

Eksperimentalna i numerička analiza toplinski obrađenih 3D tiskanih uzoraka

Benazić, Masimo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:053380>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**EKSPERIMENTALNA I NUMERIČKA ANALIZA TOPLINSKI
OBRAĐENIH 3D TISKANIH UZORAKA**

Rijeka, srpanj 2024.

Masimo Benazić,

0069080797

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**EKSPERIMENTALNA I NUMERIČKA ANALIZA TOPLINSKI
OBRAĐENIH 3D TISKANIH UZORAKA**

Mentor: Prof. dr. sc. Marino Brčić

Rijeka, srpanj 2024.

Masimo Benazić,

0069080797

Rijeka, 15. ožujka 2024.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**
Predmet: **Metoda konačnih elemenata čvrstih tijela**
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Masimo Benazić (0069080797)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva
Modul: Računarska mehanika i inženjerstvo

Zadatak: **Eksperimentalna i numerička analiza toplinski obrađenih 3D tiskanih uzoraka**


Opis zadatka:

Tehnologijom 3D ispisa pripremiti uzorke različitih polimernih materijala, sa različitim uzorcima ispune. Ispitati utjecaj naknadne toplinske obrade uzoraka na mehanička svojstva, posebice u uvjetima niskocikličkog zamora i kratkotrajnog puzanja. Uspostaviti jednadžbe puzanja za dane uzorke, pogodne za modeliranje uporabom metode konačnih elemenata.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2024.

Mentor:



Prof. dr. sc. Marino Brčić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

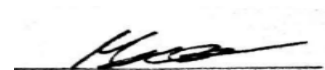
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da sam, sukladno članku o Završnom radu Tehničkog fakulteta u Rijeci samostalno izradio završni rad „Eksperimentalna i numerička analiza toplinski obrađenih 3D tiskanih uzoraka“ uz pomoć navedene literature te da sam samostalni autor svih njegovih dijelova.

Rijeka, srpanj 2024.

Masimo Benazić,
0069080797



ZAHVALA

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci i pomoći tokom cjelokupnog studija.

Također se zahvaljujem i mentoru prof. dr. sc. Marinu Brčiću za stručno vođenje kroz izradu ovoga rada.

Sadržaj

1. UVOD	3
2. OSNOVE 3D TISKANJA	4
2.1. Pregled materijala korištenih u 3D tiskanju	4
2.4.1. Plastike	4
2.4.2. Smole.....	5
2.4.3. Metali.....	7
2.4.1. Kompozitni materijali.....	7
2.2. 3D pisaci	7
3. UVOD U METODU KONAČNIH ELEMENATA	12
4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA	21
4.1. Vlačni test	24
4.2. Nisko-ciklički zamor	41
4.3. Puzanje	49
5. NUMERIČKA ANALIZA	65
4.1. Postupak numeričke analize u FEMAP-u	65
6. ZAKLJUČAK	78
7. LITERATURA	79
8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLJESKOM JEZIKU	80

1. UVOD

Razvojem tehnologije razvija se i potreba za sve raznovrsnijim materijalima različitih svojstava i karakteristika. Polimerni materijali svoju primjenu nalaze u mnoštvu različitih niša kao što su automobilska, vojna, farmaceutska, prehrambena industrija, proizvodnja električnih uređaja i druge. Pod pojmom polimeri podrazumijeva se široki spektar materijala kao što su plastike, gume, polimerna vlakna, ljepila, razni premazi itd. Jedna od niša koja je usko vezana uz polimerne materijale ili točnije, plastike je 3D tiskanje. Kroz ovaj rad bit će opisane metode 3D tiskanja te komponente koje se koriste na uređajima različitih preciznosti i kvaliteta. Bit će navedeni i opisani materijali koji se koriste, a od kojih će naglasak biti na dvije vrste plastike, polimeri PLA (polilaktična kiselina) i ABS (akronitril butadien stiren).

Ekperimentalno će se ispitati nekoliko vrsta 3D tiskanih uzoraka. Bazni set uzoraka neće biti daljnje obrađivan nakon tiskanja. Ostali setovi uzoraka bit će termički obrađeni na različitim temperaturama, podvrgnuti vlačnom testu čvrstoće, testu nisko cikličkog zamora te testu kratkotrajnog puzanja. Ispitivati će se mehaničke karakteristike svih setova uzoraka.

Osim eksperimentalne analize 3D tiskanih uzoraka provest će se i numerička analiza istih. Za postupak numeričke analize koristit će se softverski program FEMAP koji za proračun koristi metodu konačnih elemenata čvrstih tijela. Kao osnovu za provođenje numeričke analize koristit će se rezultate dobivene eksperimentalnom analizom.

2. OSNOVE 3D TISKANJA

2.1. Pregled materijala korištenih u 3D tiskanju

Postoji široki raspon materijala koji se koriste u 3D tiskanju, od kojih je svaki prikladan za različite primjene i tehnologije tiskanja.

2.4.1. Plastike

Postoji nekoliko vrsta plastika koje se koriste prilikom 3D tiskanja, od kojih svaka ima specifična svojstva koja odgovaraju određenoj primjeni.

Jedna od najčešće korištenih vrsta je PLA ili polilaktična kiselina, koja je zbog svoje jednostavnosti tiskanja pogodna za stvaranje osnovnih oblika i hobi upotrebu. Potrebna temperatura pisača pri korištenju ove vrste plastike iznosi između 200 °C i 230 °C, dok je potrebna temperatura radne površine od 60 °C do 80 °C. Osim niske temperature taljenja PLA je biorazgradiva, netoksična, ima niske emisije mirisa i dobar omjer čvrstoće i krutosti. Vlačna čvrstoća PLA plastike obično se kreće između 48 MP-a (mega paskala) i 60 MP-a, ovisno o specifičnoj formulaciji i uvjetima proizvodnje.

ABS (Akrilonitril butadien stiren) je robusnija vrsta plastike u odnosu na PLA. Otpornija je na udarce, abraziju, visoke temperature i kemikalije. Temperatura tiskanja iznosi 230 °C - 270 °C, dok površina radne ploče mora biti zagrijana na 80 °C - 120 °C. Također, prilikom korištenja ovoga materijala otpuštaju se toksične pare, pa pisač mora imati svoje vlastito kućište kako bi se izbjeglo otpuštanje pare u prostoriju. Vlačna čvrstoća ABS-a obično se kreće između 40 MP-a i 60 MP-a, ovisno o specifičnoj formulaciji, kvaliteti materijala i uvjetima proizvodnje.

PETG (Polietilen tereftalat glikol): Kombinira prednosti PLA i ABS-a, sa poboljšanom fleksibilnošću i izdržljivošću čineći tako je otpornom na udarce, lomove i abraziju. Ovo svojstvo čini PETG pogodnim za izradu dijelova koji zahtijevaju izdržljivost i otpornost na savijanje. Osim na mehanička oštećenja, otporna je na mnoge kemikalije, uključujući otapala, kiseline i lužine, što je čini pogodnom za razne industrijske aplikacije. Temperatura taljenja PETG plastike obično se kreće između 220 °C i 250 °C, što je slično temperaturi taljenja ABS plastike. No, za razliku od ABS plastike, PETG obično zahtijeva nižu temperaturu radne ploče (70 °C - 80 °C), što olakšava tiskanje i smanjuje rizik od izvijanja tiskanih dijelova. Vlačna čvrstoća PETG-a obično se kreće između 50 MP-a i 70 MP-a, ovisno o specifičnoj formulaciji, kvaliteti materijala i uvjetima proizvodnje.

Najlon plastika je poznata po svojoj visokoj čvrstoći i izdržljivosti, što je čini pogodnom za proizvodnju funkcionalnih prototipova i dijelova za krajnju upotrebu. Relativno je fleksibilna, što joj omogućuje da se savija bez pucanja ili lomljenja. Ovo svojstvo čini najlon pogodnim za izradu dijelova koji zahtijevaju malo fleksibilnosti ili savijanja. Osim umjerene fleksibilnosti karakteriziraju ga još i otpornost na habanje, otpornost na kemikalije (koje uključuju otapala, kiseline i lužine) te niska apsorpcija vlage. Temperatura tališta najlonske plastike obično se kreće između 250 °C i 270 °C, što je nešto više od temperature taljenja PLA i PETG plastike. Vlačna čvrstoća najlona može varirati ovisno o specifičnoj formulaciji i uvjetima proizvodnje, ali općenito se kreće između 50 MP-a i 80 MP-a.

TPU (Termoplastični poliuretan) plastika je poznata po svojoj visokoj fleksibilnosti i elastičnosti, što je čini idealnom za izradu dijelova koji zahtijevaju mogućnost savijanja, istezanja i vraćanja u prvobitni oblik bez trajnih plastičnih deformacija. TPU plastika ima visoku otpornost na udarce, abraziju, razne kemikalije i vlagu. Temperatura tališta TPU plastike obično se kreće između 190 °C i 230 °C, ovisno o specifičnoj formulaciji. To znači da je TPU relativno jednostavan za tiskanje na većini 3D pisaa. Vlačna čvrstoća TPU obično se kreće između 30 MP-a i 60 MP-a, ovisno o specifičnoj formulaciji, kvaliteti materijala i uvjetima proizvodnje. Visoka fleksibilnost i elastičnost TPU plastike rezultira nešto nižim vlačnim čvrstoćama u usporedbi s drugim termoplastičnim materijalima poput ABS-a ili najlona.

2.4.2. Smole

Foto polimerne smole koriste se u tehnologijama 3D tiskanja poput stereolitografije (SLA), DLP polimerizacije i tehnologiji tekućih kristala LCD. Njihova svojstva uvelike ovise o specifičnoj formulaciji smole. Foto polimerne smole reagiraju na svjetlost odgovarajuće valne duljine, što omogućava brzo stvrdnjavanje slojeva tijekom 3D tiskanja. To rezultira relativno brzim vremenom tiskanja u usporedbi s drugim tehnologijama. Osim same brzine tiskanja ove smole omogućuju visoku preciznost, detaljnost i razlučivost u tiskanim dijelovima. Mogu imati različite mehaničke, optičke i kemijske karakteristike, prilagođene specifičnim zahtjevima aplikacije. Vlačna čvrstoća foto polimernih smola može značajno varirati ovisno o različitim čimbenicima kao što su specifična formulacija smole, postupak tiskanja, uvjeti stvrdnjavanja, i slično. Općenito, vlačna čvrstoća foto polimernih smola može se kretati u rasponu od oko 20 MP-a do 80 MP-a.

Termoplastične smole koriste se u tehnologijama taljenja i polaganja (FDM) i selektivnog laserskog sinteriranja (SLS). Smola u obliku filameta se topi i taloži sloj po sloj, dok se u SLS

tehnologiji termoplastična smola u prahu selektivno sinterira laserom. Termoplastične smole imaju različita svojstva ovisno o njihovoj formulaciji. Ove smole se omekšavaju i tope kada se zagriju, što ih čini podložnima oblikovanju i obradi. Nakon hlađenja, ponovnim zagrijavanjem mogu se ponovno omekšati i oblikovati. Osim elastičnosti, otpornosti na habanje i otpornosti na kemikalije ove smole imaju i dobru termičku stabilnost pri visokim temperaturama. Njihova vlačna čvrstoća može se kretati u širokom rasponu, obično između 20 MP-a i 80 MP-a ili čak više za neke posebno čvrste formulacije. Važno je napomenuti da se vlačna čvrstoća može razlikovati između različitih tipova termoplastičnih smola. Također je važno napomenuti kako postupci proizvodnje i obrade, uključujući postupke kao što su ekstruzija, brizganje ili laminiranje, mogu utjecati na konačnu vlačnu čvrstoću termoplastičnih smola.

Metalne smole u prahu koriste se u tehnologijama poput selektivnog laserskog taljenja (SLM) i selektivnog laserskog sinteriranja (SLS). Ove smole sastoje se od finih čestica metala, često legura poput aluminijske, čelika, titana, nikla, ili drugih metala. Karakteriziraju ih izvrsna mehanička čvrstoća (visoka nosivost i izdržljivost), dobra toplinska vodljivost, otpornost na habanje i koroziju. Nakon tiskanja, metalni dijelovi izrađeni od ovih smola obično zahtijevaju dodatne postupke obrade kao što su toplinsko lijevanje, brušenje, poliranje ili neka druga završna obrada kako bi se postigle konačne dimenzije i površinska svojstva. Vlačna čvrstoća metalne smole u prahu može varirati ovisno o različitim čimbenicima kao što su vrsta metala, njegova formulacija, postupak proizvodnje, parametri tiskanja, te dodatni postupci naknadne obrade. Općenito, vlačna čvrstoća metalne smole u prahu kreće se od oko 200 MP-a do 1000 MP-a ili čak više za neke posebno jake legure.

Keramičke smole koriste se u tehnologijama 3D tiskanja poput stereolitografije (SLA) i DLP polimerizacije. Karakterizira ih visoka čvrstoća, toplinska i kemijska otpornost te visoka tvrdoća. Tvrdoća keramičkih smola prema Vickersovoj skali tvrdoće obično se kreće između 50 HV (Vickersova tvrdoća) do 1000 HV, ovisno o specifičnoj formulaciji smole, vrsti keramičkog materijala i postupku proizvodnje. Keramičke smole imaju dobra dielektrična svojstva, što ih čini pogodnima za primjene u elektroničkoj industriji gdje je potrebna izolacija od električnih struja. Nakon tiskanja, keramički dijelovi izrađeni od keramičkih smola obično zahtijevaju dodatne postupke obrade kao što su pečenje ili sinteriranje kako bi se postigle konačne dimenzije i mehanička svojstva.

Biološke smole koriste se u medicinskoj industriji i biotehnologiji. Imaju svojstva koja ih čine pogodnima za različite primjene kao što su izrada medicinskih implantata, bio-tiskanje i

biološke modele. Ove smole su obično dizajnirane tako da budu bio kompatibilne, što znači da ne izazivaju štetne reakcije u tkivu ili organizmu. Često su dizajnirane za upotrebu u biotiskanju, što omogućuje izradu trodimenzionalnih bioloških struktura poput tkiva i organa. Biološke smole mogu poprimiti različite funkcije dodavanjem različitih bioloških molekula poput proteina, rastućih faktora ili lijekova, kako bi se potaknule određene biološke procese kao što su regeneracija tkiva ili inhibicija upale.

2.4.3. Metali

U 3D tiskanju metala koriste se različiti metali i metalne legure ovisno o zahtjevima aplikacije i tehnologiji tiskanja. Neki od metala koji se često koriste uključuju: aluminij, čelik, nehrđajući čelik, titanske legure, nikal, kobalt, bakar i druge.

2.4.1. Kompozitni materijali

U praktičnoj primjeni nerijetko se koriste kompozitni materijali kao što su polimeri s ojačanjem od ugljičnih vlakana, koji kombiniraju čvrstoću i lagane karakteristike ugljičnih vlakana s raznolikošću polimera. Bilo koja od prethodno navedenih vrsta plastike može imati primjese ugljičnih vlakana, što je čini mnogo čvršćom i otpornijom na mehanička opterećenja.

Osim polimernih kompozitnih matrica još postoje metalne i keramičke.

2.2. 3D pisači

3D pisači su napredni proizvodni strojevi koji mogu proizvesti trodimenzionalne objekte iz digitalnog dizajna. Oni rade na principu slojevitog dodavanja materijala „sloj po sloj“ sve dok se ne oblikuje željeni objekt.

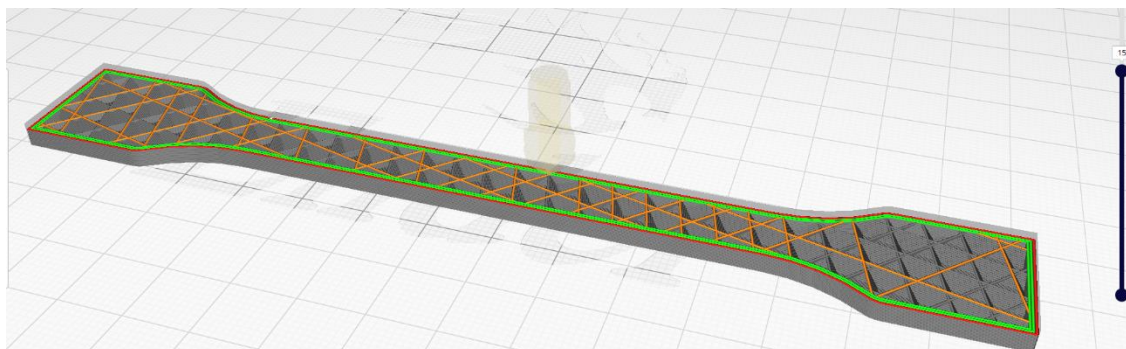
Najrasprostranjenija vrsta pisača su FDM 3D pisači. To su strojevi koji koriste polimerni materijal u obliku filameta. U istu skupinu pisača spadaju i fused granulate modeling (FGM) pisači, koji se od FDM pisača razlikuju po tome što umjesto filameta koriste granule polimera koje se tope unutar ekstrudera. Ove granule često su jeftinije od filamenata, ali se češće koriste u profesionalnom 3D tiskanju.

FDM, kao i svaka metoda 3D tiskanja, započinje sa digitalnim modelom koji se zatim pomoću za to predviđenog softvera, prevodi u upute koje 3D pisač treba slijediti (G-kod).

```
M82 ;absolute extrusion mode
; Ender 3 Custom Start G-code
G92 E0 ; Reset Extruder
G28 ; Home all axes
G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed
G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move to start position
G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15 ; Draw the first line
G1 X0.4 Y200.0 Z0.3 F5000.0 ; Move to side a little
G1 X0.4 Y20 Z0.3 F1500.0 E30 ; Draw the second line
G92 E0 ; Reset Extruder
G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed
G1 X5 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move over to prevent blob squish
G92 E0
G92 E0
G1 F2700 E-5
;LAYER_COUNT:20
;LAYER:0
M107|
;MESH:tensile_3D_original.stl
G0 F6000 X84.899 Y120.65 Z0.2
;TYPE:WALL-INNER
G1 F2700 E0
G1 F1200 X81.074 Y120.936 E0.12758
G1 X77.3 Y121.794 E0.2563
```

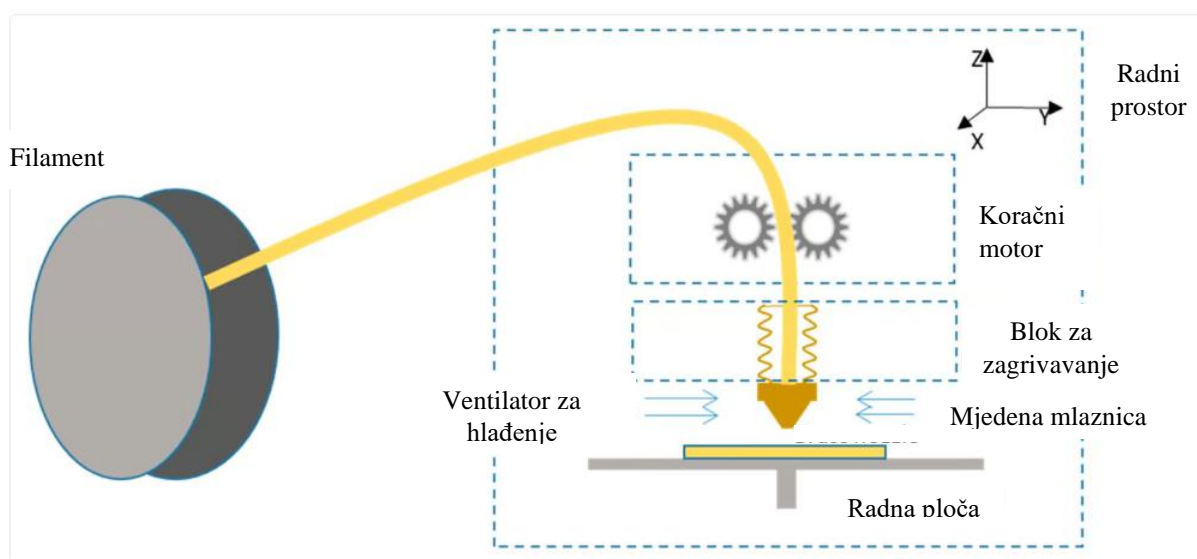
Slika 2.1. Početni dio G-koda za tiskanje testne epruvete

Kod FDM 3D pisača s filament materijalom, rola plastičnog filameta (ili nekoliko rola istovremeno) dovodi se do mlaznice pisača u ekstruderskoj glavi. Jedna ili više mlaznica pisača zagrijavaju se na željenu temperaturu, što uzrokuje omekšavanje filameta kako bi se pri izvlačenju (ekstruziji) uzastopni slojevi spojili i stvorili homogeni čvrsti objekt. Kada se umjesto filameta koriste plastične granule, one se dovode iz spremnika u ekstruder, a zatim tope kao filament. Ostatak postupka je isti kao i kod FDM pisača. Pisač polaže prvi sloj tako da pomjera ekstrudersku glavu duž određenih koordinata u X-Y ravnini istovremeno istiskujući filament na podlogu. Ekstruderska glava se zatim podiže na sljedeću visinu Z ravnine (ili se radna površina spušta). Ovaj proces polaganja slojeva se ponavlja, polažući sloj po sloj sve dok se objekt potpuno ne oblikuje. Samo pomicanje radne ploče i ekstruderske glave odvija se pomoću koračnih motora. To su električni motori koji se okreću u nizu malih kutnih koraka, umjesto kontinuirano. Oni uz pomoć remenskog prijenosa reguliraju pomake po X, Y i Z osi te uz pomoć zupčanika brzinu dovođenja filameta u ekstrudersku glavu.



