogaili, A.A.F., Basem, A., Kadhim, M.S., Al-Sharify, Z.T., Jaber, A.A., Njim, E.K., Al-Haddad, L.A., Hamzah, M.N., Al-Ameen, E.S., 2024. The Effect of Chopped Carbon Fibers on the Mechanical Properties and Fracture Toughness of 3D-Printed PLA Parts: An Experimental and Simulation Study. *Journal of Composite Science* 8(7), 273. DOI: 10.3390/jcs8070273
- [90] Benini, K. C. C. d. C., Bomfim, A. S. C. d., Voorwald, H. J. C., 2023. Cellulose-Reinforced Polylactic Acid Composites for Three-Dimensional Printing Using Polyethylene Glycol as an Additive: A Comprehensive Review. *Polymers*, 15(19), 3960. DOI: 10.3390/polym15193960
- [91] Ramirez, C., Agaliotis, E., Pettarin, V., 2024. Fracture toughness and overall characterization of PLA based biocomposites with natural fibers: A comparative study. *Polymer* 307, 127309. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127309
- [92] Bikiaris, N.D., Koumentakou, I., Samiotaki, C., Meimaroglou, D., Varytimidou, D., Karatza, A., Kalantzis, Z., Roussou, M., Bikiaris, R.D., Papageorgiou, G.Z., 2023. Recent Advances in the Investigation of Poly(lactic acid) (PLA) Nanocomposites: Incorporation of Various Nanofillers and their Properties and Applications. *Polymers* 27;15(5):1196. DOI: 10.3390/polym15051196
- [93] Garofalo, E., Di Maio, L., Scarfato, P., Russo, P., Incarnato, L., 2023. Selective Localization of Nanoparticles to Enhance the Properties of PBS/PLA Nanocomposite Blown Films. *J Polym Environ* 31, str. 4546–4558. DOI: 10.1007/s10924-023-02883-1
- [94] Rasselet, D., Caro-Bretelle, A.-S., Taguet, A., Lopez-Cuesta, J.-M., 2019. Reactive Compatibilization of PLA/PA11 Blends and Their Application in Additive Manufacturing. *Materials* 12(3), 485. DOI: 10.3390/ma12030485
- [95] Crupano, W., Adrover-Monserrat, B., Lluma, J., Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J.A., 2024. Investigating mechanical properties of 3D printed polylactic acid / poly-3-hydroxybutyrate composites. Compressive and fatigue performance. *Heliyon* 10(18), e38066. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38066
- [96] Gosch, A., Arbeiter, F.J., Berer, M., Pinter, G., 2018. Comparison of J-integral methods for the characterization of tough polypropylene grades close to the glass transition temperature. *Engineering Fracture Mechanics* 203, str. 2-17. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.06.002