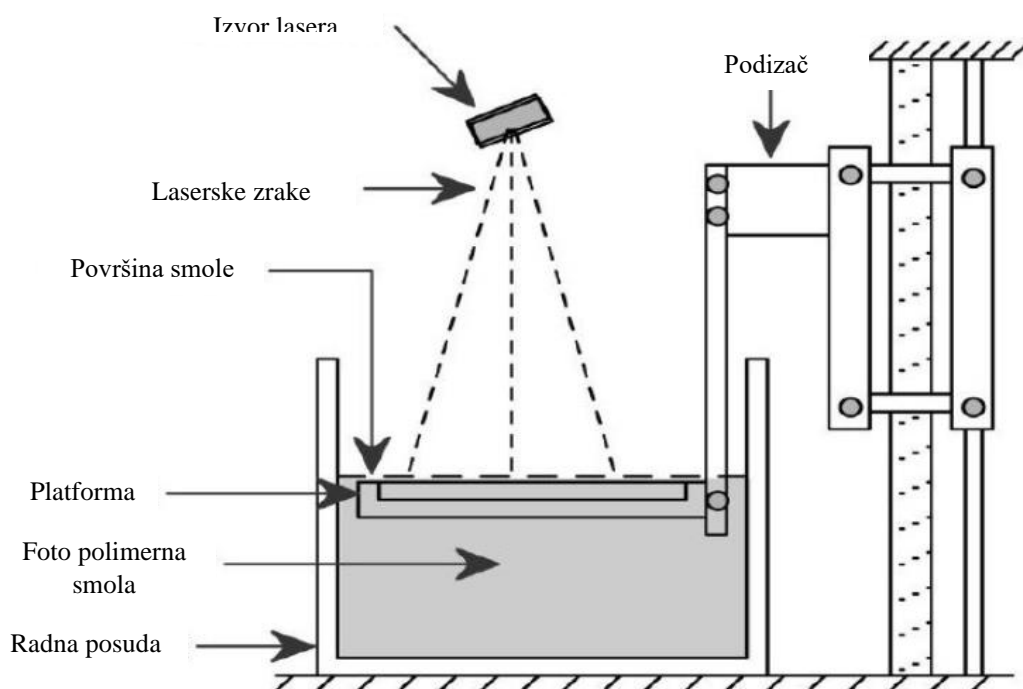
Slika 2.2. Prikaz izrade jednog tiskanog sloja testne epruvete

Ovisno o geometriji objekta, ponekad je potrebno dodati potporne strukture na koje se model oslanja tijekom tiskanja, na primjer, ako model ima strme nadstrešne dijelove. Ove potporne strukture se uklanjaju nakon tiskanja. Materijal potpornih struktura se ponekad može otopiti u vodi ili drugoj otopini kako bi se olakšalo i ubrzalo uklanjanje.



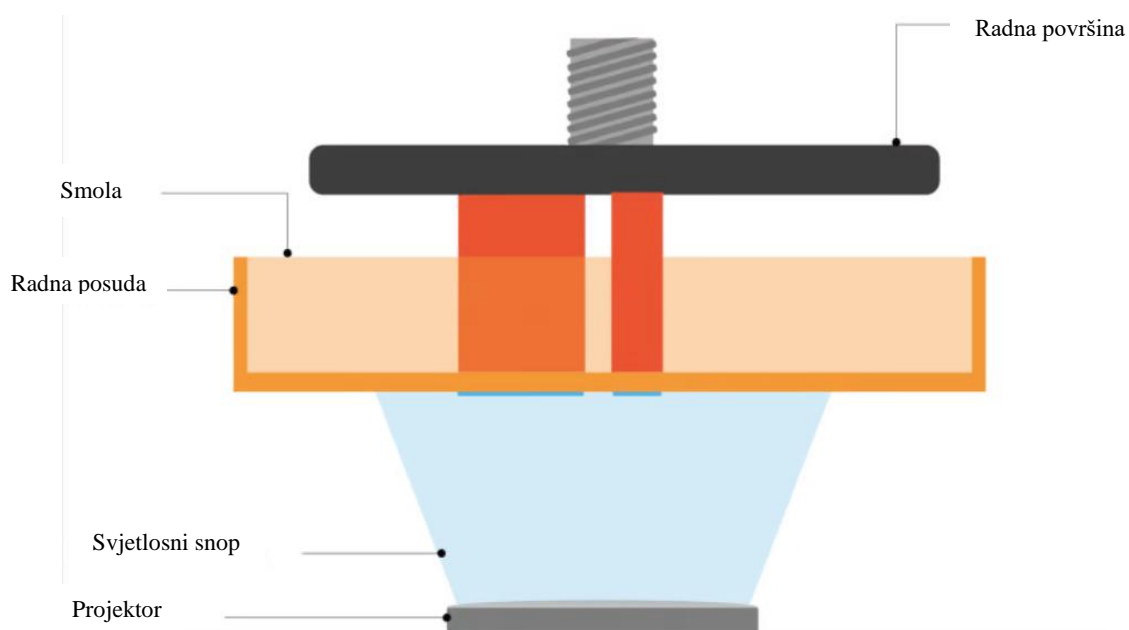
Slika 2.3. Shema rada FDM 3D pisača [2]

Osim FDM pisača poznati su i 3D pisači koji koriste metodu stereolitografije (SLA). SLA pisači koriste kadu s tekućim foto polimernim smolama koje se stvrdnjavaju sloj po sloj uz pomoć UV lasera ili drugog svjetlosnog izvora. Platforma za izgradnju postupno se kreće prema gore ili dolje dok se svaki sloj stvrdnjava.



Slika 2.4. Prikaz SLA procesa tiskanja [3]

Pisači koji rade na principu digitalne svjetlosne obrade (DSO), slično kao SLA, koriste kadu s tekućim foto polimernim smolama. Međutim, umjesto lasera, koriste digitalni svjetlosni projektor koji odjednom osvjetljava cijeli sloj objekta, stvrđavajući smolu.



Slika 2.5. Shematski prikaz DSO 3D pisača [4]

SLS 3D pisači rade na principu selektivnog laserskog sinteriranja (SLS). Ovi pisači koriste visokoenergetski laser za selektivno spajanje praha, obično plastike, metala ili keramike, sloj po sloj. Neiskorišteni prah djeluje kao potporno sredstvo i može se ponovno koristiti za sljedeće ispisivanje.

SLT (selektivno lasersko taljenje) pisači koriste visokoenergetski laser za potpuno taljenje i spajanje metalnih prahova sloj po sloj, rezultirajući potpuno gustim metalnim dijelovima. Ovaj postupak se često koristi u aditivnoj proizvodnji metala za aero-svemirske, automobilske i medicinske primjene.

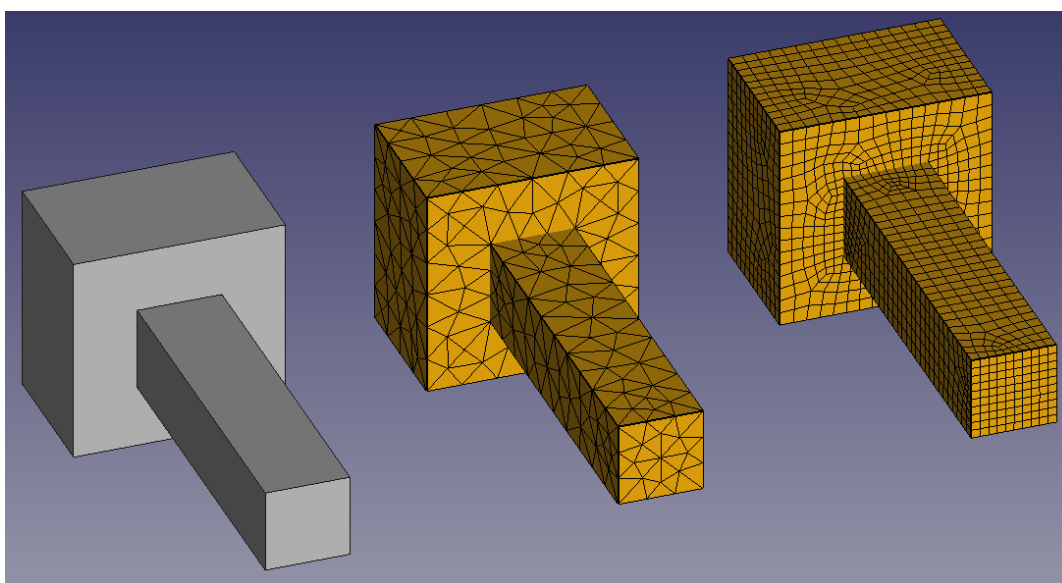
TES ili taljenje elektronskim snopom je još jedna metalna tehnologija 3D ispisa, koja koristi elektronski snop za taljenje i spajanje metalnog praha u vakuumskom okruženju. Često se koristi za proizvodnju složenih metalnih dijelova, posebno u aero-svemirskoj i medicinskoj industriji.

Pisači koji rade na principu metode lijepljenja veziva (MLV) koriste glavu za ispisivanje kako bi selektivno nanijeli tekuće vezivo na sloj praha, povezujući čestice zajedno kako bi formirali svaki sloj. Nakon ispisivanja, objekt se uklanja iz sloja praha i prolazi kroz postupak naknadne obrade kako bi se uklonilo višak praha i poboljšala čvrstoća.

3. UVOD U METODU KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata (MKE) predstavlja temelj u području numeričke analize, pružajući inženjerima i znanstvenicima snažan alat za rješavanje složenih inženjerskih i matematičkih problema. Sa svojim korijenima koji sežu u 1940-e i 1950-e godine, MKE se razvila u svestranu i široko korištenu tehniku u različitim disciplinama, uključujući konstrukcijsku mehaniku, prijenos topline, dinamiku fluida, elektromagnetizam i druge. MKE pruža sustavan pristup diskretizaciji složenih fizikalnih domena na manje, jednostavnije elemente, omogućujući aproksimaciju ponašanja unutar svakog elementa korištenjem matematičkih funkcija.

U ovom radu će na 3D tiskanim uzorcima biti provedena statička analiza čiji je cilj izračunavanje napreznja, deformacija i pomaka. Ove nepoznanice nazivaju se još i polja varijabli. U ispitivanom tijelu se stvaraju unutarnja napreznja kako bi se zadržala ravnoteža u bilo kojem volumenu unutar tijela, pa je moguće upotrijebiti ovaj koncept kako bi se dobili iznosi varijabli. Njih je relativno jednostavno izračunati za obični gredni element. Koristeći ravnotežne jednadžbe možemo izračunati moment savijanja i posmičnu silu duž grede, pa iz tih podataka normalna i smična napreznja u gredi. No ako se radi o dvodimenzionalnom ili trodimenzionalnom tijelu takav postupak nije moguć. MKE ovom problemu pristupa tako da dijeli tijelo na veliki broj manjih elemenata koji su međusobno povezani u čvorovima (*eng. nodes*).



Slika 3.1. Prikaz mrežnih elemenata i čvorova [5]

Taj proces se naziva diskretizacija, a spoj čvorova i elemenata se naziva mrežom (*eng. mesh*). Za diskretizaciju domene moguće je koristiti nekoliko različitih vrsta elemenata. Površinski elementi su dvodimenzionalni (2D) elementi koji se koriste za opisivanje tankih tijela ili površina. Elementi mogu biti trokutasti ili četverokutni, pri čemu je važno naglasiti da su trokutasti elementi bolji za modeliranje nepravilnih oblika, dok četverokutni elementi daju bolje rezultate. Volumni (3D) elementi se koriste za trodimenzionalna tijela, a osim kojih još postoje i linijski elementi. Izbor vrste elemenata ovisi o kompleksnosti ili željenom pojednostavljenju problema. Linijski element, na primjer, može biti štap koji nosi samo aksijalnu silu ili greda koja može biti opterećena aksijalno, na savijanje, smično i torzijski.

Za potrebe analize naprezanja primarna varijabla koju želimo izračunati je pomak svakog pojedinog čvora. Ukoliko nam je poznato kako se tijelo pomiče pod opterećenjem, vrlo lako možemo izračunati sekundarna rješenja kao što su naprezanje i deformacija. Za svaki element možemo definirati vektor $\{u\}$ koji sadrži sve moguće pomake za čvorove elementa, uključujući rotacije. Ako analiziramo dvodimenzionalni slučaj s grednim elementima svaki čvor može translirati duž X i Y osi, te rotirati oko Z osi pa se vektor $\{u\}$ u ovom slučaju može zapisati kao:

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Svaki od ovih pomaka naziva se stupnjem slobode gibanja. Gredni element s 2 čvora ima tri stupnja slobode za svaki čvor odnosno šest stupnjeva slobode sveukupno, što se u trodimenzionalnom slučaju povećava na šest stupnjeva slobode za svaki čvor, odnosno dvanaest stupnjeva slobode sveukupno, pa se vektor pomaka može zapisati kako je prikazano u jednadžbi 3.2. Analogno tome, dvodimenzionalni četverokutni element sa četiri čvora ima dvanaest stupnjeva slobode a njegov vektor pomaka dan je u jednadžbi 3.3. Trodimenzionalni heksaedarski elementi imaju samo tri translacijska stupnja slobode (u smjerovima X, Y i Z osi) te osam čvorova koji nemaju mogućnost rotacije. Rotacija je u ovom slučaju obuhvaćena translacijom čvorova. Vektor pomaka trodimenzionalnog heksaedra dan je jednadžbom 3.4.

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ \theta_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ \theta_4 \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \\ u_5 \\ v_5 \\ w_5 \\ u_6 \\ v_6 \\ w_6 \\ u_7 \\ v_7 \\ w_7 \\ u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Kako bi bilo moguće izračunati pomake za svaki čvor unutar mreže potrebno je poznavati krutost materijala koja je dana u obliku matrice krutosti $[k]$. Vektor nodalnih sila i momenata moguće je zapisati kao umnožak matrice krutosti elementa $[k]$ i vektora pomaka čvorova elementa $\{u\}$:

$$\{f\} = [k]\{u\} \quad (3.5)$$

Za dvodimenzionalni element sa šest stupnjeva slobode moguće je raspisati jednadžbu 3.5 na slijedeći način:

$$\begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ m_2 \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ m_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

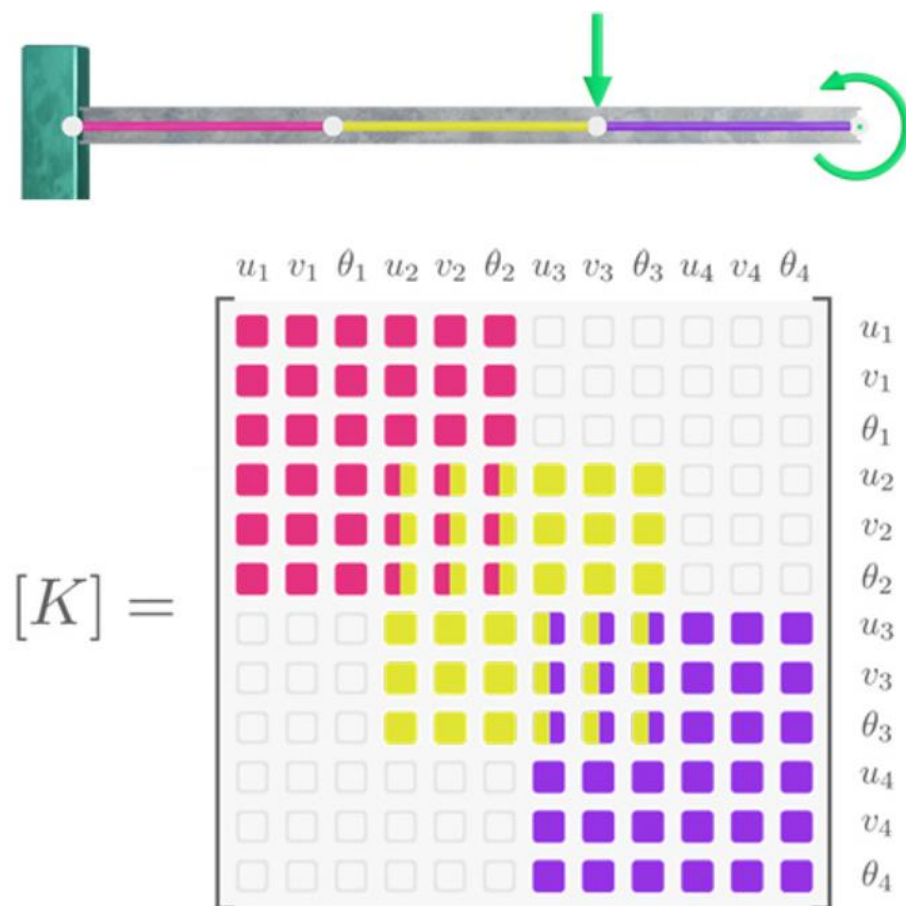
Matrica krutosti $[k]$ definira koliko će se svaki čvor elementa pomaknuti pod utjecajem skupa sila i momenata koje djeluju na taj čvor. Matrica je kvadratna s brojem stupaca i brojem redaka jednakim broju stupnjeva slobode elementa. Za slučaj dvodimenzionalne grede matrica krutosti poprima slijedeći oblik:

$$\begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ m_2 \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ m_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{-AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Jednadžbu 3.7 moguće je raspisati kao sustav od šest linearnih jednadžbi čijim rješavanjem možemo dobiti pomake čvorova mreže.

Korištenjem ovoga principa za pojedini element moguće je konstruirati globalnu matricu krutosti $[K]$, koja definira ponašanje čitave strukture kad se ona podvrgne opterećenju. Kao i matrica krutosti pojedinog elementa, globalna matrica krutosti je kvadratna matrica koja ima

onoliko redaka i stupaca koliko ima stupnjeva slobode u cijelom sustavu. Matrice pojedinih elemenata sustava se sastavljaju i zajedno čine globalnu matricu krutosti.



Slika 3.2. Prikaz matrice krutosti $[K]$ sastavljene od triju matrica krutosti elemenata uzevši u obzir njihovu povezanost [6]

Na slici 3.2 prikazana je greda s uklještenjem na jednoj strani, diskretizirana sa tri elementa i ilustracija njezine globalne matrice krutosti sastavljene od matrica krutosti svakog pojedinog elementa. Polja matrice koja se preklapaju, odnosno polja koja su na slici 3.2 prikazana u dvije boje predstavljaju čvorove koji se nalaze između elemenata. U tim poljima se pomaci dvaju elemenata koji dijele čvor zbrajaju kako bi se dobila točna vrijednost.

Nakon kreiranja globalne matrice krutosti potrebno je riješiti jednadžbu 3.8 kako bi se dobile vrijednosti pomaka čvorova mreže.

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (3.8)$$

Kako bi to bilo moguće potrebno je definirati vanjska opterećenja sustava i rubne uvjete, koji se zapravo sastoje od poznatih pomaka u određenim čvorovima. Najčešće se rubni uvjeti uspostave uslijed ograničavanja pomaka određenih čvorova strukture.

Iako je uz poznate rubne uvjete i vanjska opterećenja moguće dobiti točne vrijednosti vektora pomaka, moderni rješavači iterativno aproksimiraju vektor pomaka dok se ne dobiju zadovoljavajući rezultati. Razlog tome je mala popunjenost globalne matrice krutosti. Iako je matrica velikih dimenzija, većina koeficijenata unutar matrice jednaka je nuli, ali ih računalo tretira kao svaki drugi koeficijent, pa dolazi do nepotrebnog trošenja računalnih resursa.

Nakon izračunavanja čvornih pomaka moguće je izračunati deformacije, a preko njih i naprezanja na cijeloj nodalnoj mreži.

Postoji nekoliko metoda prema kojima se određuju vrijednosti koeficijenata matrice krutosti elementa i sve se temelje na principu ravnotežnog stanja unutar elementa. Najvažnija od njih je direktna metoda kojom se iz ravnotežnih jednadžbi, koje definiraju ponašanje elementa, dobiva matrica krutosti elementa. Savijanje grednih elemenata moguće je opisati slijedećom jednadžbom:

$$EI \frac{d^4 v(x)}{dx^4} = q(x) \quad (3.9)$$

Rješavanjem jednadžbe 3.9 dobiva se matrica krutosti za dvodimenzionalni gredni element. Ove jednadžbe koje opisuju ponašanje elemenata su najčešće diferencijalne jednadžbe koje zajedno s rubnim uvjetima daju točno rješenje problema. Mana ovoga pristupa je što ga se može efektivno primijeniti samo na jednostavnije elemente. Za ostale potrebe problem je moguće modelirati pomoću jednadžbi u integralnom obliku, umjesto direktnog rješavanja diferencijalnih jednadžbi. Ove jednadžbe daju aproksimirana rješenja na ravnotežne jednadžbe, ali su manje zahtjevne za rješavanje.