- [97] Gosch, A., Arbeiter, F.J., Agnelli, S., Berer, M., Baldi, F., 2021. Size-Induced Constraint Effects on Crack Initiation and Propagation Parameters in Ductile Polymers. *Materials* 14, 1945. DOI: 10.3390/ma14081945
- [98] Hart, E.L., Terokhin, B.I., 2025. Finite-Element Analysis of Stress Concentration in Thin Plates and Cylindrical Shells with a Circular Hole Surrounded by an Inclusion of Functionally Graded Material. *J Math Sci* 291, str. 703–715. DOI: 10.1007/s10958-025-07846-6
- [99] Ali, H. O. S., Dedić, V., Živković, J., Todić, N., Petrović, R., 2025. Application of the Finite Element Method in Stress and Strain Analysis of Spherical Tank for Fluid Storage. *Symmetry*, 17(9), 1565. DOI: 10.3390/sym17091565
- [100] Madoune, Y., Żmudzki, J., Lee, H., 2026. Finite element analysis of stress in removable lower complete denture under vertical and oblique occlusal forces. *Sci Rep* 16, 11997. DOI: 10.1038/s41598-026-37756-9
- [101] Gosai, K.N., Tripathi, V.D., Yadav, S., Vyas, D., Gopinath, P.V., Parihar, A.S., Abraham, S., 2024. Finite element analysis (FEA) of stress distribution in platform-switched short dental implants. *Bioinformation*. 2024 Mar 31;20(3), str. 248-251. DOI: 10.6026/973206300200248
- [102] Wang, Z., Grosseau-Poussard, J.-L., Panicaud, B., Labergere, C., 2022. Finite element analysis of stress evolution during the high temperature oxidation of Ni30Cr+ Cr2O3 systems. *Journal of Alloys and Compounds* 904, 164094. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164094
- [103] Arbeiter, F., Trávníček, L., Petersmann, S., Dlhý, P., Spoerk, M., Pinter, G., Hutař, P., 2020. Damage tolerance-based methodology for fatigue lifetime estimation of a structural component produced by material extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 36, 101730. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101730
- [104] Xiong, Z., Zhu, C., Yang, Y., Lin, T., Li, R., 2024. XFEM-Based Study of Fatigue Crack Propagation in Rocket Deflector Troughs under Coupled High-Temperature and Impact Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering* 12(2), 207. DOI: 10.3390/jmse12020207
- [105] Yakoubi, K., Montassir, S., Moustabchir, H., Elkhalfi, A., Pruncu, C. I., Arbaoui, J., Farooq, M. U., 2021. An Extended Finite Element Method (XFEM) Study on the Elastic T-Stress Evaluations for a Notch in a Pipe Steel Exposed to Internal Pressure. *Mathematics* 9(5), 507. DOI: 10.3390/math9050507
- [106] Mora, D.F., Niffenegger, M., Mao, G., 2022. Simulation of crack propagation in a thick-walled cylinder using XFEM. *Procedia Structural Integrity* 42, str. 224-235. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.028
- [107] Wen, L.-F., Tian, R., Wang, L.-X., Feng, C., 2023. Improved XFEM for multiple crack analysis: Accurate and efficient implementations for stress intensity factors. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 411, 116045. DOI: 10.1016/j.cma.2023.116045
- [108] Rodriguez-Florez, N., Carriero, A., Shefelbine, S. J., 2017. The use of XFEM to assess the influence of intra-cortical porosity on crack propagation. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 20(4), str. 385–392. DOI: 10.1080/10255842.2016.1235158
- [109] Chen, Z., Bao, H., Dai, Y., Liu, Y., 2022. Numerical prediction based on XFEM for mixed-mode crack growth path and fatigue life under cyclic overload. *International Journal of Fatigue* 162, 106943. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106943
- [110] Kozak, V., Vala, J., 2023. Crack growth modelling in cementitious composites using XFEM. *Procedia Structural Integrity* 43, str. 47-52. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.233
- [111] Bolaños, A., Yáñez, A., Cuadrado, A., Fiorucci, M. P., 2026. Comparative Analysis of XFEM and Phase Field Approaches for Fracture Prediction in Flexible Ti-6Al-4V Thoracic Implants. *Journal of Functional Biomaterials*, 17(5), 222. DOI: 10.3390/jfb17050222
- [112] Grbović, A., Sedmak, A., Lazić-Vulićević, Lj., Zaidi, R., Vitas, N., Kirin, S., 2023. Extended finite element method simulation of fatigue crack growth in a Charpy specimen. *Integritet i vek konstrukcija* 23(3), str. 235-238.

- [113] Čolić, K., Sedmak, A., Grbović, A., Burzić, M., Hloch, S., Sedmak, S., 2016. Numerical Simulation of Fatigue Crack Growth in Hip Implants. *Procedia Engineering* 149, str. 229-235. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.661
- [114] Milovanović, A., Sedmak, A., Čolić, K., Tatić, U., Đorđević, B., 2017. Numerical analysis of stress distribution in total hip replacement implant. *Integritet i vek konstrukcija* 17(2), str. 139-144.
- [115] Mijatović, T., Milovanović, A., Sedmak, A., Milović, Lj., Čolić, K., 2019. Integrity assessment of reverse engineered Ti-6Al-4V ELI total hip replacement implant. *Integritet i vek konstrukcija* 19(3), str. 237-242.
- [116] Milovanović, A., Sedmak, A., Grbović, A., Mijatović, T., Čolić, K., 2020. Design Aspects of Hip Implant Made of Ti-6Al-4V Extra Low Interstitials Alloy. *Procedia Structural Integrity* 26, str. 299-305. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.06.038
- [117] Sedmak, S., Čolić, K., Vučetić, F., Milovanović, A., Božić, Ž., 2026. Fatigue life of TI-6AL-4V hip implants under various load cases. *International Journal of Fatigue* 212, 109801. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2026.109801
- [118] Čolić, K., Kostić, S., Sedmak, S., Gubeljak, N., Grbović, A., 2025. Structural Integrity and Life Assessment of Ti-6Al-4V Orthopaedic Implants. *Metals* 15(3): 333. DOI: 10.3390/met15030333
- [119] Smoljanić, T., Milović, Lj., Sedmak, S., Milovanović, A., Čolić, K., 2024. Numerical Investigation of Fatigue Behavior in Ti-6Al-4V Orthopedic Hip Implants Subjected to Different Environments. *Materials* 17(15):3796. DOI: 10.3390/ma17153796
- [120] Babić, M., Verić, O., Božić, Ž., Sušić, A., 2020. Finite element modelling and fatigue life assessment of a cemented total hip prosthesis based on 3D scanning. *Engineering Failure Analysis* 113, 104536. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104536
- [121] Babić, M., Verić, O., Božić, Ž., Sušić, A., 2019. Fracture analysis of a total hip prosthesis based on reverse engineering. *Engineering Fracture Mechanics* 215, str. 261-271. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.05.003
- [122] ASTM F382-24: Standard Specification and Test Method for Metallic Bone Plates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [123] Raičević, N., Grbović, A., Kastratović, G., Vidanović, N., Sedmak, A., 2023. Fatigue life prediction of topologically optimized torque link adjusted for additive manufacturing. *International Journal of Fatigue* 176, 107907. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107907
- [124] Trávníček, L., Poduška, J., Messiha, M., Arbeiter, F., Pinter, G., Náhlík, L., Hutař, P., 2023. Effect of recycled material on failure by slow crack growth in multi-layer polyethylene pipes. *Engineering Fracture Mechanics* 289, 109423. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109423
- [125] Ali, H.B., Dawood, J.J., Mohammed, F. M., Othman, F. M., Fakhri, M. A., 2026. Optimizing the Flexural Performance of ABS Parts Fabricated by FDM Additive Manufacturing Through a Taguchi–ANOVA Statistical Framework. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 10(4), 125. DOI: 10.3390/jmmp10040125
- [126] Naveed, N., Anwar, M.N., 2024. Optimising 3D printing parameters through experimental techniques and ANOVA-Based statistical analysis. *SPE Polym* 5(2), str. 228-240. DOI: 10.1002/pls2.10122
- [127] Kafshgar, A.R., Rostami, S., Aliha, M.R.M., Berto, F., 2021. Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies. *Procedia Structural Integrity* 34, str. 71-77. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.011
- [128] Mishra, V., Bharat, N., Kumar, V., Vellaisamy, M., Veeman, D., 2025. Multi-objective optimization of 3D printed PLA/carbon fibre composite using a combined approach of gray relational analysis and ANOVA. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 38(11), str. 4208-4227. DOI: 10.1177/08927057251339246
- [129] Khmissi, B., Belhi, G., Hamida, B., Srivastava, V., Reis, P.N.B., 2026. Optimization of fused deposition modeling parameters for enhanced tensile performance of PLA using Taguchi and