Jedna vrsta integralnih jednadžbi temelji se na varijacijskim načelima kao što je princip minimalne potencijalne energije, koji nalaže da je konfiguracija pomaka koja zadovoljava uvjete ravnoteže ona koja minimizira ukupnu potencijalnu energiju. Potencijalna energija Π je suma energije naprezanja U_e i potencijalne energije vanjskih opterećenja V .

$$\Pi = U_e + V \quad (3.10)$$

Još jedna od metoda koja se koristi je Galerkinova metoda u kojoj se funkcija koja zamjenjuje diferencijalnu jednadžbu aproksimira kao suma više pretpostavljenih probnih funkcija N_i od kojih svaka ima nepoznate koeficijente c_i .

$$y^*(x) = \sum_{i=1}^n c_i N_i(x) \quad (3.11)$$

Iz ove jednadžbe slijedi da je:

$$y^*(x) = c_1 N_1(x) + c_2 N_2(x) + \dots + c_n N_n(x) \quad (3.12)$$

Ovako aproksimirano rješenje se uvrštava u diferencijalnu jednadžbu $D(y^*(x), x)$, iz čega je moguće dobiti jednadžbu greške koja se naziva rezidual .

$$R(x) = D(y^*(x), x) \quad (3.13)$$

U slučaju da je rezidual $R(x)$ jednak nuli, $y^*(x)$ predstavlja točno rješenje. Ukoliko svaku probnu funkciju pomnožimo s rezidualom te izjednačimo integral tog umnoška s nulom, možemo izračunati nepoznate koeficijente i na taj način smanjiti grešku.

$$\int_a^b N_1(x) R(x) dx = 0 \quad (3.14)$$

$$\int_a^b N_2(x) R(x) dx = 0 \quad (3.15)$$

$$\int_a^b N_n(x) R(x) dx = 0 \quad (3.16)$$

Ovime dobivamo aproksimirano rješenje diferencijalne jednadžbe što je šire primjenjiv pristup od principa minimalne potencijalne energije, no u slučaju analize naprezanja obje metode daju isti rezultat. Neovisno koju metodu koristimo, dobijemo matricu krutosti željenog elementa. Kako bi ove metode bile primjenjive, moramo moći opisati kako se pomaci i ostale varijable ponašaju i unutar elementa, a ne samo u njegovim čvorovima. Kao rješenje ovoga problema za svaki element se definira funkcija koja računa vrijednosti unutar elementa interpolirajući vrijednosti u čvorovima. Ako za primjer uzmemo kvadratični element s četiri rubna čvora v_1, v_2, v_3 i v_4 možemo postaviti sljedeću funkciju:

$$v(x, y) = f(v_1, v_2, v_3, v_4) \quad (3.17)$$

Iz čega slijedi:

$$v(x, y) = N_1(x, y)v_1 + N_2(x, y)v_2 + N_3(x, y)v_3 + N_4(x, y)v_4 \quad (3.18)$$

Pri čemu su $N_1(x, y)$, $N_2(x, y)$, $N_3(x, y)$ i $N_4(x, y)$ funkcije oblika koje se temelje na pretpostavci. Najčešće se za funkcije oblika odabere polinom zbog svoje relativne jednostavnosti i dovoljne točnosti.

$$N_1(x, y) = \frac{1}{4}(1 - r)(1 - s) \quad (3.19)$$

$$N_2(x, y) = \frac{1}{4}(1 + r)(1 - s) \quad (3.20)$$

$$N_3(x, y) = \frac{1}{4}(1 + r)(1 + s) \quad (3.21)$$

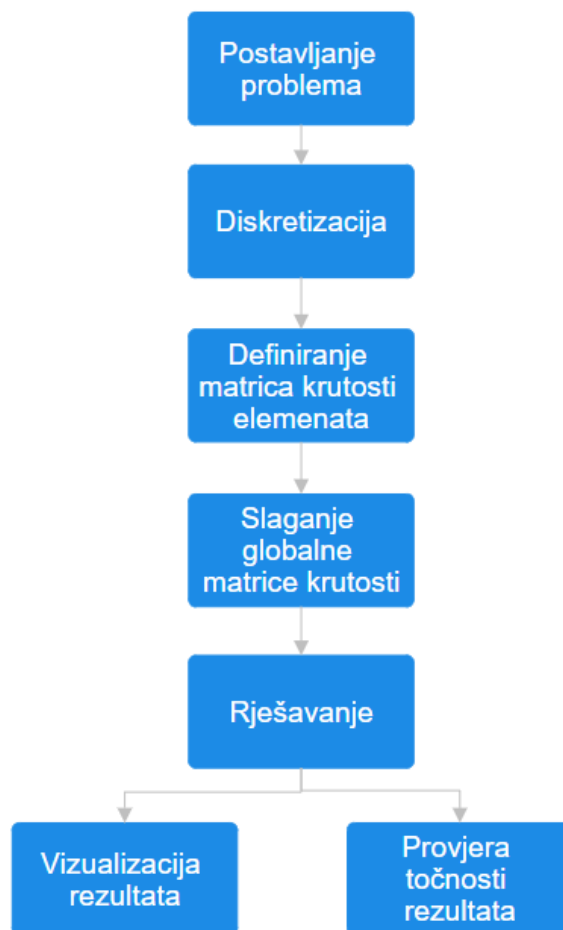
$$N_4(x, y) = \frac{1}{4}(1 - r)(1 + s) \quad (3.22)$$

Pri čemu su r i s koordinate kartezijevog koordinatnog sustava u kvadratičnom elementu sa središtem u težištu.

Ukratko, prvi korak metode konačnih elemenata je postavljanje problema, uključujući bitna svojstva materijala, opterećenja i rubne uvjete. Nakon toga se objekt koji se analizira dijeli na veliki broj manjih elemenata povezanih u čvorovima te se biraju tipovi elemenata. Sljedeći korak je definiranje matrica krutosti elemenata korištenjem jedne od tri prethodno spomenute metode: direktna metoda, metoda varijacija i Galerkinova metoda. Matrice krutosti svakog elementa se zatim spajaju u globalnu matricu krutosti cijeloga sustava baziranoj na povezanosti elemenata. Ta globalna matrica krutosti definira kako će se struktura ponašati pod opterećenjem i može se koristiti zajedno s rubnim uvjetima, kako bi se dobili pomaci u svakom čvoru u cjelokupnoj strukturi. Kada dobijemo pomake u čvorovima možemo izračunati deformacije, naprezanja i ostale varijable koje su nam potrebne.

Nakon što je dobiveno numeričko rješenje, koriste se tehnike post-procesiranja za vizualizaciju i interpretaciju rezultata. To može uključivati generiranje konturnih grafova, animacija ili izvlačenje specifičnih veličina, poput maksimalnih naprezanja, deformacija ili uzoraka protoka fluida. Post-procesiranje igra ključnu ulogu u razumijevanju ponašanja

sustava, pomažući u optimizaciji dizajna, donošenju odluka i potvrđivanju eksperimentalno dobivenih podataka.

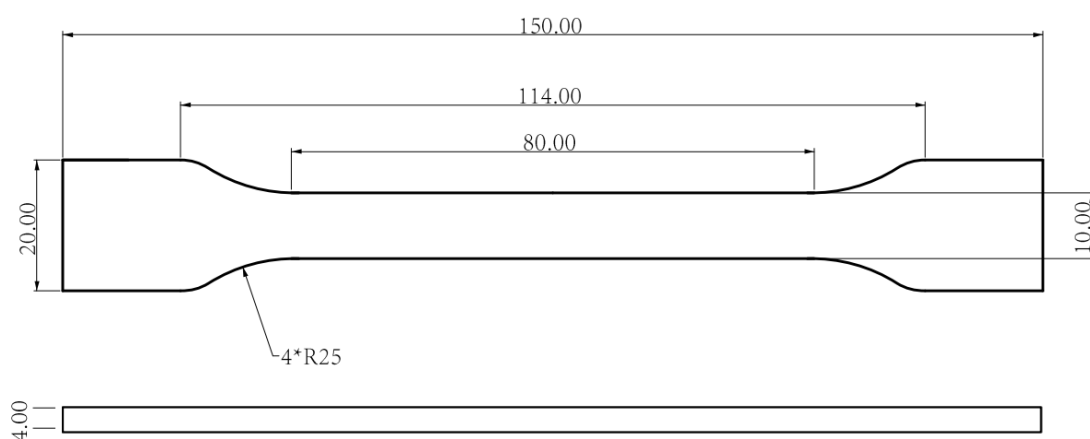


Slika 3.3. Dijagram toka rješavanja problema metodom konačnih elemenata

Unatoč svojoj širokoj primjeni i uspjehu, točnost i pouzdanost rješenja MKE uvelike ovise o čimbenicima poput kvalitete mreže, tipu elementa, numeričkih diskretizacijskih shema i postavki rješavača. Fino podešavanje mreže može biti nužno kako bi se točno uhvatile lokalne pojave, ali to često dolazi uz troškove povećanih računalnih resursa i vremena rješavanja. Nadalje, nelinearnosti, materijalne složenosti i geometrijski diskontinuiteti mogu predstavljati izazove u konvergenciji i stabilnosti, zahtijevajući napredne tehnike modeliranja i robusne strategije rješavanja.

4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

Kao prvi korak eksperimentalne analize odabran je testni uzorak na kojemu će se vršiti ispitivanja. Uzorci su pripremljeni prema standardu ASTM 638 a njegove dimenzije dane su na slici 4.1.



Slika 4.1. Testna epruveta s zadanim dimenzijama u mm

Pomoću 3D pisača napravljena su 42 uzoraka koji će se koristiti u različitim metodama analize. Uzorci su tiskani iz dva prethodno spomenuta materijala: PLA i ABS. Karakteristike PLA plastike u normalnim uvjetima dane su u tablici 4.1., dok su karakteristike ABS plastike dane u tablici 4.2.

Tablica 4.1. Svojstva korištene PLA plastike prema standardu ISO 1183

Svojstvo	Vrijednost	Mjerna jedinica
Gustoća (pri 21,5°C)	1,20	g/cm^3
Indeks taljenja	7,0 – 11,0	$g/10 min$
Temperatura tališta	150	°C
Temperatura staklastog prijelaza	61	°C

Tablica 4.2. Svojstva korištene ABS plastike prema standardu ISO 1183

Svojstvo	Vrijednost	Mjerna jedinica
Gustoća (pri 21,5°C)	1,10 – 1,15	g/cm^3
Indeks taljenja	9,0 – 14,0	$g/10\ min$
Temperatura tališta	235	°C
Temperatura staklastog prijelaza	98,1	°C

Pisač koji je korišten prilikom izrade testnih uzoraka je Raise3D Pro2 Plus. Parametri ispisa za sve testne uzorke postavljeni na slijedeći način. Gustoća ispune postavljena je na 100%, s debljinom vanjskih zidova (ploha) od 2,0 mm. Visina sloja postavljena je na 0,2 mm, s rešetkastim ispune (*eng. grid*) pod 0°. Temperatura ispisa postavljena je na 205 °C za PLA te 240 °C za ABS. Temperatura radne ploče printera postavljena je na 60 °C za PLA uzorke te 80 °C za ABS uzorke. Raft i potpore (*eng. support*) dodani su svakom modelu ispisa kako bi se izbjeglo skupljanje i savijanje uzrokovano temperaturom. Brzina ispisa za prve slojeve postavljena je na 15 mm/s, dok je zadana brzina ispisa bila 50 mm/s.



Slika 4.2. 3D pisač Raise3D Pro2 Plus [1]

Idući korak nakon tiskanja je toplinska obrada uzoraka. Postupak toplinske obrade uključuje zagrijavanje uzoraka na određene temperature kako bi se postigli određeni učinci, poput poboljšanja mehaničkih svojstava ili smanjenja unutarnjih naprezanja. U uzorcima nakon tiskanja i hlađenja na sobnu temperaturu postoje unutarnja naprezanja, pa se prije toplinske obrade postavljaju u posudu sa finim pijeskom, koji služi kao potpora za prevenciju deformacije uzoraka tijekom zagrijavanja. Potom je posuda s uzorcima postavljena u pećnicu i zagrijavana na određenu temperaturu. U ovome slučaju uzorci tiskani iz PLA su zagrijavani na 60 °C, a uzorci tiskani iz ABS na 90 °C. Uzorci su zadržani na tim temperaturama u vremenskom trajanju od 30 min. Nakon završetka postupka toplinske obrade, uzorci se prije daljnjeg testiranja ili obrade hlade na sobnu temperaturu. Važno je kontrolirati brzinu hlađenja kako bi se izbjeglo stvaranje unutarnjih naprezanja ili deformacija u uzorcima.

Jedan set baznih uzoraka koji nisu toplinski obrađeni te ostali, toplinski obrađeni uzorci, testirani su vlačnim testom na nisko ciklički zamor te na puzanje. Potrebno je naglasiti kako 3D tiskani uzorci imaju određenu hrapavost površine koja ovisi o visini sloja (*eng. layer height*) i promjeru mlaznice (*eng. nozzle diameter*). Površinska hrapavost uzorka može se dobiti eksperimentalno ili izračunati iz slijedećeg izraza:

$$R_a = 112,5 \times t \quad (4.1)$$

Gdje je R_a površinska hrapavost (μm), a t je visina sloja (mm). Razmatrajući dane informacije o postavkama 3D ispisa korištenim u ovom radu, i uz promjer mlaznice jednak 0,2 mm, površinska hrapavost svih korištenih uzoraka bila je $R_a = 22,5 \mu\text{m}$. To je u skladu sa površinskom hrapavošću koja se može pronaći u literaturi [7], za PLA i ABS materijale.

Vlačni test, zamorni test i test na puzanje izvedeni su na kidalici. Kidalica je stroj za vlačno ispitivanje čvrstoće materijala. Sastoji se od uređaja za mjerenje sile, uređaja za mjerenje deformacije i uređaja za stvaranje sile. U ovom ispitivanju korištena je kidalica Shimadzu Autograph AGS-X koja razvija silu od 10 kN.

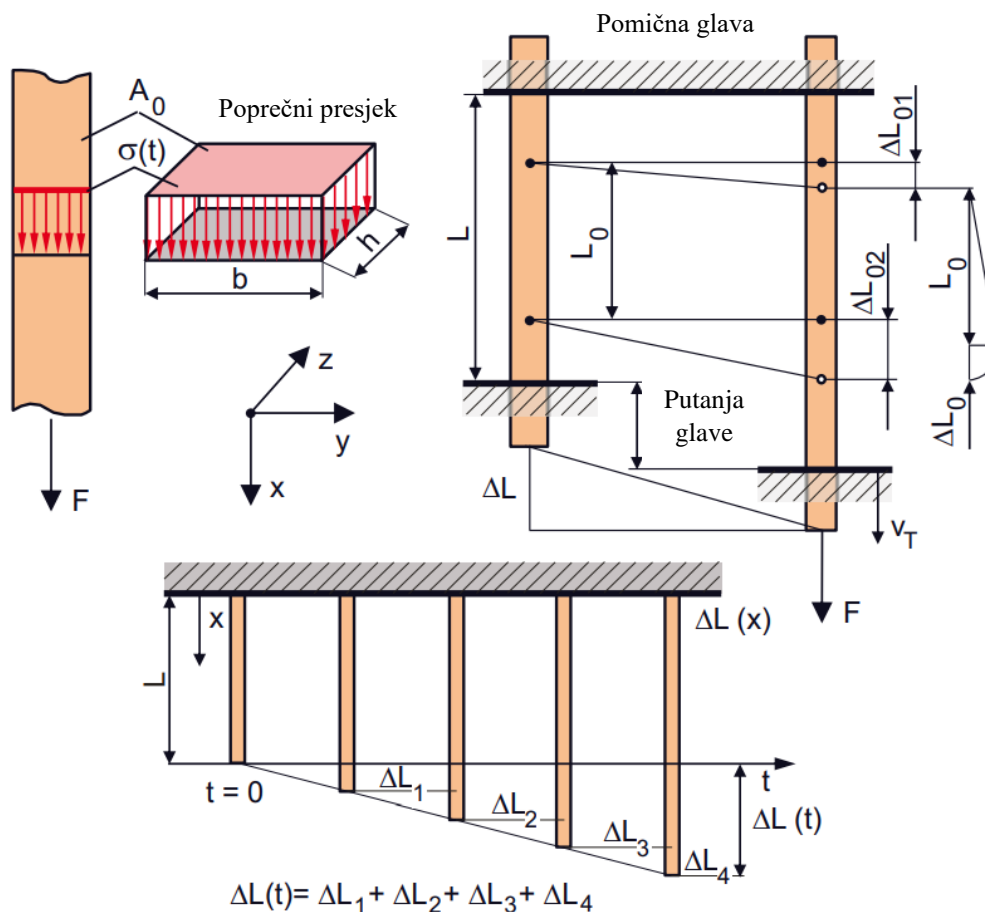


Slika 4.3. Kidalica Shimadzu autograph AGS-X (10 kN)

4.1. Vlačni test

Među statičkim i kvazi-statičkim metodama ispitivanja i mjerenja, vlačni test se smatra temeljnim testom u mehaničkom ispitivanju materijala. Unatoč činjenici da je čisto istežanje u praksi često iznimka i unatoč njezinim eksperimentalnim i interpretativnim problemima, ovaj test visoko kotira i u ispitivanju polimera. Zbog velike raznolikosti modifikacija dostupnih sa polimerima, poznati su različiti pristupi izvođenju vlačnih testova koji zahtijevaju različite uzorke, uvjete opterećenja i/ili stezaljke. Konvencionalni vlačni test, odnosno vlačni test s konstantnom brzinom pomicanja glave kidalice, je kvazi statički test sa temeljnim pretpostavkama o uvjetima ispitivanja, tehnikama i korištenim uzorcima. Opterećenje se mora primijeniti bez udara te postupno i stabilno povećavati sve dok ne dođe do loma uzorka. U uzorku se treba stvoriti jednoosno opterećenje i stanje naprezanja, odnosno homogeno

normalno naprezanje i deformacija koji su ravnomjerno raspoređeni po poprečnom presjeku, kao što je prikazano na slici 4.4. Pretpostavlja se homogeno, izotropno stanje materijala u odnosu na uzorak.



Slika 4.4. Lokalno ponašanje deformacije u vremenu pri vlačnom ispitivanju [8]

Ne postoje geometrijske nepravilnosti (npr. utori ili ispupčenja); uzorci su prizmatični. Utjecaji tehnike ispitivanja kao što je vlačni test mogu imati posljedica na rezultate. Mogućnost pomaka epruvete ili proklizavanja čeljusti moraju biti eliminirane. S obzirom na ove preduvjete, ukupno povećanje duljine prizmatičnog uzorka ΔL dobiva se u bilo kojem trenutku kao zbroj istežanja ekvidistantnih dijelova uzorka $\Delta L_i(x)$ (Slika 4.4.), koje se poklapa s putanjom gibanja glave kidalice.

Reakcijska sila koja nastaje u uzorku zbog vanjskog opterećenja F također je uzdužno konstantna zbog jednolikog poprečnog presjeka A_0 te je stoga samo funkcija vremena. Ako se

koriste uzorci s promijenjenim poprečnim presjekom ili duljinom, izmjerena sila F i istežanje ΔL moraju se normirati kako bi se procijenila svojstva materijala. Da bi to bilo moguće, djelujuća sila povezana je s početnom površinom poprečnog presjeka, pri čemu se naprežanje σ dobiva na sljedeći način:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.2)$$

Produljenje ΔL_0 koje proizlazi iz vanjskog opterećenja povezano je s definiranom početnom duljinom mjernog područja L_0 i naziva se normativno naprežanje ε koje se može izraziti bezdimenzijski ili kao postotak:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} 100\% \quad (4.3)$$

Iz ovoga je moguće zaključiti je da je zabilježeni dijagram opterećenja-istežanja identičan s dijagramom naprežanja-deformacije, budući da su obje količine povezane s konstantnim početnim vrijednostima. Vrijednost ΔL_i odgovara stvarnoj duljini uzorka i funkcija je vremena ili trajanja vlačnog ispitivanja. Na uskim prizmatičnim uzorcima u slučaju ravninskog stanja naprežanja, istovremeno dolazi do poprečnog skupljanja u smjerovima y i z osi sa nastajanjem istežanja duž x osi, što dovodi do smanjenja početnog poprečnog presjeka. Kao rezultat aksijalnog opterećenja, postoji tendencija da se pojavi aksijalno stanje naprežanja i trodimenzionalno stanje deformacije. Iz ovih razloga, kao i činjenice da bi izmjereno istežanje trebalo biti povezano sa trenutnom duljinom uzorka, za jednadžbe 4.2 i 4.3 uvodimo izraz "prividno" ili "inženjersko" naprežanje i deformacija. Ovisno o tome koristi li se putanja glave kidalice ili ekstenzometar, za izračun deformacije koristi se jednadžba 4.3 ili 4.4:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} 100\% \quad (4.4)$$

Naprežanje navedeno u jednadžbi 4.3 naziva se normativno naprežanje, dok se naprežanje navedeno u jednadžbi 4.4 s indeksom t naziva nominalno naprežanje. Iz derivacije deformacije po vremenu, moguće je dobiti normativnu stopu deformacije ili nominalnu stopu deformacije u deformiranom volumenu $d\varepsilon/dt$:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{d(\Delta L_0)}{dt} \quad (4.5)$$

ili

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{d\varepsilon_t}{dt} = \frac{1}{L} \frac{d(\Delta L)}{dt} = \frac{V_T}{L} \quad (4.6)$$

Vrijednost dobivena iz jednadžbe 4.5 odgovara stopi deformacije između hvataljki sustava za mjerenje deformacija i može se posebno koristiti u vlačnim ispitivanjima kontroliranim deformacijom. Nominalna stopa deformacije (jednadžba 4.6) izražava odnos između potrebne brzine ispitivanja u % min^{-1} ili s^{-1} i brzine pomaka glave kidalice V_T koja se postavlja na ispitnom stroju. S obzirom na gore navedene zahtjeve za vlačni ispit i prizmatični uzorak koji odgovara slici 4.1, nominalne i normativne stope deformacije su identične u svakom dijelu uzorka.