- ANOVA approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 142, str. 6093–6104. DOI: 10.1007/s00170-026-17534-7
- [130] Centofanti, F., Colosimo, B.M., Grasso, M.L., Menafoglio, A., Palumbo, B., Vantini, S., 2023. Robust functional ANOVA with application to additive manufacturing. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics* 72(5), str. 1210–1234. DOI: 10.1093/jrssc/qlad074
- [131] Siraj, I., Drégelyi-Kiss, Á., 2025. Empirical comparison of FDM additive manufacturing process parameters by application grey relational analysis and multi-linear regression. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 138, str. 2861–2876. DOI: 10.1007/s00170-025-15688-4
- [132] Tzotzis, A., Efklidis, N., Cheng, K., & Kyratsis, P., 2025. Multiple Regression Analysis and Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II Optimization of Machining Carbon-Fiber-Reinforced Polyethylene Terephthalate Glycol Parts Fabricated via Additive Manufacturing Under Dry and Lubricated Conditions. *Lubricants* 13(2), 63. DOI: 10.3390/lubricants13020063
- [133] Samine, S., Karouchi, M., Zemzami, M., Hmina, N., Lagache, M., Belhouideg, S., 2026. Deep learning and multiple linear regression for predicting mechanical properties from elastic constants: Application to aluminum-based alloys used in 3D printing. *Results in Engineering* 29, 109602. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.109602
- [134] Wong, R., Tran, A., Dovgvy, B., Maldonado, C.S., Pham, M.-S., 2025. Critical statistical assessment of data in metal additive manufacturing. *Materials & Design* 256, 114301. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.114301
- [135] Pazarcıkcı, A., Özsoy, K., & Aksoy, B., 2026. Machine Learning-Driven Prediction of Manufacturing Parameters and Analysis of Mechanical Properties of PC-ABS Specimens Produced by the Fused Deposition Modeling Additive Manufacturing Method. *Polymers* 18(7), 886. DOI: 10.3390/polym18070886
- [136] Hümbert, S., Atzler, F., Voggenreiter, H., 2024. Mechanical Characterisation of Bond Formation during Overprinting of PEEK Laminates. *Materials* 17(1), 161. DOI: 10.3390/ma17010161
- [137] Oriola, A.T., Maile, J.D., Nguyen, A., Payton, E.J., 2025. Toward an Index for Predicting Additive Manufacturability of Refractory High-Entropy Alloys. *JOM* 77, str. 7222–7234. DOI: 10.1007/s11837-025-07552-3
- [138] Zimmerman, D.W., 2004. A note on preliminary tests of equality of variances. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 57, str. 173–181. DOI: 10.1348/000711004849222
- [139] Aladesanmi, V.I., Fatoba, O.S., Akinlabi, E.T., Ikumapayi, O.M., 2021. Regression analysis of hardness property of laser additive manufactured (LAM) Ti and TiB₂ metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings* 44, str. 1249–1253. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.252
- [140] Cohen, L., Manion, L., Morrison, K., 2007. *Research methods in education*. London: Routledge. ISBN: 0-203-02905-4
- [141] ISO 527-2: *Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*, International Organization for Standardization, 2012.
- [142] ASTM E647-24: *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [143] Machniewicz, T., 2012. Fatigue crack growth prediction models for metallic materials. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 36, str. 293–307. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2012.01721
- [144] Halfpenny, A., Bagni, C., Chabod, A., Vervoort, S., 2025. A comprehensive review of Fatigue Crack Growth laws and models. *Procedia Structural Integrity* 75, str. 219–233. DOI: 10.1016/j.prostr.2025.11.024