Pod jednom serijom uzoraka u vlačnom testu uzete su tri epruvete kako je prikazano na slici 4.5, od kojih je jedna termički neobrađena (a), jedna termički obrađena na 60 °C (b), te jedna termički obrađena epruveta na 100 °C (c). Zbog lakšeg razlikovanja PLA epruvete tiskane su u crnoj boji a ABS epruvete u bijeloj boji.



Slika 4.5. Jedna serija PLA uzoraka s (a) termički neobrađenom epruvetom, (b) epruvetom grijanom na 60 °C i (c) epruvetom grijanom na 100 °

Isto kad i kod PLA, kao jedna serija za ABS uzorke tiskana su tri epruvete kako je prikazano na slici 4.6, od kojih je jedna termički neobrađena (a), jedna termički obrađena na 60 °C (b), te jedna termički obrađena epruveta na 100 °C (c).



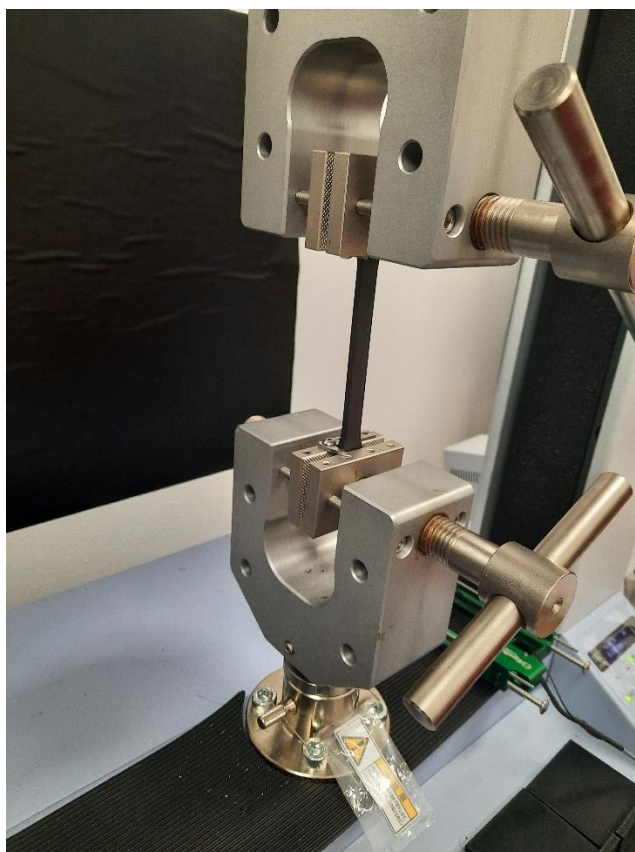
Slika 4.6. Jedna serija ABS uzoraka s (a) termički neobrađenom epruvetom, (b) epruvetom grijanom na 60 °C i (c) epruvetom grijanom na 100 °

Iz slika 4.5. i 4.5. vidljivo je da epruvete nisu istih dimenzija. Prilikom termičke obrade na 60 °C došlo je do manje promjene dimenzija epruveta. Dok je pri termičkoj obradi na 100 °C došlo do manje promjene dimenzija i deformacije same epruvete. U tablici 4.3. dane su dimenzije poprečnog presjeka a i b u mm površine te poprečnog presjeka A_0 u mm^2 za sve uzorke prije i/ili nakon termičke obrade.

Tablica 4.3. Dimenzije poprečnih presjeka PLA i ABS epruveta u mm i površine poprečnih presjeka PLA i ABS epruveta u mm² pri danim temperaturama termičke obrade

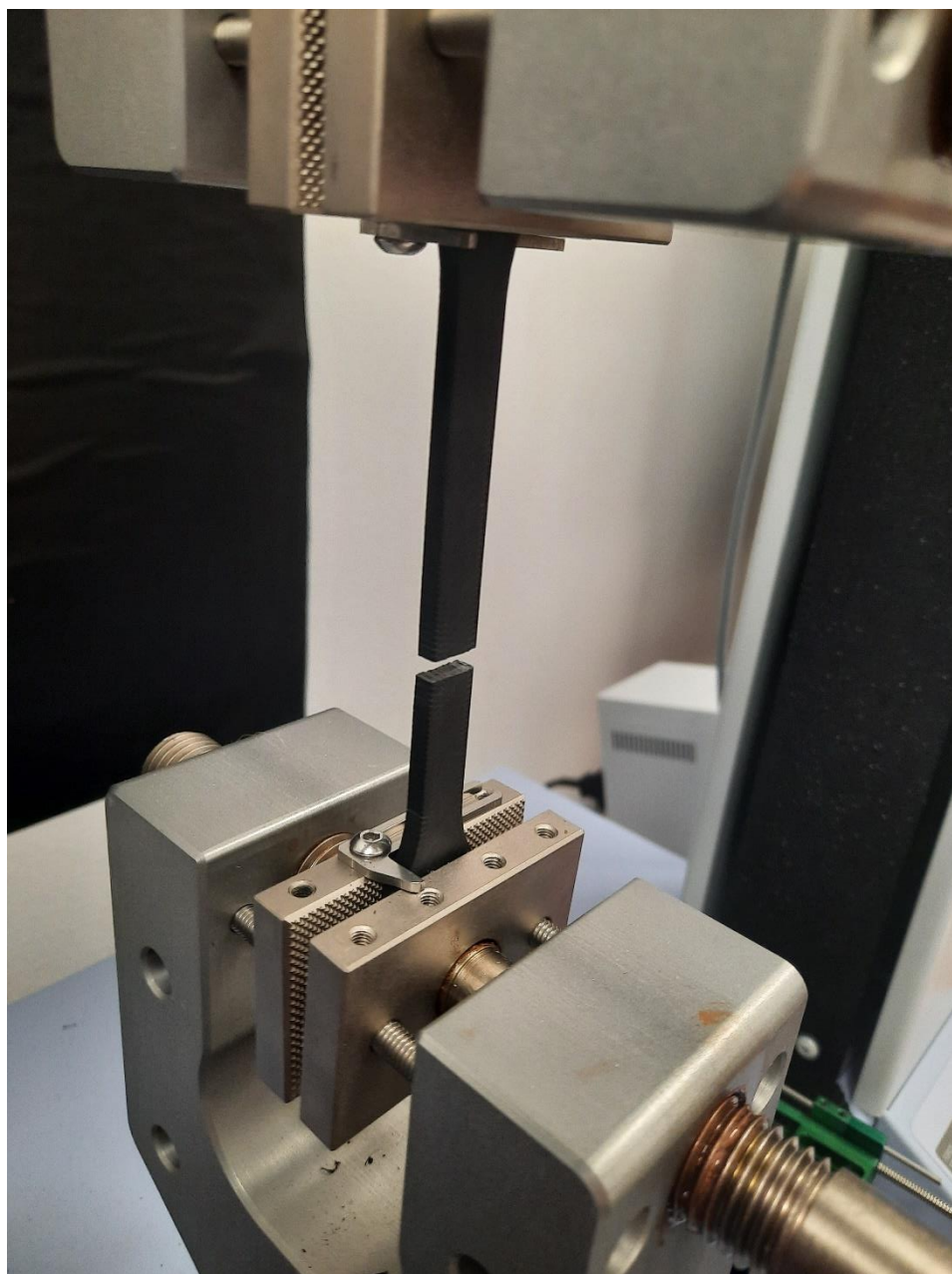
	PLA			ABS		
	a [mm]	b [mm]	A ₀ [mm ²]	a [mm]	B [mm]	A ₀ [mm ²]
Bazni uzorak	10	4	40	10	4	40
60 °C	9,8	4,3	42,14	9,8	4	39,2
100 °C	8,8	5	44	8,8	4,5	39,6

Nakon mjerenja, epruvete su namještene i stegnute u čeljusti kidalice kako je prikazano na slici 4.7. Čeljusti kidalice su postavljene na udaljenost $L = 100$ mm. Čeljusti se stežu ručno pri čemu dolazi do pojave manje tlačne sile na senzoru kidalice. Kidalicu je nakon toga potrebno kalibrirati tako da se čeljusti rastegnu za pomak pri kojem će sila na senzoru biti jednaka nula N .

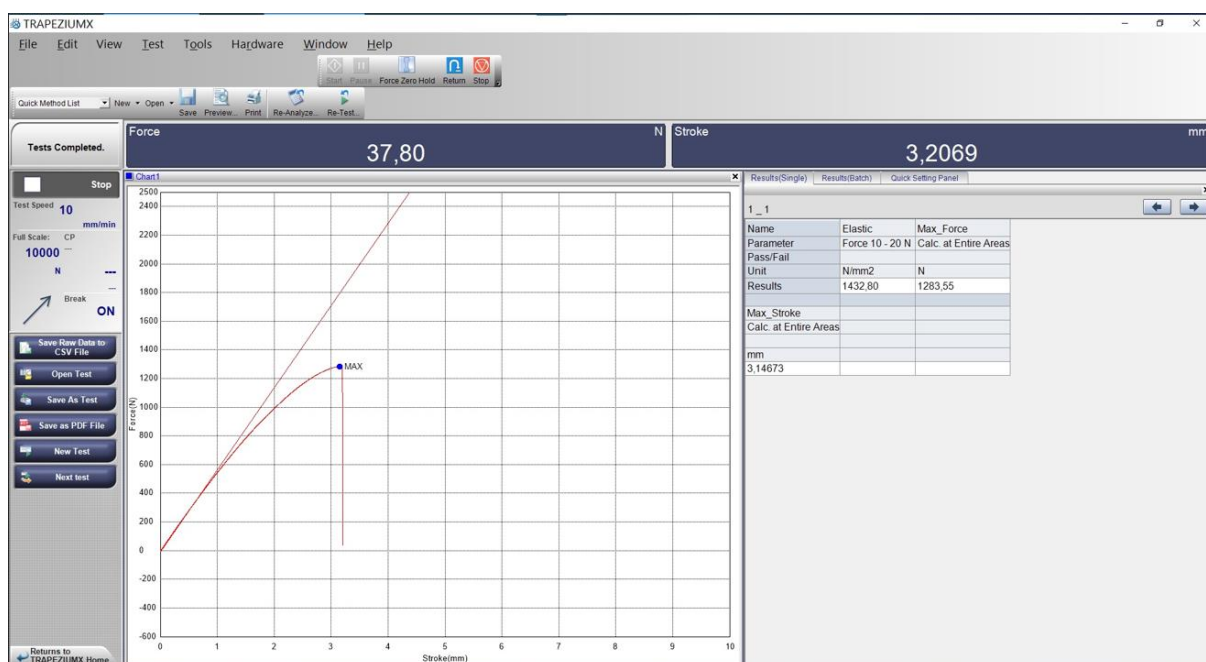


Slika 4.7. Uzorak stegnut u čeljustima kidalice

Nakon što je uzorak postavljen u čeljusti potrebno je namjestiti da softver kralice daje željeni format rješenja vlačnog testa te zatim pokrenuti test. Test se prekida kada dođe do loma epruvete kako je prikazano na slici 4.8. Nakon loma epruvete računalni program nam daje prikaz dijagrama sila – pomak te maksimalne vrijednosti sile u N i pomaka u mm kako je prikazano na slici 4.9. Brzina razvlačenja postavljena je na 10 mm/min .



Slika 4.8. Prikaz uzorka nakon loma



Slika 4.9. Prikaz rezultata vlačnog testa u računalnom programu

Postupak se ponavlja iteracijski dok se ne dobiju svi potrebni podaci. U ovom slučaju vlačnim testom su testirane dvije serije PLA i dvije serije ABS plastike što daje ukupno dvanaest epruveta (slika 4.10.).



Slika 4.10. Prikaz serija PLA i ABS uzoraka nakon loma

Za svaku od testiranih epruveta dobivena je maksimalna sila F [N] koju je epruveta izdržala prije loma te maksimalni pomak glava kidalice [mm] prije loma. Dobiveni podaci za PLA dani su tablično u tablici 4.4. te za ABS u tablici 4.5.

Tablica 4.4. Iznos maksimalne sile F u N za PLA uzorke testirane vlačnim testom

PLA	SERIJA	
	1	2
	F [N]	F [N]
Bazni uzorak	2094	2134
60 °C	2249	2210
100 °C	2284	2259

Tablica 4.5. Iznos maksimalne sile F u N za ABS uzorke testirane vlačnim testom

ABS	SERIJA	
	1	2
	F [N]	F [N]
Bazni uzorak	1312	1286
60 °C	1264	1272
100 °C	1283	1275

Osim maksimalne sile i maksimalnog pomaka, tijekom vlačnog testa zabilježeni su i ostali pomaci te ostale sile iz kojih je moguće dobiti dijagram sila – pomak. Osim dijagrama sila pomak iz ovih podataka je moguće dobiti i dijagram naprezanje – deformacija. Za dobivanje točaka dijagrama će se eksperimentalno dobiveni podaci uvrstiti u jednadžbu 4.2 za dobivanje naprezanja σ , odnosno jednadžbu 4.3 za dobivanje deformacije ϵ .

U jednadžbu 4.2 kao sila F biti će uvrštena eksperimentalno dobivena sila koja iz računalnog programa kidalice izvezena u tabličnom obliku radi lakše obrade podataka. Kao jedinica površine u jednadžbi 4.2 biti će korištena površina A_0 koja je izračunata u tablici 4.3 posebno za PLA i ABS uzorke. Površina A_0 uvrštena u milimetrima kvadratnim (mm^2) dati će mjernu jedinicu za naprezanje σ u mega paskalima (MPa).

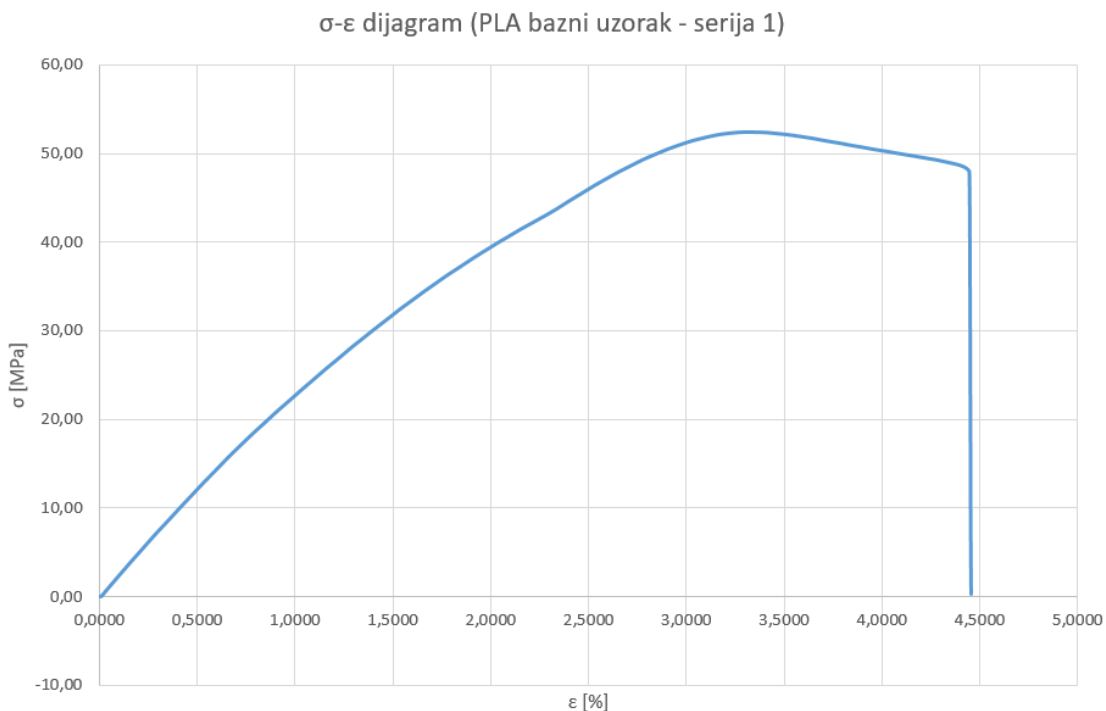
U jednadžba 4.3 kao produljenje ΔL_0 biti će uvršteno eksperimentalno dobiveno produljenje (*eng. stroke*) koje je udaljenost koju pređe pomična glava kidalice od početka testa do puknuća uzorka. Za početnu duljinu L_0 uvrštena je vrijednost od 100 mm koja odgovara početnoj udaljenosti pomične i nepomične glave kidalice.

1	Column1	Column2	Column3				
2	1_1			A_0	40 mm ²	L_0	100 mm
3	Time	Sila (F)	Produljenje (ΔL_0)				
4	sec	N	mm	σ		ϵ	
5	0	-1,341502	0,0001666667	-0,0335376 MPa		0,000167 %	
6	0,01	-1,341502	0,001466667	-0,0335376 MPa		0,001467 %	
7	0,02	-1,314481	0,0032	-0,032862 MPa		0,0032 %	
8	0,03	-1,246134	0,004933333	-0,0311534 MPa		0,004933 %	
9	0,04	-1,05381	0,006633333	-0,0263453 MPa		0,006633 %	
10	0,05	-0,5674362	0,008333334	-0,0141859 MPa		0,008333 %	
11	0,06	0,3401438	0,01006667	0,0085036 MPa		0,010067 %	
12	0,07	1,643499	0,01173333	0,04108748 MPa		0,011733 %	
13	0,08	3,210704	0,0134	0,0802676 MPa		0,0134 %	
14	0,09	4,935265	0,0151	0,12338163 MPa		0,0151 %	
15	0,1	6,739298	0,01676667	0,16848245 MPa		0,016767 %	
16	0,11	8,5783	0,01843333	0,2144575 MPa		0,018433 %	
17	0,12	10,42525	0,0201	0,26063125 MPa		0,0201 %	
18	0,13	12,25789	0,02176667	0,30644725 MPa		0,021767 %	
19	0,14	14,06987	0,02343333	0,35174675 MPa		0,023433 %	
20	0,15	15,86119	0,02506667	0,39652975 MPa		0,025067 %	
21	0,16	17,63821	0,02676667	0,44095525 MPa		0,026767 %	
22	0,17	19,41363	0,02843333	0,48534075 MPa		0,028433 %	
23	0,18	21,19223	0,03006667	0,52980575 MPa		0,030067 %	
24	0,19	22,96766	0,03176667	0,5741915 MPa		0,031767 %	
25	0,2	24,7399	0,03343333	0,6184975 MPa		0,033433 %	
26	0,21	26,50897	0,0351	0,66272425 MPa		0,0351 %	
27	0,22	28,2685	0,03676667	0,7067125 MPa		0,036767 %	
28	0,23	30,01849	0,03843333	0,75046225 MPa		0,038433 %	
29	0,24	31,75895	0,04006667	0,79397375 MPa		0,040067 %	

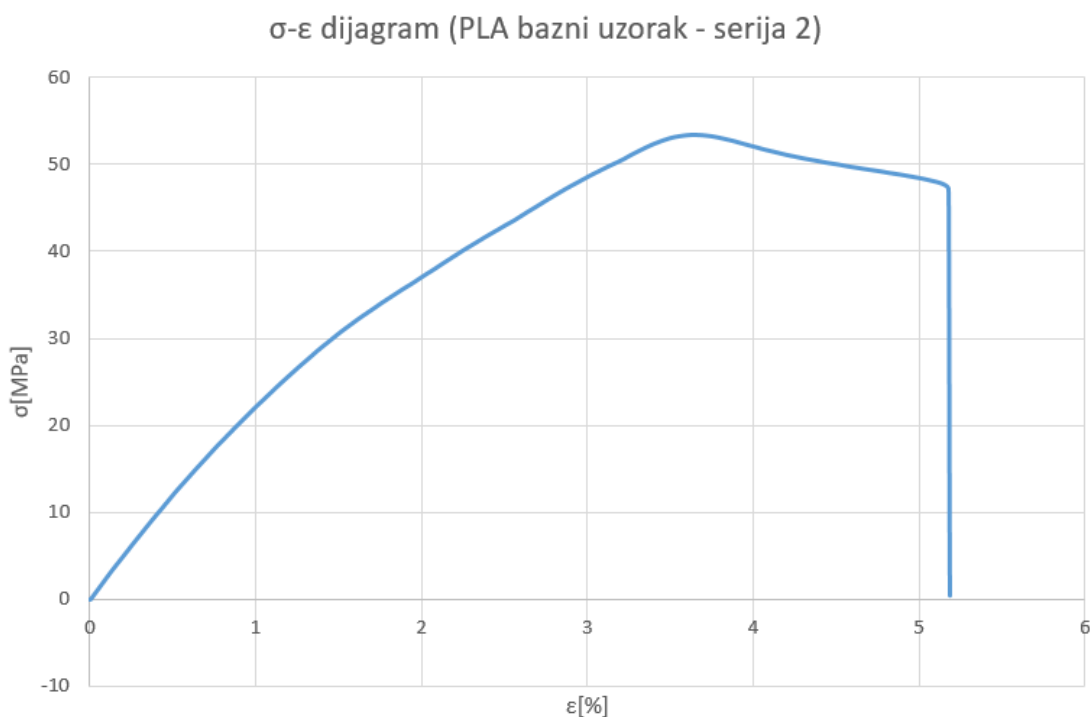
Slika 4.11. Prikaz tablično izvezenih rezultata vlačnog testa te izračunatih vrijednosti naprezanja i deformacije

Obradom podataka prikazanih na slici 4.11. dobiva se σ - ϵ dijagram kao rezultat vlačnog testa. Kako bi se dokazala konzistentnost podataka iscrtan je dijagram za svaku seriju uzoraka. To vrijedi za termički obrađene kao i za termički neobrađene uzorke.