- [145] Mourad, A.-H.I., Sajith, S., Shitole, S., Almomani, A., Khan, S.H., Elsheikh, A., Alzo'ubi, A.K., 2025. Fatigue life and crack growth prediction of metallic structures: A review. *Structures* 76, 109031. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109031
- [146] Travica, M., 2025. Razvoj metodologije ispitivanja epruveta oblika prstena primenom optičkih sistema. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, doktorska disertacija.
- [147] Trajković, I., Rakin, M., Milošević, M., Mitrović, N., Travica, M., Sedmak, A., Međo, B., 2023. Selective laser sintered Pipe Ring Notched Tension specimens for examination of fracture properties of pipeline materials. *Engineering Fracture Mechanics* 292, 109573. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109573
- [148] Tatić, U., 2017. Analiza uticaja geometrije i biomaterijala na integritet i radni vek rekonstruktivnih ortopedskih pločica. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, doktorska disertacija.
- [149] Liu, B., Lan, S., Li, J., Fang, Q., Ren, Y., He, W., Xie, H., 2024. Digital image correlation in extreme conditions. *Thin-Walled Structures* 205, 112589. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112589
- [150] Hassan, G.M., 2021. Deformation measurement in the presence of discontinuities with digital image correlation: A review. *Optics and Lasers in Engineering* 137, 106394. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106394
- [151] Chen, T.Y.-F., Dang, N.M., Wang, Z.-Y., Chang, L.-W., Ku, W.-Y., Lo, Y.-L., Lin, M.-T., 2021. Use of Digital Image Correlation Method to Measure Bio-Tissue Deformation. *Coatings* 11, 924. DOI: 10.3390/coatings11080924
- [152] Esfahani, N.N., Karimi, S., Nasser, S., Borna, H., Boostani, A.F., Gao, R., Huang, W., Garmestani, H., Liang, S.Y., 2025. Advancements and applications of digital image correlation to characterize residual stress: A review. *Materials Characterization* 228, 115416. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115416
- [153] Blikharsky, Y., Koptika, N., Khmil, R., Selejdak, J., Blikharsky, Z., 2022. Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures. *Applied Sciences* 12, 10157. DOI: 10.3390/app121910157
- [154] Balać, I., Bugarski, B., Čosić, I., Dramićanin, M., Đorđević, D., Filipović, N. et al., 2010. Biomaterijali. Srpska akademija nauka i umetnosti, Institut tehničkih nauka, Društvo za istraživanje materijala, Beograd. ISBN: 978-86-80321-23-3
- [155] Sedmak, S., Čolić, K., Vučetić, F., Milovanović, A., Božić, Ž., 2026. Fatigue life of Ti-6Al-4V hip implants under various load cases. *International Journal of Fatigue* 212, 109801. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2026.109801
- [156] Smoljanić, T., 2025. Uticaj korozije na integritet i vek veštačkog kuka. Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, doktorska disertacija.
- [157] Grbović, A., 2012. Istraživanje zamornog veka nosećih strukturnih elemenata izrađenih od super legura. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, doktorska disertacija.
- [158] Sedmak, A., Grbović, A., 2026. Numerical simulation of fatigue crack growth – review of case studies using smart. *Engineering Fracture Mechanics* 345, 112538. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2026.112538
- [159] Bergstrom, J.S., Bischoff, J.E., 2010. An advanced thermomechanical constitutive model for UHMWPE. *International journal of structural changes in solids* 2(1), str. 31-39.
- [160] Milovanović, A., Golubović, Z., Babinský, T., Šulák, I., Mitrović, A., 2022. Tensile properties of polypropylene additively manufactured by FDM. *Structural Integrity and Life* 22(3), str. 305-308.
- [161] Travica, M., Mitrović, N., Petrović, A., Trajković, I., Milošević, M., Sedmak, A., Berto, F., 2022. Experimental Evaluation of Hoop Stress–Strain State of 3D-Printed Pipe Ring Tensile Specimens. *Metals* 12(10), 1560. DOI: 10.3390/met12101560
- [162] Milošević, N., Sedmak, A., Bakić, G., Lazić, V., Milošević, M., Mladenović, G., Maslarević, A., 2021. Determination of the Actual Stress–Strain Diagram for Undermatching Welded Joint Using DIC and FEM. *Materials* 2021 14(16), 4691. DOI: 10.3390/ma14164691