Dijagrami naprezanja i deformacije (σ - ϵ dijagrami) za obje serije PLA baznih uzoraka dani su na slikama 4.12 i 4.13.

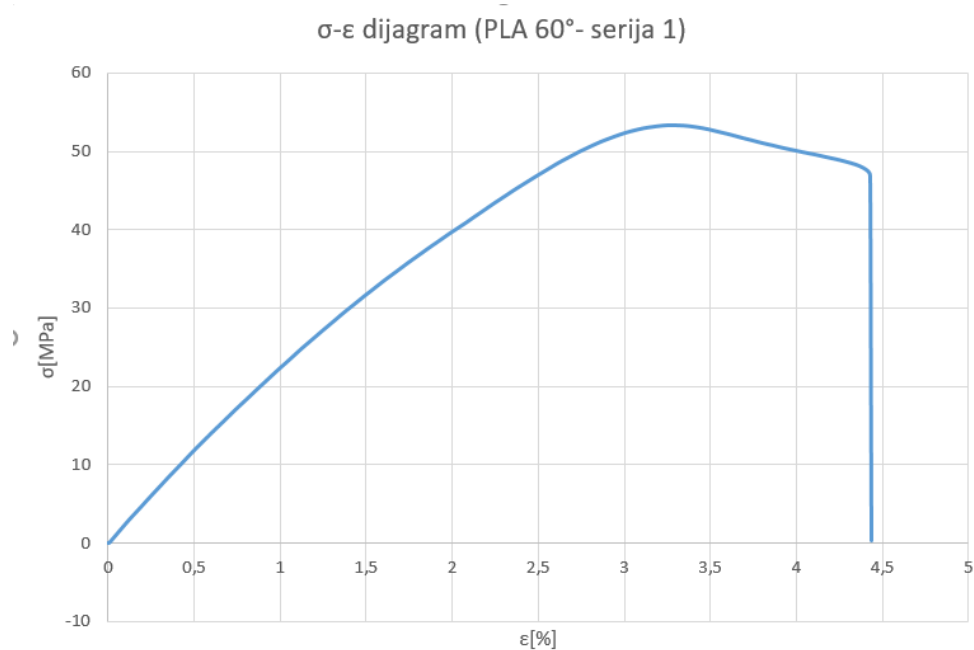


Slika 4.12. σ - ϵ dijagram za bazni uzorak PLA – serija 1

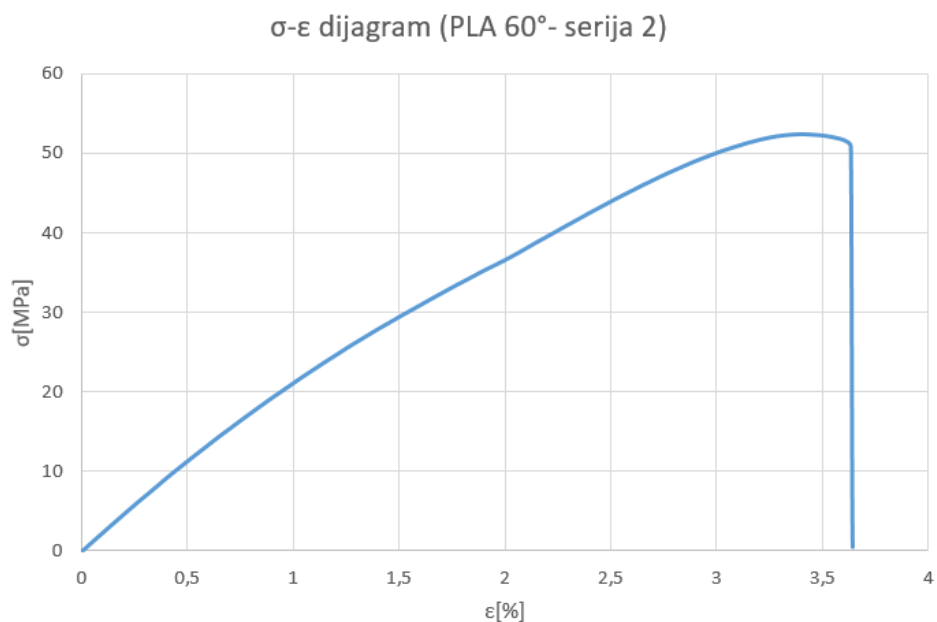


Slika 4.13. σ - ϵ dijagram za bazni uzorak PLA – serija 2

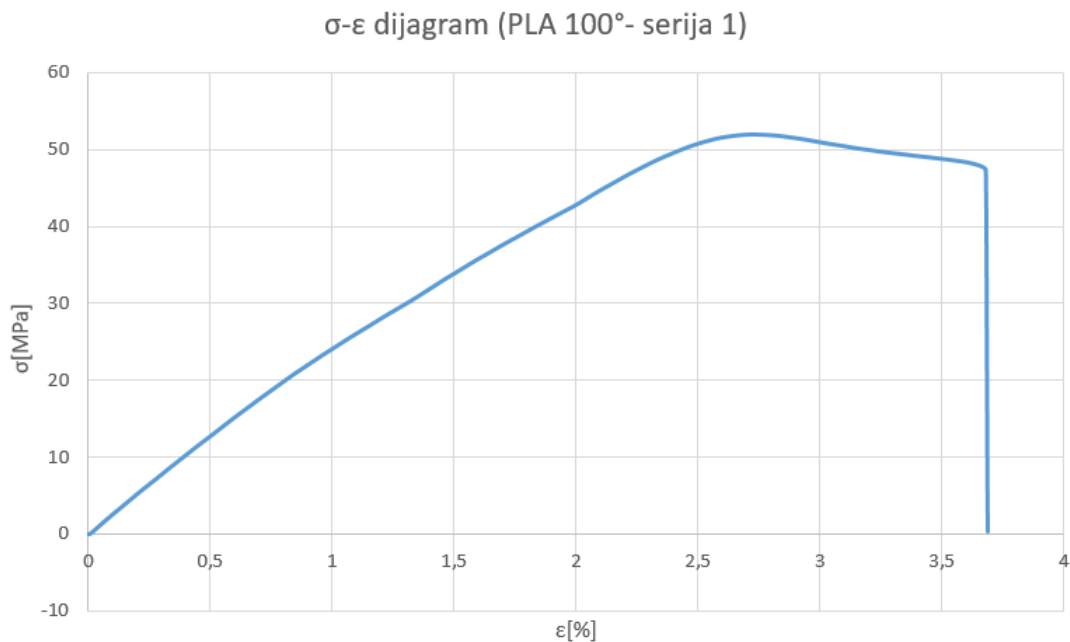
Iz slika 4.12 i 4.13 moguće je očitati da termički neobrađeni uzorci PLA ulaze u područje trajne ili plastične deformacije pri naprezanju od oko 30 MPa. Maksimalno dosegnuto naprezanje σ_{max} iznosi oko 53 MPa nakon kojega naprezanje postepeno pada do granice loma pri oko 47 MPa.



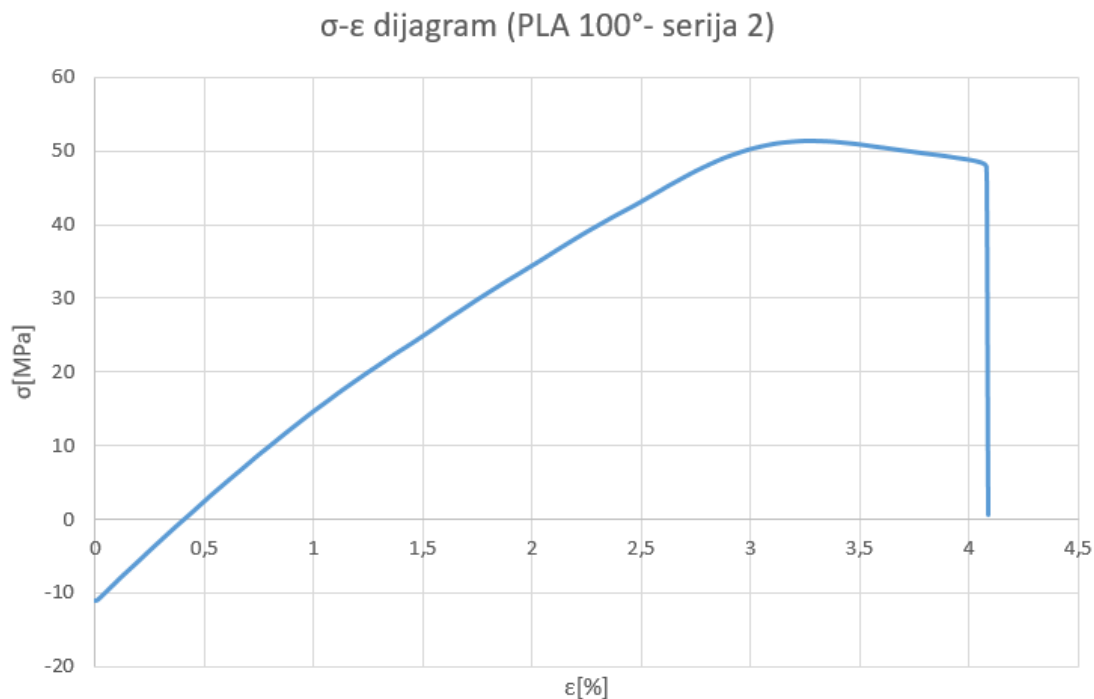
Slika 4.14. σ - ϵ dijagram za PLA uzorak grijan na 60° – serija 1



Slika 4.15. σ - ϵ dijagram za PLA uzorak grijan na 60° – serija 2



Slika 4.16. σ - ϵ dijagram za PLA uzorak grijan na 100° – serija 1



Slika 4.17. σ - ϵ dijagram za PLA uzorak grijan na 100° – serija 2

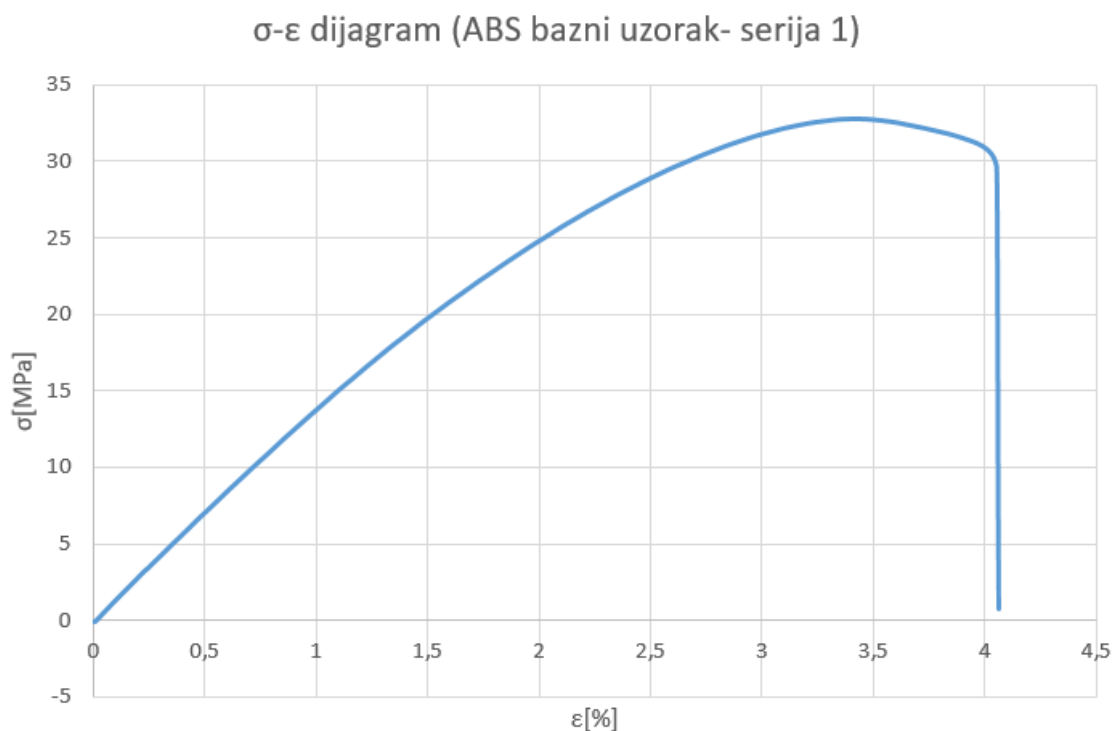
Uzorci PLA obrađeni na 60 °C su u prosjeku dosegli maksimalno naprezanje od σ_{max} oko 53,4 MPa što je nešto više od termički neobrađenih uzoraka. Granica loma je viša od termički

neobrađenih uzoraka te naprezanje na granici loma za uzorke obrađene na 60 °C u prosjeku iznosi oko 48 MPa što je moguće vidjeti iz dijagrama na slikama 4.14 i 4.15.

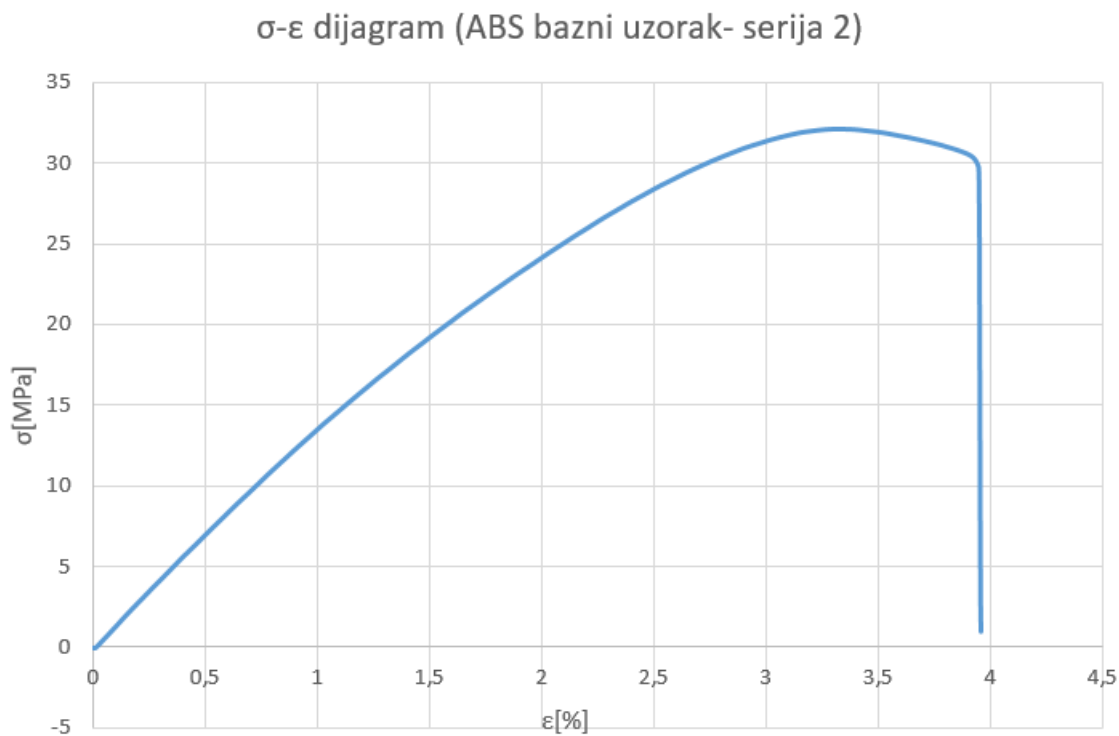
Dijagrami naprezanja i deformacije za PLA uzorke termički obrađene na 100 °C prikazani su na slikama 4.16 i 4.17. U ovom slučaju je izmjerena vlačna sila bila najveća ali je maksimalno naprezanje σ_{max} bilo niže od onog kod uzorka obrađenog na temperaturi od 60 °C te je iznosilo oko 51,3 MPa. Granica loma je nastupila pri naprezanju od oko 47,5 MPa.

Postupak za PLA uzorke ponovljen je i za uzorke tiskane iz ABS plastike. Dijagrami naprezanja i deformacije za bazni uzorak ABS plastike dani su na slikama 4.18 i 4.19. Iz dijagrama na slikama 4.18 i 4.19 za ABS bazne uzorke moguće je očitati maksimalno naprezanje σ_{max} koje iznosi oko 32,6 MPa. Granica loma za ABS materijal, kao i maksimalno naprezanje, nastupila je je pri nižem naprezanju u odnosu na PLA pri oko 28 MPa.

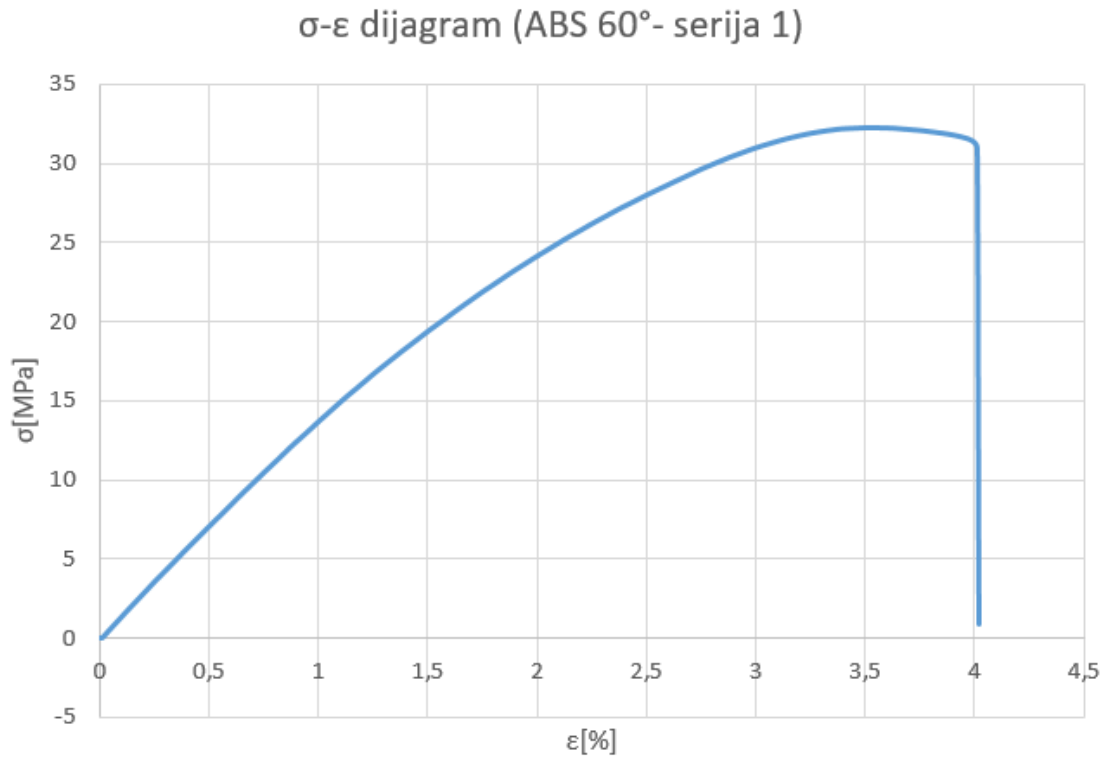
Za ABS uzorke grijane na 60 °C iz dijagrama na slikama 4.20 i 4.21 očitano je maksimalno naprezanje σ_{max} od oko 32,4 MPa, što je nešto niže nego u slučaju baznih uzoraka. Granica loma se očitava pri naprezanju od oko 30 MPa.



Slika 4.18. σ - ϵ dijagram za bazni uzorak ABS – serija 1

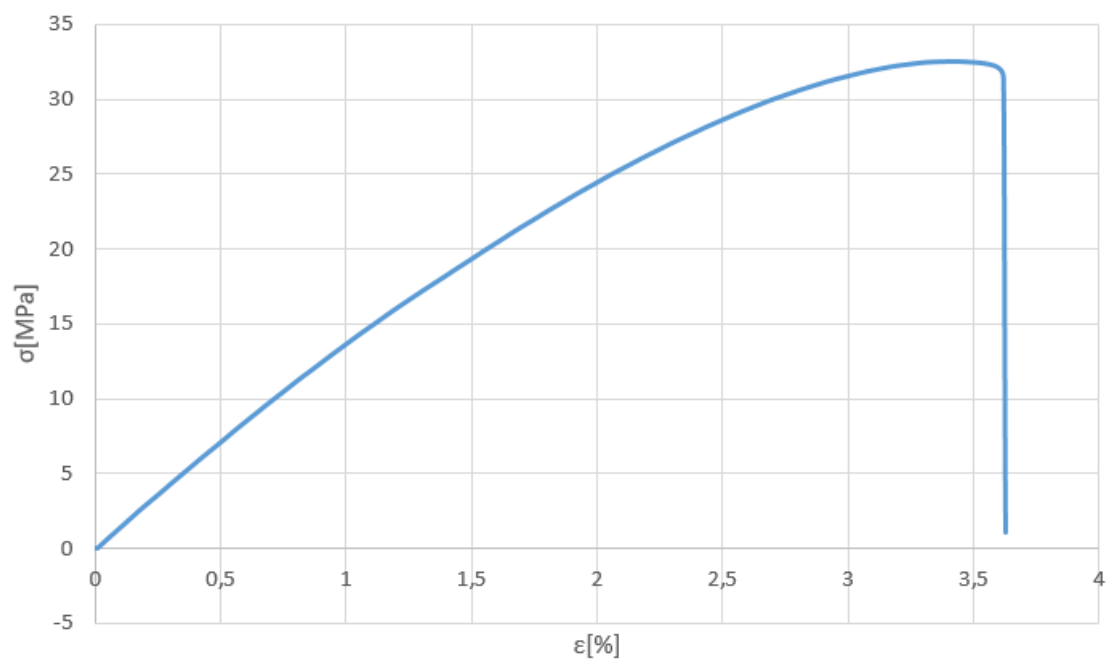


Slika 4.19. σ - ϵ dijagram za bazni uzorak ABS – serija 2



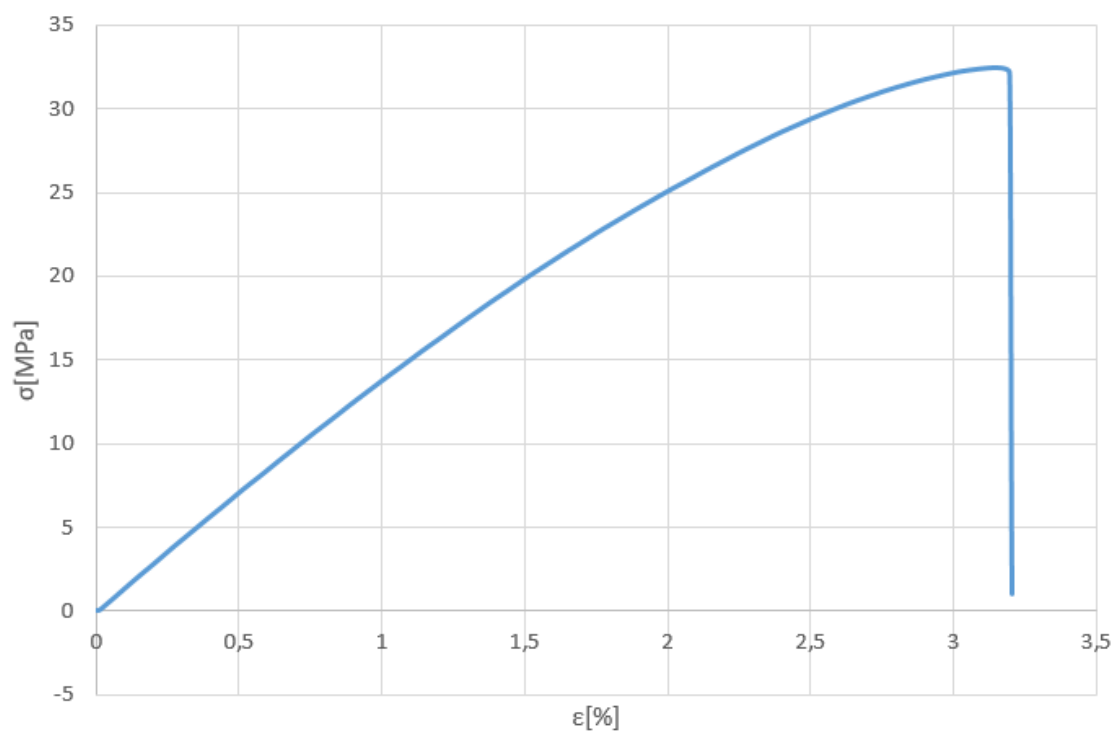
Slika 4.20. σ - ϵ dijagram za ABS uzorak grijan na 60° – serija 1

σ - ϵ dijagram (ABS 60°- serija 2)

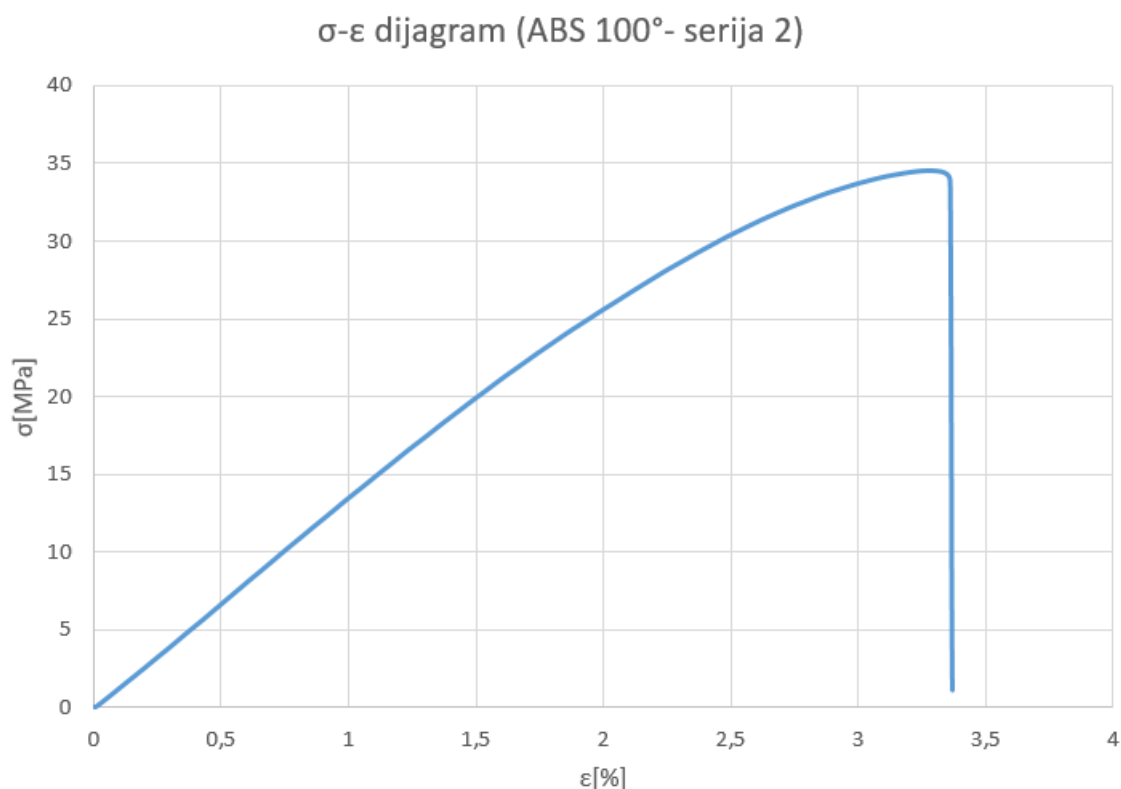


Slika 4.21. σ - ϵ dijagram za ABS uzorak grijan na 60° – serija 2

σ - ϵ dijagram (ABS 100°- serija 1)



Slika 4.22. σ - ϵ dijagram za ABS uzorak grijan na 100° – serija 1



Slika 4.23. σ - ϵ dijagram za ABS uzorak grijan na 100° – serija 2

Iz dijagrama na slikama 4.22 i 4.23 moguće je očitati maksimalno naprezanje σ_{max} za ABS uzorke termički obrađene na 100 °C koje iznosi oko 33,5 MPa. Granica loma se u ovom slučaju očitava pri naprezanju od oko 31 MPa.

Iz prikazanih dijagrama za PLA i ABS materijale moguće je zaključiti da termička obrada PLA plastike na 60 °C povećava maksimalno naprezanje koje materijal podnosi. Termička obrada PLA plastike na 100 °C nema značajnih prednosti u odnosu na termičku obradu pri 60 °C. U slučaju ABS plastike grijane na 60 °C očitano je smanjenje maksimalnog naprezanja od 0,2 MPa što nije značajna promjena. ABS uzorci grijani na 100 °C u odnosu na bazne uzorke bilježe povećanje maksimalnog naprezanja za oko 1,1 MPa ali je maksimalna deformacija smanjena s oko 3,9 % na oko 3,4 % što naznačuje smanjenje duktilnosti odnosno povećanje lomljivosti materijala.

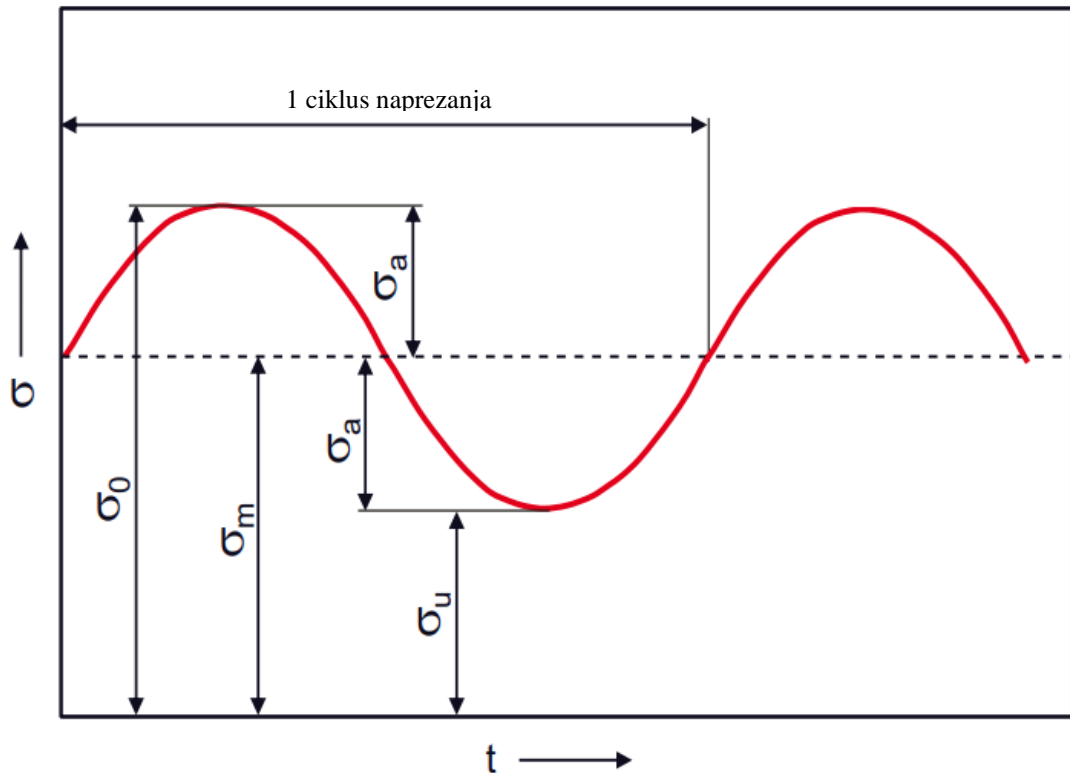
4.2. Nisko-ciklički zamor

Osim statičkog opterećenja, plastične komponente su u praksi često podvrgnute i dinamičkom opterećenju. Takvo dinamičko opterećenje može dovesti do kvara komponente pri znatno nižim naprezanjima ili deformacijama nego kod statičkih uvjeta opterećenja. Kada se prekorače granice koje ovise o materijalu, pojavljuju se fenomeni oštećenja u području linearno-viskoznoelastičnog ponašanja materijala, što dovodi do zamora. Ponašanje zamora u polimernim materijalima u osnovi je određeno specifičnim ponašanjem polimerne strukture.

Na početku periodičkog izmjeničnog, cikličkog slijeda opterećenja dolazi do odstupanja od linearno-elastičnog ponašanja, te se razvija histerezna petlja zbog faznog pomaka između prisilne vibracije i deformacije. Kada materijal prolazi kroz cikluse opterećenja i rasterećenja, putanja deformacije ne prati istu liniju. Razlika između putanja opterećenja i rasterećenja rezultira histereznom petljom. Energija unutar ove petlje predstavlja energiju gubitka zbog unutarnjeg trenja i drugih disipativnih procesa. Djelujuće sile i prisilne deformacije javljaju se u izmjeničnom slijedu, pri čemu se mora uložiti dodatna energija za elastični oporavak. Kako se opterećenje povećava, energija deformacije koju apsorbira materijal se mijenja te područje histereze (energija gubitka) raste, a temperatura u polimernom materijalu se povećava. Ovo povećanje temperature uzrokovano je posebno strukturno određenom niskom toplinskom vodljivošću plastike – dva do tri decimalna reda nižom od one metala. Ovaj fenomen zagrijavanja ovisi o frekvenciji cikličkog opterećenja, tako da može doći do ranog kvara zbog povećane temperature i/ili mehaničkih oštećenja.

Test kontinuiranih vibracija pruža osnovu za određivanje ponašanja zamora plastičnih materijala. Za ispitivanje polimera se u velikoj mjeri koriste definicije konceptata i specifikacije prema DIN 50100, standardu za ispitivanje kontinuiranih vibracija na metalnim materijalima. Na slici 4.24 prikazan je dijagram napreznja u vremenu pri čemu je σ_o maksimalno napreznje, σ_u minimalno napreznje, σ_m srednje napreznje te σ_a amplitudaa izmjeničnog napreznja.

U testu kontinuiranih vibracija razlikujemo opterećenje kontrolirano napreznjem, u kojem je konstantna amplituda izmjeničnog napreznja σ_a nadopunjena konstantnim srednjim napreznjem σ_m , i opterećenje kontrolirano deformacijom, u kojem je konstantna amplituda deformacije ε_a nadopunjena konstantnom srednjom deformacijom ε_m . Ovisno o opterećenju materijala koji se testira, ovaj test se može izvesti pri tri opterećenja u ukupno sedam slučajeva opterećenja (slika 4.25).



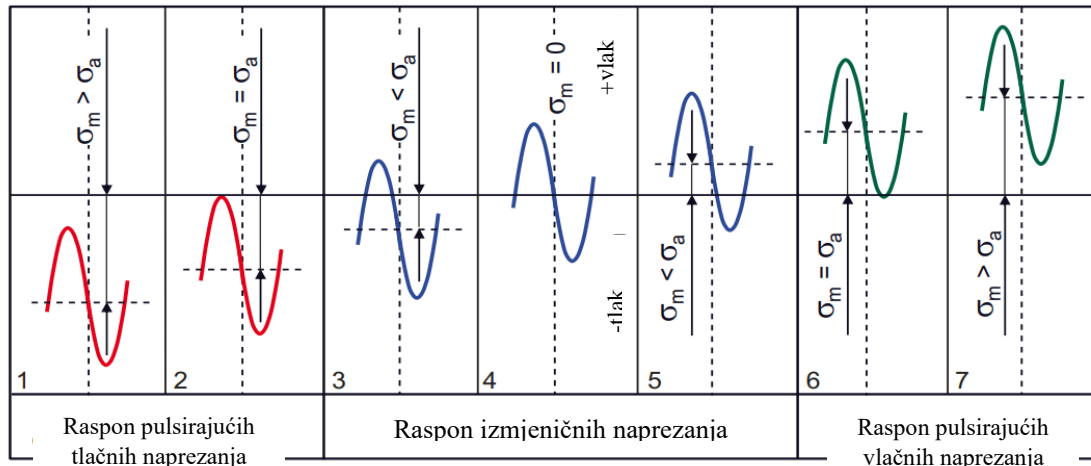
Slika 4.24. dijagram naprezanja u vremenu (σ - t) pod cikličkim opterećenjem [8]

Ovisno o postupku testiranja, kao vrijednosti opterećenja unaprijed se definiraju srednje naprezanje i amplituda naprezanja ili maksimalno i minimalno naprezanje. Parametar naveden u testu kontinuiranih vibracija kontroliranom naprezanjem je omjer naprezanja $R = \sigma_u / \sigma_o$. Ovdje razlikujemo između tri slučaja:

- Raspon pulsirajućih tlačnih naprezanja σ_o i σ_u su negativni,
 $\sigma_m \geq \sigma_a$; $0 \leq R < +1$
- Raspon izmjeničnih naprezanja σ_o i σ_u su suprotnih predznaka,
 $\sigma_m < \sigma_a$; $0 > R \geq -1$
- Raspon pulsirajućih vlačnih naprezanja σ_o i σ_u su pozitivni,
 $\sigma_m \geq \sigma_a$; $0 \leq R < +1$

Ako se pretpostavi konstantno srednje naprezanje, cilj testa je odrediti izdržljivost ili čvrstoću na zamor σ_D . Čvrstoća na zamor σ_D karakterizira najveću amplitudu naprezanja σ_a koju uzorak može podnijeti neograničeno bez većih plastičnih deformacija. Puknuće uzorka se događa pri svim amplitudama naprezanja iznad σ_D . Za praktično određivanje σ_D može se

provesti Wöhlerov test, koji odražava ovisnost između veličine opterećenja i utvrđenog broja ciklusa do loma. Za plastiku, Wöhlerov test se provodi pri ciklusima napreznja koji dosežu $N \geq 10^7$.



Slika 4.25. Stanja opterećenja tijekom testa kontinuiranih vibracija [8]

Wöhlerove krivulje (S–N krivulje) određuju se testiranjem zamora savijanjem u jednom stupnju a mogu se napraviti i pomoću ispitivanja zamora na vlak ili tlak. Korištenjem ciklusa opterećenja s konstantnom amplitudom σ_a i konstantnim srednjim vrijednostima napreznja σ_m ili konstantnim omjerom napreznja s . Princip iza Wöhlerovih krivulja je prikazati odnos između amplitude cikličkog napreznja i broja ciklusa do kvara za određeni materijal.

Ispitivanje zamora na vlak uključuje izlaganje uzorka cikličkim vlačnim opterećenjima, pri čemu se uzorak naizmjenično rasteže i opušta. Amplituda napreznja σ_a i srednje napreznje σ_m se održavaju konstantnima te se bilježi broj ciklusa do kvara uzorka.

Ispitivanje zamora na savijanje uključuje ciklično savijanje uzorka, što ga izlaže naizmjeničnim vlačnim i tlačnim napreznjima.

Ispitivanje zamora na tlak uključuje izlaganje uzorka cikličkim tlačnim opterećenjima, što je manje uobičajeno, ali se i dalje koristi za određene materijale.

S–N krivulja može se prikazati kao dva segmenta linearne krivulje (slika 4.25). Prvi segment prikazuje linearnu regresiju čvrstoće na zamor pri niskom broju ciklusa u preferiranom

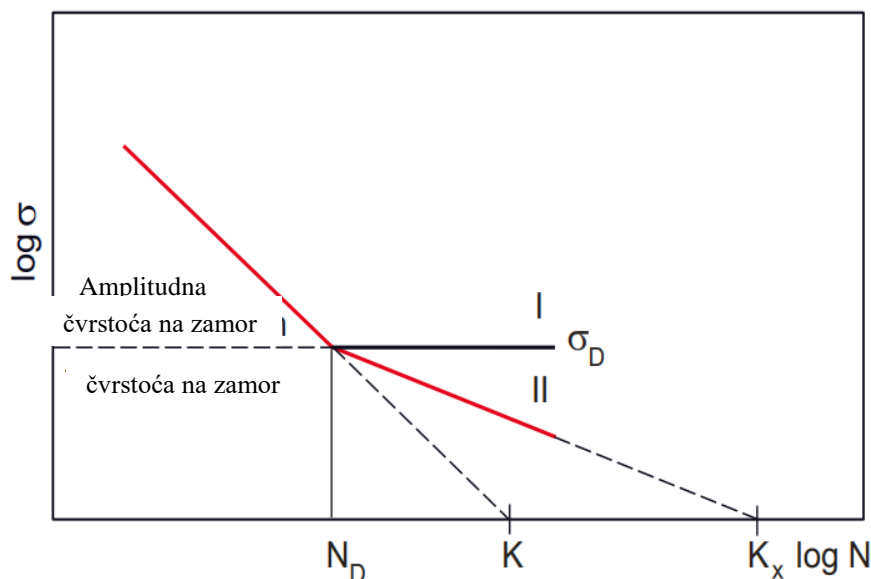
prikazu u logaritamskoj skali $\log \sigma - \log N$ ili polu logaritamskom prikazu $\sigma - \log N$. Drugi segment opisuje čvrstoću na zamor kao vrijednost naprezanja koja se održava za bilo koji zadani broj ciklusa naprezanja bez kvara (tip I) ili povezana s drugom, često sužavajućom S-N krivuljom (tip II). Za drugi segment vrijedi da je $K = \infty$ (tip I) i $K = K_x$ (tip II).