- [163] Trajković, I., Balać, M., Milošević, M., Međo, B., 2025. Application of the DIC method in determining fracture mechanics parameters on ring-shaped specimens with a sharp notch manufactured using the FDM technique. *Integritet i vek konstrukcija* 25(1), str. 127-133. DOI: 10.69644/ivk-2025-01-0127
- [164] Milošević, M., Trajković, I., Golubović, Z., Ivanov, T., Mladenović, G., Milovanović, A., Mitrović, N., 2022. Development of methodologies for experimental analysis of neck deformations caused by impact forces in martial arts. *Advances in Mechanical Engineering* 14(8), str. 1-14. DOI: 10.1177/16878132221121515
- [165] Fiedler, N., Kleine, T., Oschatz, S., Schultz, S., Grabow, N., Lebahn, K., 2025. Calibration Framework for Modeling Nonlinear Viscoelastic–Plastic Behavior of Bioresorbable Polymers in Finite Element Analysis for Stent Applications. *Polymers* 17(21), 2863. DOI: 10.3390/polym17212863
- [166] Uchida, M., Kamimura, K., Yoshida, T., Kaneko, Y., 2022. Viscoelastic-viscoplastic modeling of epoxy based on transient network theory. *International Journal of Plasticity* 153, 103262. DOI: 10.1016/j.ijplas.2022.103262
- [167] Almomani, A., Deveci, S., Mourad, A.-H.I., Barsoum, I., 2023. Constitutive model calibration for the thermal viscoelastic-viscoplastic behavior of high density polyethylene under monotonic and cyclic loading. *Polymer Testing* 118, 107911. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107911
- [168] Knight, J., Salim, H., Elemam, H., Elbelbisi, A., 2024. Calibration of Thermal Viscoelastic Material Models for the Dynamic Responses of PVB and SG Interlayer Materials. *Polymers* 16(13), 1870. DOI: 10.3390/polym16131870
- [169] Oskui, A.E., Cao, J., Sadeghzade, S., Yuan, H., 2025. Influence of loading mode on the prediction accuracy of nonlinear viscoelastic models for soft adhesives. *International Journal of Solids and Structures* 322, 113595. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2025.113595
- [170] Tirado-Garcia, I., Garcia-Gonzales, D., Garzon-Hernandez, S., Rusinek, A., Robles, G., Martinez-Tarifa, J.M., Arias, A., 2021. Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours. *Composite Structures* 265, 113744. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113744
- [171] Bakhtiari, H., Nikzad, M., Tolouei-Rad, M., 2023. Influence of Three-Dimensional Printing Parameters on Compressive Properties and Surface Smoothness of Polylactic Acid Specimens. *Polymers* 15(18), 3827. DOI: 10.3390/polym15183827
- [172] ASTM E647-5: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010.
- [173] Hutař, P., Ševčík, M., Náhlík, L., Pinter, G., Frank, A., Mitev, I., 2011. A numerical methodology for lifetime estimation of HDPE pressure pipes. *Engineering Fracture Mechanics* 78 (17), str. 3049-3058. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.09.001
- [174] Messiha, M., Wiener, J., Arbeiter, F., Pinter, G., 2024. Data-driven evaluation of the Paris' law parameters in polyethylene pipe grades — Increasing the precision of fracture mechanical lifetime estimation. *Engineering Fracture Mechanics* 311, 110540. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110540

Biografija autora

Алекса Љ. Миловановић рођен је 02.09.1991. у Београду, Република Србија. Завршио је основну школу „Лаза Костић“ на Новом Београду и Десету београдску гимназију „Михајло Пупин“, општи смер, у којој је матурирао 2010. године. Током целокупног основног и средњег школовања остварио је одличан успех.