U literaturi [8], poznata je okolnost da parametar izdržljivosti σ_D općenito ne može biti određen za polimere, te da se stoga navodi čvrstoća na zamor pri niskom broju ciklusa σ_i . Stoga je određivanje ponašanja zamora površno ograničeno na što preciznije određivanje krivulje čvrstoće na zamor pri niskom broju ciklusa kao funkcije broja ciklusa naprezanja. Ovaj odnos se izražava kako je prikazano u izrazu 4.7.

$$N_i = N_D * \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.7)$$

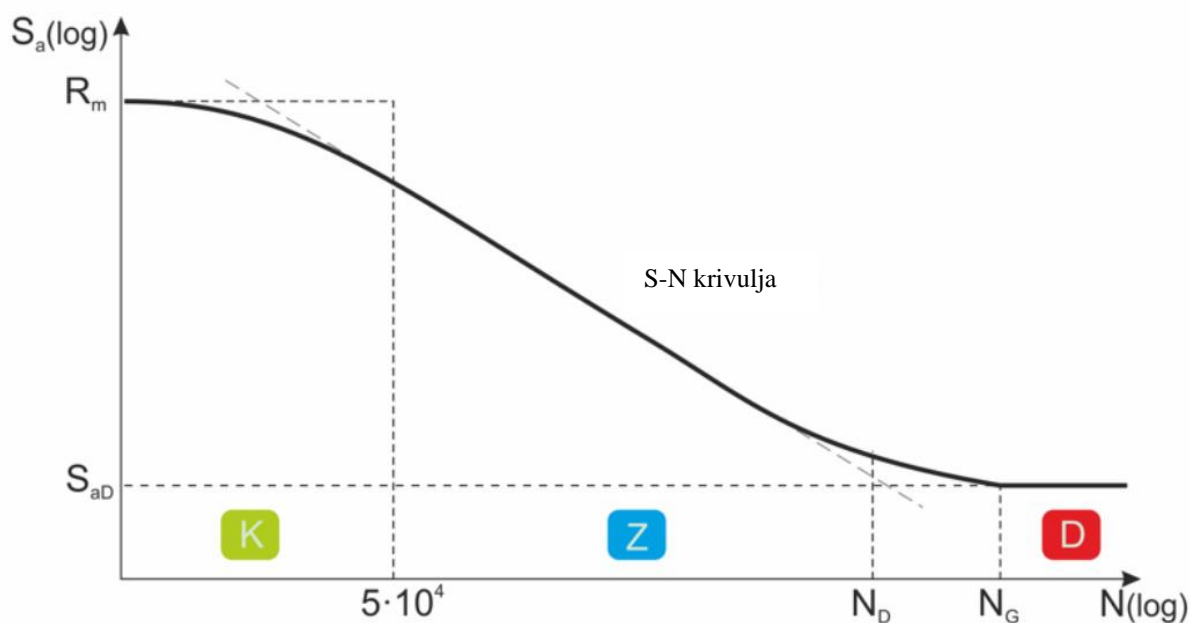
Pri čemu je:

- N_i broj ciklusa naprezanja
- N_D broj ciklusa naprezanja na prijelomu nagiba čvrstoće na zamor pri niskom broju ciklusa odnosno čvrstoća na zamor
- σ_i čvrstoća na zamor pri niskom broju ciklusa naprezanja
- σ_D rast krivulje čvrstoće na zamor pri niskom broju ciklusa u ovisnosti o broju ciklusa naprezanja



Slika 4.26. Linearizirana S-N krivulja u logaritamskom mjerilu [8]

Ukoliko prikažemo cijelu S-N krivulju dobijemo dijagram čiji je primjer dan na slici 4.27.

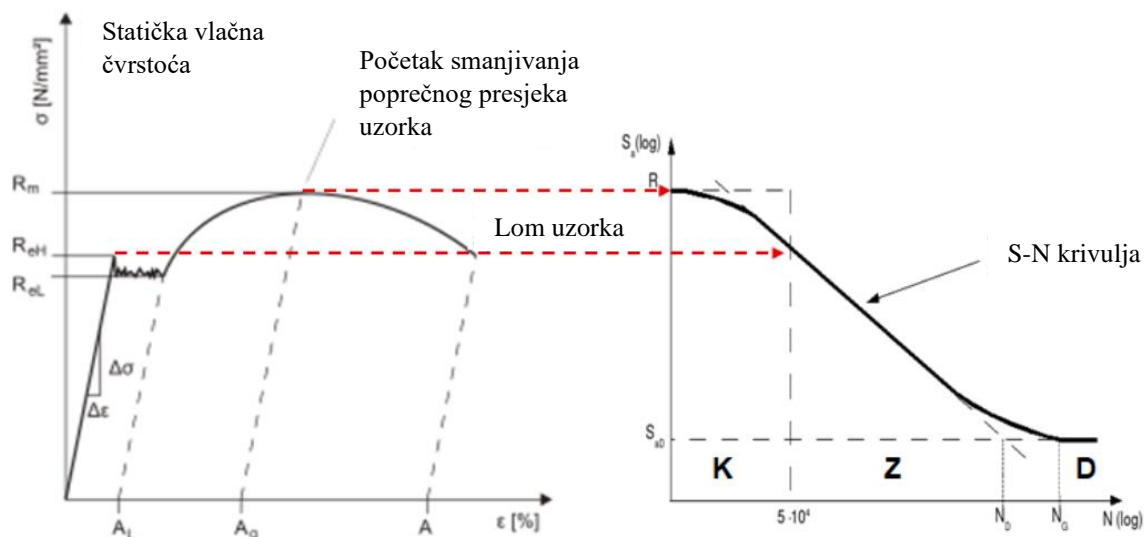


Slika 4.27. Primjer S-N krivulje [9]

Pri čemu je:

- R_m vlačna čvrstoća
- S_a amplituda naprezanja
- S_{aD} čvrstoća na zamor pri visokom broju ciklusa naprezanja
- N broj ciklusa koji uzorak može izdržati
- N_D rubni broj ciklusa naprezanja
- N_G prag broja ciklusa naprezanja
- K područje niskocikličke zamorne čvrstoće
- Z područje vremenske zamorne čvrstoće
- D područje visokocikličke zamorne čvrstoće

Raspon nisko-cikličkog zamora je ispod otprilike 10^4 do 10^5 ciklusa opterećenja. U ovom rasponu, materijali i komponente su opterećeni do te mjere da dolazi do plastičnih deformacija tijekom ciklusa, i materijal otkazuje u ranoj fazi.



Slika 4.28. Prikaz odnosa σ - ϵ dijagrama i S-N krivulje za niskociklički zamor [10]

Područje vremenske čvrstoće (Z) je raspon između 10^4 i $2 \cdot 10^6$ ciklusa (ovisno o materijalu). U području vremenske čvrstoće, uzorak uvijek doseže uvjet kriterija otkaza (npr. pukotina ili lom). Vremenska čvrstoća se određuje testom visoko-cikličkog zamora nakon kojega dobivamo rezultat kao broj ciklusa opterećenja pri jednoj amplitudi opterećenja.

Visoko-ciklički zamor (D) označava granicu naprezanja koju materijal može izdržati tijekom cikličkog opterećenja bez značajnih znakova zamora ili loma. Visoko-ciklički zamor određuje se tijekom testa visoko-cikličkog zamora pri kojem se utvrđuje ograničeni broj ciklusa N_G . Ako uzorak otkáže prije nego što dostigne taj ograničeni broj ciklusa, smatra se da je „otkazao“. Materijali koji tijekom testa visoko-cikličkog zamora izdrže više od 1.000.000 ciklusa bez loma smatraju se otpornima na zamor. Koncept visoko-cikličkog zamora rezultira značajno nižim dopuštenim naprezanjima u usporedbi sa statičkim konceptom.

Tijek S-N (Wöhlerove) krivulje u području visoko-cikličkog zamora podijeljen je u 3 tipa:

- Horizontalni tijek S-N krivulje u kojem je tražena visoko-ciklička čvrstoća ili trajna dinamička čvrstoća.
- Daljnji pad S-N krivulje s manjim nagibom
- Nakon početnog horizontalnog tijeka, S-N krivulja pada oko 10^8 ciklusa gdje unutarnji nedostaci uzrokuju pukotine ispod površine.

Ispitivanja zamora pri niskom broju ciklusa napreznja ili kvazi-statička ispitivanja ocjenjuju vijek trajanja ispitnih uzoraka proizvedenih 3D tiskom. Ispitivanje je provedeno u dva različita intervala opterećenja. Prvi interval opterećenja napravljen je sa 75% prosječnog maksimalnog opterećenja. U drugom intervalu uzorci su opterećeni sa 50% maksimalnog opterećenja te su oba testiranja temeljena na simulaciji praktične primjene u kojoj je materijal izložen nižem do višem opterećenju približavajući se granici maksimalne čvrstoće.

Prosječno maksimalno opterećenje dobiveno je kao aritmetička sredina maksimalnog napreznja dviju serija uzoraka izrađenih od istog materijala i obrađenih na istoj temperaturi. Iz prosječnog maksimalnog napreznja su izračunate vrijednosti opterećenja za 50 % i 75 % maksimalnog napreznja. Ovi podaci dani su u tablici 4.6 za PLA, odnosno u tablici 4.7 za ABS uzorke.

Tablica 4.6. Iznos maksimalne prosječne sile i njezini udjeli od 50 % i 75% za PLA plastiku

PLA	SERIJA		Maksimalna prosječna sila	Interval 1	Interval 2
	1	2		75%	50%
	F [N]	F [N]	F [N]	F [N]	F [N]
Bazni uzorak	2094	2134	2114	1586	1057
60 °C	2249	2210	2230	1673	1115
100 °C	2284	2259	2272	1704	1136

Tablica 4.7. Iznos maksimalne prosječne sile i njezini udjeli od 50 % i 75% za ABS plastiku

ABS	SERIJA		Maksimalna prosječna sila	Interval 1	Interval 2
	1	2		75%	50%
	F [N]	F [N]	F [N]	F [N]	F [N]
Bazni uzorak	1312	1286	1299	975	650
60 °C	1264	1272	1268	951	634
100 °C	1283	1275	1279	959	640

U testu nisko-cikličkog zamora materijala korišteni su uzorci standardne geometrije prethodno prikazani na slici 4.1. Stroj korišten za izvođenje testa je kidalica Shimadzu autograph AGS-X kapaciteta 10 kN. Kao i kod vlačnog testa, nakon pričvršćivanja uzorka u

glave kidalice, kidalicu je potrebno ponovno kalibrirati kako bi početno naprezanje bilo jednako nuli. Čeljusti kidalice su postavljene na udaljenost od 100 mm.

Pri testiranju uzorci su izloženi cikličkom opterećenju 75% i 50% od maksimalnog prema podacima danima u tablicama 4.6 (za PLA) i 4.7 (za ABS). Raspon amplituda glava kidalice namješten je na 2 mm dok je cikličko opterećenje provedeno pri brzini opterećenja od 10 mm/min u rasponu između 0 i 75%, odnosno 50% iznosa maksimalne sile dobivene vlačnim testom. Uzorci su izloženi cikličkom aksijalnom opterećenju na 1000 ciklusa opterećenja. Ukoliko je došlo do loma uzorka prije navršenih 1000 ciklusa opterećenja, zabilježen je broj ciklusa opterećenja. U slučaju kada je uzorak izdržao svih 1000 ciklusa opterećenja, na uzorku je proveden vlačni test te je zabilježena maksimalna sila koju je uzorak izdržao nakon testa zamora.

U slučaju opterećenja od 75 % gornje granice statičkog vlačnog testa ispitni uzorci nisu izdržali cikličko ispitivanje zamora. Ispitivanje je prekinuto prijevremenim uništenjem materijala i zabilježen je broj ciklusa do kvara. Rezultati testa dani su u tablicama 4.8 i 4.9.

Tablica 4.8. Rezultati testa nisko-cikličkog zamora za ABS

ABS	Uzorak:	75%			50%		
		Broj ciklusa	Maksimalna sila F [N]	Produljenje (mm)	Broj ciklusa	Maksimalna sila F [N]	Produljenje (mm)
Bazni uzorak	1	75	-	-	1000	1143	3,00
Bazni uzorak	2	102	-	-	1000	1226	3,06
60 °C	1	103	-	-	1000	842	1,85
60 °C	2	103	-	-	1000	758	1,74
100 °C	1	112	-	-	831	-	-
100 °C	2	91	-	-	527	-	-

Iz rezultata testa pri 75 % opterećenja za ABS je vidljivo da su uzorci izdržali oko 100 ciklusa nakon čega je došlo do prekida testa uslijed puknuća epruveta. PLA uzorci su pri 75 % opterećenja izdržali oko 500 ciklusa.

Tablica 4.9. Rezultati testa nisko-cikličkog zamora za PLA

PLA	Uzorak:	75%			50%		
		Broj ciklusa	Maksimalna sila F [N]	Produljenje (mm)	Broj ciklusa	Maksimalna sila F [N]	Produljenje (mm)
Bazni uzorak	1	457	-	-	1000	2052	4,70
Bazni uzorak	2	418	-	-	1000	1641	3,80
60 °C	1	448	-	-	1000	2022	2,96
60 °C	2	466	-	-	1000	1939	2,60
100 °C	1	552	-	-	1000	2315	2,84
100 °C	2	587	-	-	1000	2037	2,24

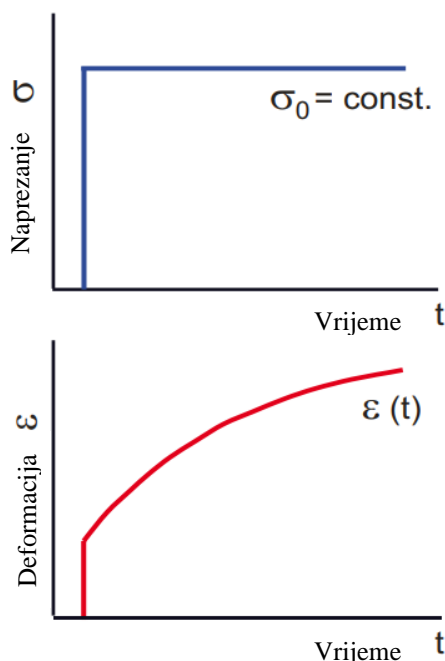
4.3. Puzanje

Za pouzdanost u projektiranju dugotrajno opterećenih komponenti i proizvoda od polimera, potrebne su informacije o ponašanju materijala pod dugotrajnim statičkim opterećenjem. Dugotrajni eksperimenti mogu se izvoditi pod naprezanjem zatezanja, tlačenja i savijanja kao funkcije temperature opterećenja i izloženosti okolišu. Ove metode istraživanja posebno su važne za polimere, jer ti materijali jasno pokazuju nelinearno viskozno-elastično ponašanje čak i na sobnoj temperaturi.

Nagla primjena statičkog opterećenja σ uzrokuje promjenu oblika plastike, ovisno o njezinoj specifičnoj krutosti, isprva na linearno-elastičan način. Na konstantnoj razini opterećenja i kako se vrijeme opterećenja povećava, komponenta linearno-elastične deformacije preklapa se s drugom, vremenski ovisnom komponentom deformacije, tj. viskoelastičnom deformacijom (deformacija zbog puzanja; slika 4.29). Ponašanje puzanja (hladno tečenje) kvalitativno opisuje ukupnu vremenski i stresno ovisnu deformaciju; kvantitativne karakteristične funkcije materijala određuju se pomoću krivulja puzanja.

U testu zadržavanja ili puzanja promjena deformacije s vremenom $\varepsilon(t)$ pri vrijednosti $\sigma_0 = \text{konst.}$ kao rezultat nagle promjene naprezanja koristi se za određivanje vrijednosti usklađenosti $C(t)$:

$$C(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (4.8)$$

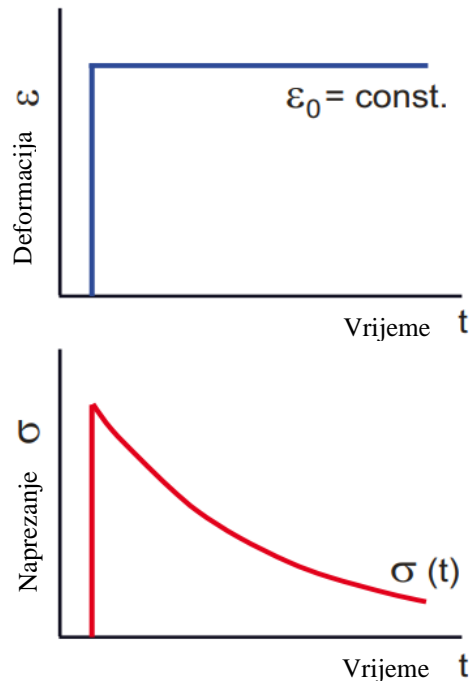


Slika 4.29. Deformacije uslijed puzanja [8]

Analogno tome, postupni, vremenski uvjetovani pad napreznja događa se pri danoj konstantnoj deformaciji ε kojoj je pridružena određena vrijednost napreznja, nazvana relaksacija napreznja (slika 4.30). U relaksaciji napreznja mjeri se promjena napreznja s vremenom $\sigma(t)$ pri $\varepsilon_0 = \text{konst.}$ uzrokovana naglom promjenom deformacije. Iz toga se dobiva materijalni parametar nazvan vremenski ovisni modul elastičnosti $E(t)$:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (4.9)$$

Dakle, statičko dugotrajno ponašanje plastičnih komponenti karakterizirano je zadržavanjem i relaksacijom napreznja određenih molekularnom strukturom. Zbog razlika u strukturi, npr. za termoplaste s amorfnom ili polu kristalnom strukturom i trodimenzionalnim umrežavanjem u termosetima, postoje značajne razlike u statičkom dugotrajnom ponašanju među pojedinim skupinama materijala [8].

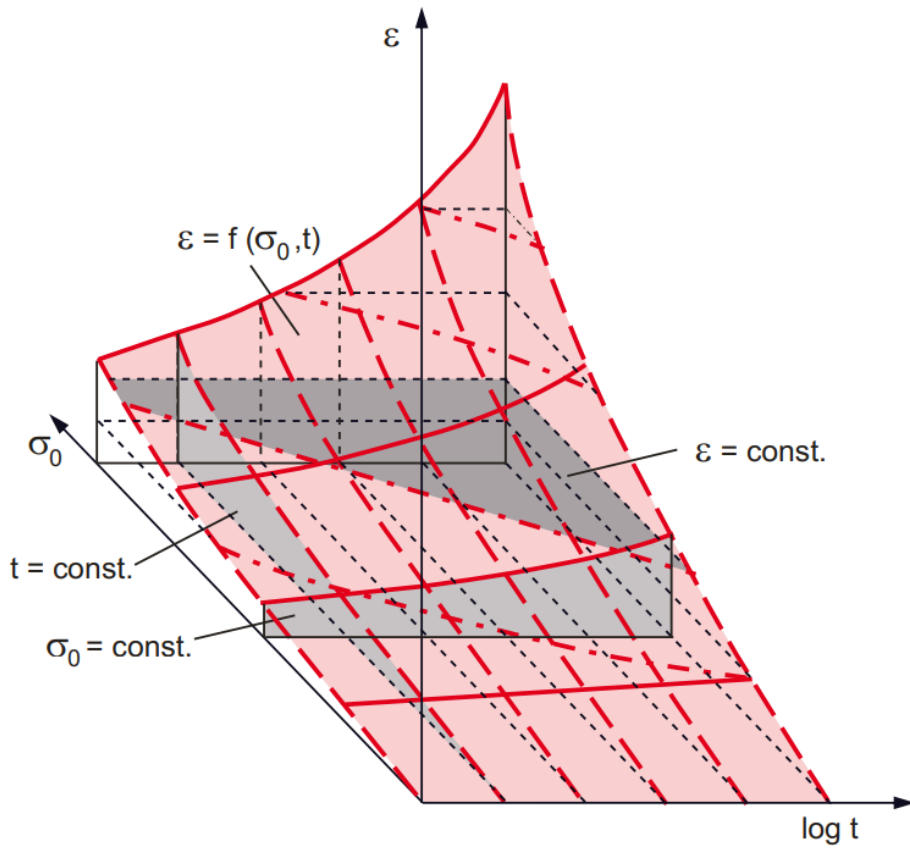


Slika 4.30. Relaksacija naprezanja [8]

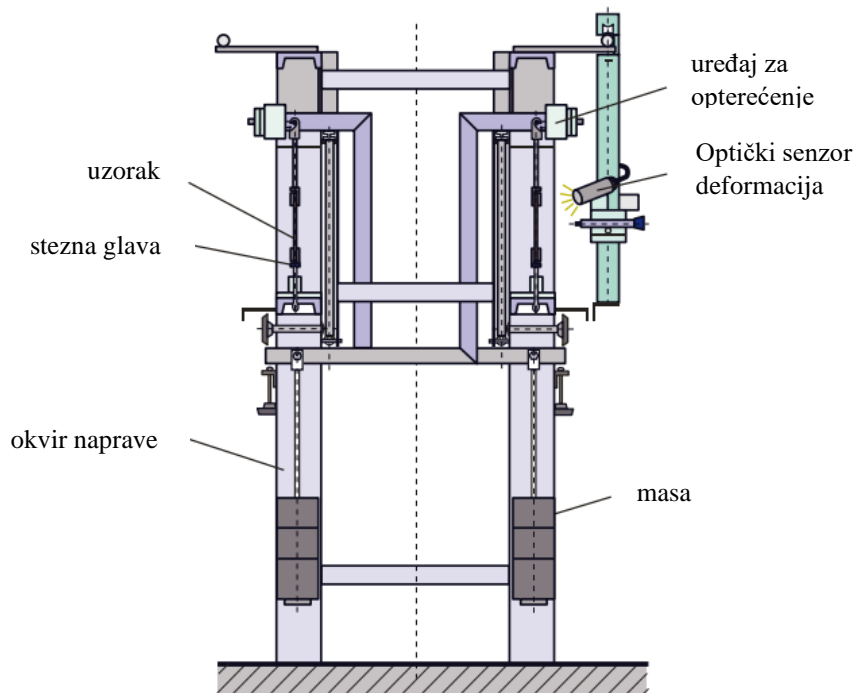
Neuspjeh materijala u obliku loma može se dogoditi kao rezultat vremenski ovisne aktivnosti puzanja. Međutim, mnogo prije loma uslijed puzanja, trajnost ili vijek trajanja mnogih plastičnih komponenti ograničena je pojavom prekomjernih vremenski ovisnih deformacija puzanja koje mogu dovesti do neprihvatljivih odstupanja u obliku i dimenzijama, te tako do gubitka funkcionalnosti komponente.