Основне академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписује 2010. године, које завршава 2013. године са оствареним просеком оцена 9,83 (девет и 83/100). Завршни испит основних студија брани из предмета Основе оптике, оптичких уређаја и помагала на тему „Микросочива произведена на слоју тотхеме, еозина и желатина“, који је рађен у Центру за фотонику, Института за физику у Земуну. Рад је одбрањен са оценом 10, чиме кандидат стиче стручно звање инжењер машинства – инж.маш. (енг., B.Sc.ME). Мастер академске студије уписује на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2013/14., на смеру за биомедицинско инжењерство. У току мастер академских студија остварује просек оцена 9,85 (девет и 85/100). Завршни мастер рад брани из предмета Биоматеријали у медицини и стоматологији, код ментора проф. др Александра Седмака на тему „Нумерички прорачун и анализа дизајна одабране протезе вештачког кука Zimmer VerSys® CRC“, одбрањен у септембру 2016. године са оценом 10. Тиме кандидат стиче стручно звање мастер инжењер машинства – маст. инж. маш. (енг., M.Sc.ME). За остварени успех током основних и мастер академских студија кандидат је био стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја.

Школске 2016/17. године уписује докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду и ступа у радни однос у Иновационом центру Машинског факултета у Београду од 01.01.2017. године, као истраживач-приправник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Од почетка рада у Иновационом центру ангажован је у лабораторијском раду, пројектовању и нумеричком прорачуну биомедицинских конструкција, као и осмишљавању и реализацији патената од националног значаја. Учествоје у реализацији наставе на предмету Биоматеријали у медицини и стоматологији на Мастер академским студијама, од марта 2019. године до данас. Остварио је учешће на бројним домаћим и међународним конференцијама, од којих се истичу ECF22 (Београд, Србија), VECF1 (виртуелна конференција), ECF23 (Фуншал, острво Мадеира, Португал) и ECF24 (Загреб, Хрватска). Добитник је друге награде за младог истраживача на 24. Европској конференцији о механици лома (ECF24), коју заједнички додељују Европско удружење за интегритет конструкција (ESIS) и издавачка кућа Elsevier.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је 11.09.2023. године дало сагласност на Одлуку Наставно-научног већа Машинског факултета о прихватању теме докторске дисертације под називом „Утицај параметара адитивне производње на отпорност на лом ортопедских плочица од PLA полимера“ и одређивању др Александра Седмака, професора емеритуса са Катедре за технологију материјала за ментора. Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета од 08.12.2023. изабран је у звање истраживач-сарадник, у којем се и данас налази.

Од октобра 2019. до марта 2023. био је ангажован на „Horizon 2020“ пројекту Европске Уније под називом „SIRAMM“ (H2020-WIDESPREAD-2018-03, број гранта: 857124). У оквиру овог пројекта остварио је научна усавршавања на Политехничком Универзитету у Темишвару (Румунија), Институту за физику материјала, при Чешкој академији наука, у Брну (Чешка Република) и Универзитету у Парми (Италија), у укупном трајању од шест календарских месеци.

Izjava o autorstvu

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а _____ Алекса Миловановић

број индекса _____ Д06/2016

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај параметара адитивне производње на отпорност на лом ортопедских

плочица од PLA полимера

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 31.08.2026.



Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Алекса Миловановић

Број индекса Д06/2016

Студијски програм докторске академске студије

Наслов рада Утицај параметара адитивне производње на отпорност на лом ортопедских плочица од PLA полимера

Ментор проф. др Александар Седмак, професор емеритус

Потписани/а Алекса Миловановић, мастер инжењер машинства

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 31.08.2026.



Izjava o korišćenju

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај параметара адитивне производње на отпорност на лом

ортопедских плочица од PLA полимера

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 31.08.2026.



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.