Cilj testova puzanja je uspostaviti više-parametarski odnos između naprezanja, deformacije i vremena, koji se može prikazati u obliku trodimenzionalne ilustracije (slika 4.31). Odnos $\varepsilon = f(\sigma_0, t)$ opisan kao objektivna funkcija eksperimenata puzanja formira prostornu, trodimenzionalnu ravninu u dijagramu deformacije-naprezanja-vremena, ilustrirajući složenu interakciju parametara pod opterećenjem i izmjerenih parametara.

Ponašanje puzanja plastike određuje se eksperimentalno testom zateznog puzanja pod statičkim jednoosnim zateznim opterećenjem. Glavne komponente opreme za testiranje puzanja su baza s uređajima za stezanje uzoraka, sustav opterećenja i uređaj za mjerenje deformacija (slika 4.32).



Slika 4.31. Ponašanje naprezanja-deformacije i vremena u testu puzanja [8]



Slika 4.32. Crtež strukture naprave za testiranje puzanja [8]

Prilikom izvođenja eksperimenata puzanja, posebnu pažnju treba posvetiti da se sila uvodi bez udarca u fazi opterećenja, da se deformacija uzorka mjeri kontinuirano i bez kontakta, te da se uvjeti okoline održavaju konstantnima tijekom cijelog razdoblja ispitivanja. Oprema mjeri povećanje vremenski ovisnog produljenja:

$$\Delta L(t) = L(t) - L_0 \quad (4.10)$$

Iz kojega se izračunava deformacija puzanja $\varepsilon(t)$:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L(t)}{L_0} \times 100 = \frac{L(t) - L_0}{L_0} \times 100 (\%) \quad (4.11)$$

Vrijednosti deformacije ovisne o vremenu dobivene testom puzanja pod konstantnim opterećenjem (naprezanjem) nazivaju se krivulje puzanja, iz kojih se mogu izvesti odnosi prikazani na slici 4.33:

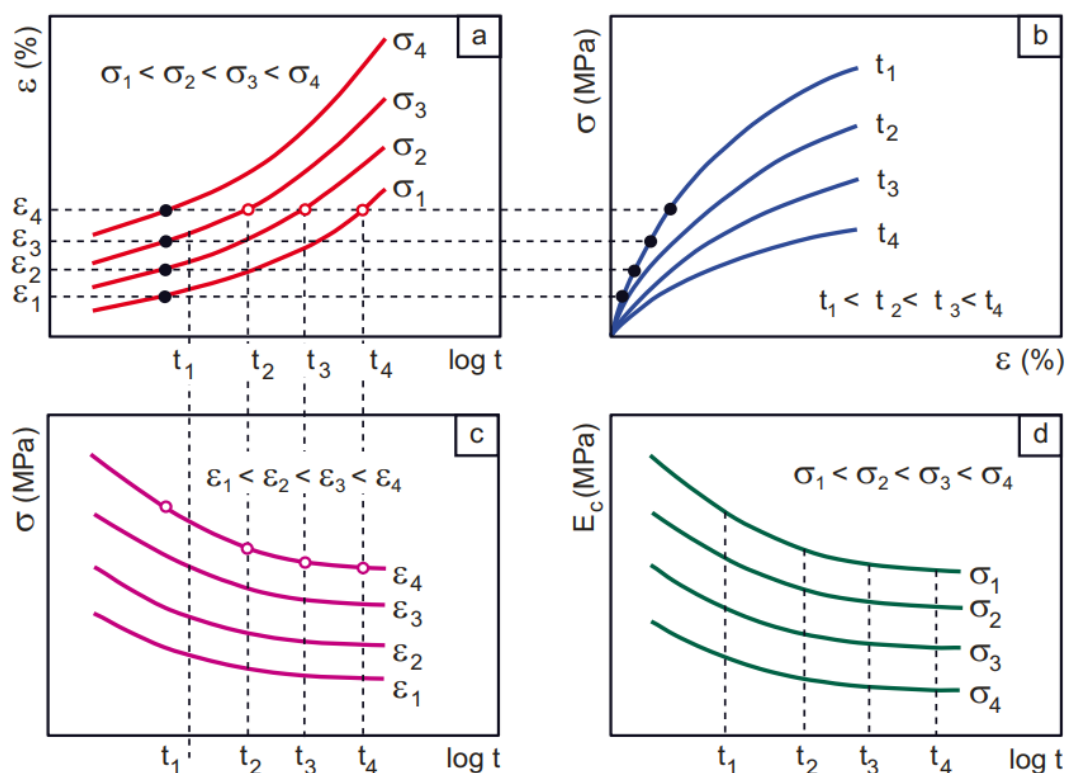
- Krivulje puzanja (dijagrami puzanje–vrijeme) $\varepsilon = f(t)$ uz $\sigma_0 = \text{konst.}$ ($\sigma_1, \sigma_2, \dots$) pružaju osnovu za izvođenje dijagrama puzanja i izohronih σ – ε dijagrama (slika 4.33a). Krivulje puzanje–vrijeme su linearne kada je opterećenje unutar linearno-viskoelastičnog raspona.
- Izohroni dijagrami naprezanje–deformacija rezultat su krivulja puzanje–vrijeme dodavanjem okomitih linija na određenim vremenima (slika 4.33b). Svaka od ovih σ – ε krivulja odgovara određenom razdoblju opterećenja, npr., 1, $10^2, 10^4$ sati.
- Dijagrami puzanja $\sigma = f(t)$ za $\varepsilon = \text{konst.}$ ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$) rezultat su polja puzanje–vrijeme uz dodavanje horizontalnih rezova pri određenim deformacijama (slika 4.33c). U ekstremnim slučajevima, krivulja vrijeme–naprezanje je krivulja puzanja do loma.

Modul puzanja $E_c(t)$ uvodi se kako bi se opisalo vremenski ovisno ponašanje materijala plastike (slika 4.33d). Izvodi se kao kvocijent primijenjenog naprezanja u početnom stanju σ_0 i vremenski ovisne deformacije $\varepsilon(t)$:

$$E_c(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} \quad (4.12)$$

Brzina puzanja $d\varepsilon/dt$ je dodatni parametar koji se koristi za opisivanje statičkog dugotrajnog ponašanja, a izračunava se iz kvocijenata povećanja deformacije i vremenske razlike:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_{t_1} - \varepsilon_{t_2}}{t_1 - t_2} \quad (4.13)$$



Slika 4.33. Dijagram funkcionalne veze u testu puzanja: krivulje puzanja (dijagrami puzanja–vrijeme) (a), izohroni dijagrami naprezanja–deformacije (b), dijagram puzanja (krivulje vremena–naprezanja) (c) i krivulje modula puzanja (d) [8]

Kako bi se postigao navedeni cilj određivanja vrijednosti materijala za projektiranje, standard ispitivanja ISO 899-1 preporučuje ispitivanje u “širokom rasponu naprezanja, vremena i uvjeta okoline”. Ispunjavanje ove direktive treba uzeti u obzir prilikom koncipiranja skupih i vremenski intenzivnih eksperimenata puzanja. To se može postići ako se daje prednost velikom broju testnih naprezanja sa pojedinačnim uzorcima nad izvođenjem paralelnih testova pri jednom iznosu testnog naprezanja.

Testovi puzanja moraju biti koncipirani na način da uzorci normalno prežive razdoblje ispitivanja od najmanje 103 sata bez loma. Kao referentna vrijednost se preporučuje 30 do 50 % kratkotrajne vlačne čvrstoće, pri čemu je potrebno definirati nekoliko naprezanja ispod ove razine naprezanja. Takav postupak povećava informativnu vrijednost eksperimenata puzanja, ukoliko se istovremeno provodi rigorozna evaluacija testa na temelju funkcionalnih odnosa

prikazanih na slici 4.33. Za opisivanje ponašanja puzanja u mjerenom području razvijeni su različiti fizičko-matematički modeli od kojih se najčešće primjenjuje Findleyjev zakon potencije:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + mt^n \quad (4.14)$$

Pri čemu su m i n konstante materijala. Findley-ev zakon se temelji na opisu vremenske ovisnosti eksperimentalno određenih mjernih podataka. Osim Findley-eva zakona postoji drukčiji pristup koji koristi četiri parametra:

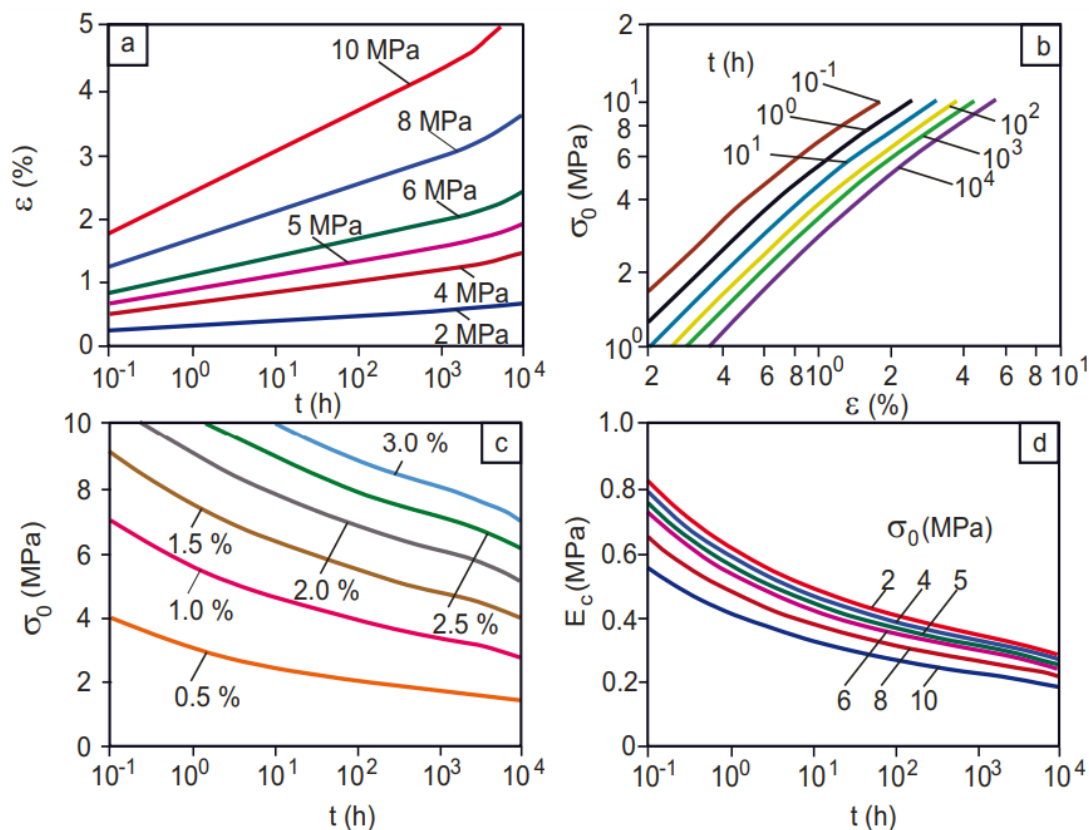
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_G}{E} \left(1 + \frac{t}{a}\right)^n \sinh \frac{\sigma}{\sigma_G} \quad (4.15)$$

Pri čemu je:

- E, σ_G parametri materijala za komponentu elastične deformacije
- a, n parametri materijala
- t period testiranja

Izraz 4.15 pretpostavlja aproksimaciju ovisnosti naprežanja izohronih dijagrama naprežanje-deformacija dobivenih u eksperimentu te zatim određuje vremensku ovisnost parametara. Vrijednosti ponašanja puzanja dobivene na ovaj način slažu se s obzirom na ovisnosti s originalnim, eksperimentalno dobivenim mjernim podacima, u kojima su također uključene vrijednosti modula puzanja puzanja $E_c(t)$. Slika 4.34 ilustrira ovaj postupak koristeći kao primjer evaluaciju sustavnih eksperimenata puzanja s polipropilenom (PP). Ekstrapolacija podataka puzanja za vremenska razdoblja veća ili jednaka 10 godina zahtijeva osnovu eksperimentalno osiguranih krivulja puzanja za mjerna vremena na više od 10^4 sati. Međutim, takvi eksperimenti zateznog puzanja općenito pretpostavljaju sobnu temperaturu ili standardnu atmosferu i primjenjuju se na odabrane plastike. U uvjetima standardne atmosfere, ekstrapolacijska vremena do dvadeset godina smatraju se sasvim realističnim, naravno, pod uvjetom da ponašanje materijala nije značajno pogođeno starenjem. Mnogo kritičnije pitanje je koliko su važna ograničenja ekstrapolacije za dugoročno mehaničko ponašanje pod istovremenim djelovanjem temperature i/ili okolišnog opterećenja zbog strukturnih promjena materijala u slučajevima difuzije, hidrolize, itd. U takvim slučajevima, očekivano opterećenje na plastične komponente mora biti osigurano eksperimentima puzanja pod što realnijim uvjetima. Za ekstrapolaciju, eksperimenti puzanja preko ispitnih razdoblja $t \geq 2000$ sati

smatraju se obveznima (slika 4.35), pretpostavljajući, naravno, da ponašanje materijala nije značajno pogodoeno starenjem.

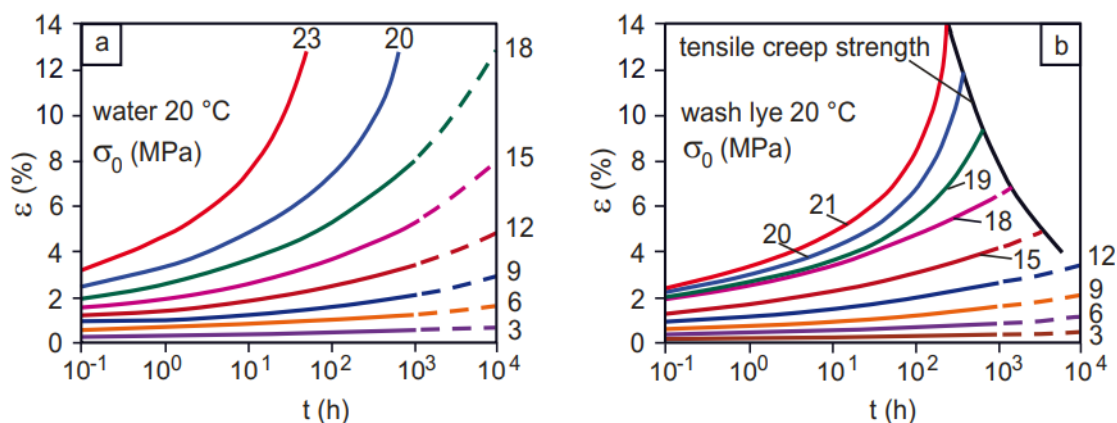


Slika 4.34. Ponašanje PP pri zateznom puzanju pod različitim opterećenjima: krivulje puzanja (a), izokroni dijagrami naprezanja i deformacije (b), dijagram puzanja (c) i krivulje modula puzanja (d) [8]

Kako bi se kvantificirao potencijalni utjecaj uvjeta okoliša, temperature i okoline, preporučljivo je, paralelno s eksperimentima puzanja, pohraniti mehanički neopterećene uzorke (test uranjanja) i testirati ih s obzirom na mehaničke i/ili promjene fizikalno-termalnih svojstava u odgovarajuće velikim vremenskim intervalima.

Za primjenu podataka o materijalu dobivenih iz eksperimenata puzanja, obično se dovoljnim smatra raspon deformacije do $\varepsilon \leq 5\%$, a u posebnim slučajevima $\varepsilon \leq 10$. Za mnoge polimere, osobito za polukristalne termoplaste, ove vrijednosti deformacije leže znatno ispod granice kidanja i čvrstoće prijeloma, tako da testovi puzanja ne zahtijevaju postizanje loma

materijala. Testovi puzanja s lomom predstavljaju posebnu vrstu testova puzanja za određivanje čvrstoće na puzanje pri vlaku. Oni bi trebali biti zamišljeni zasebno od eksperimenata puzanja i po mogućnosti se provoditi na plastikama s niskim vlačnim rastezanjem pri lomu, npr. na termosetskim materijalima za kalupljenje. Mjerenje deformacije nije potrebno; vrijednost koja se mjeri je vrijeme do loma pod opterećenjem.



Slika 4.35. Krivulje puzanja polipropilena (PP) pod opterećenjem u okolišu vode iz slavine (a), otopini deterdženta (b) [8]

Trajanje testa puzanja na PLA i ABS uzorcima testiranim za potrebe ovoga rada bilo je 24 sata. Kao i kod vlačnoga testa i testa nisko cikličkog zamora, uzorci su postavljeni u kidalicu i pričvršćeni na pomične glave iste. Čeljusti su razmaknute na 100 mm te rekalibrirane nakon pričvršćenja uzoraka kako bi se izbjegla moguća naprezanja stvorena uslijed stezanja uzorka u čeljusti. Pomak je mjeren preko pomaka čeljusti kidalice. Rezultati vlačnog testa za PLA opterećen sa 50 % maksimalnog opterećenja dani su u tablici 4.10.

Tablica 4.10. Rezultati testa kratkotrajnog puzanja za PLA pri 50 % maksimalnog opterećenja na 24h

PLA	F_{max} [N]	σ_{max} [MPa]	ΔL [mm]
Bazni uzorak	1057	26,43	3,45
60 °C	1114	27,85	3,47
100 °C	1135	28,38	1,62

Istim postupkom kao za PLA, dobiveni su rezultati puzanja za ABS prikazani u tablici 4.11.

Tablica 4.11. Rezultati testa kratkotrajnog puzanja za ABS pri 50 % maksimalnog opterećenja na 24h

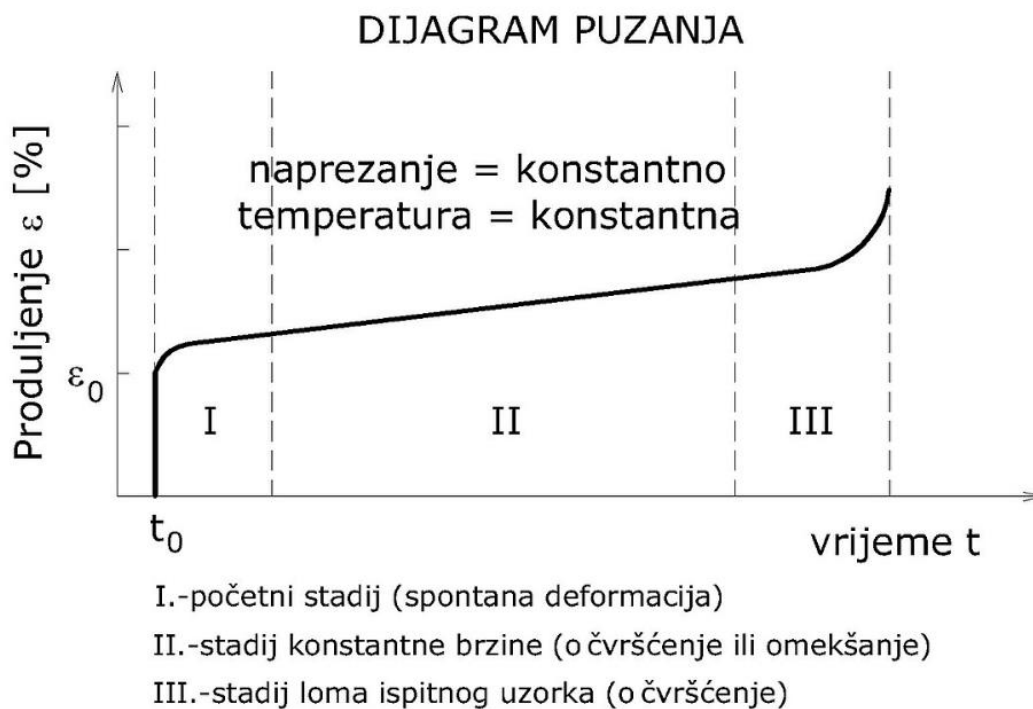
ABS	F_{max} [N]	σ_{max} [MPa]	ΔL [mm]
Bazni uzorak	650	16,25	1,39
60 °C	634	16,17	1,67
100 °C	640	16,13	1,87

Pri čemu je:

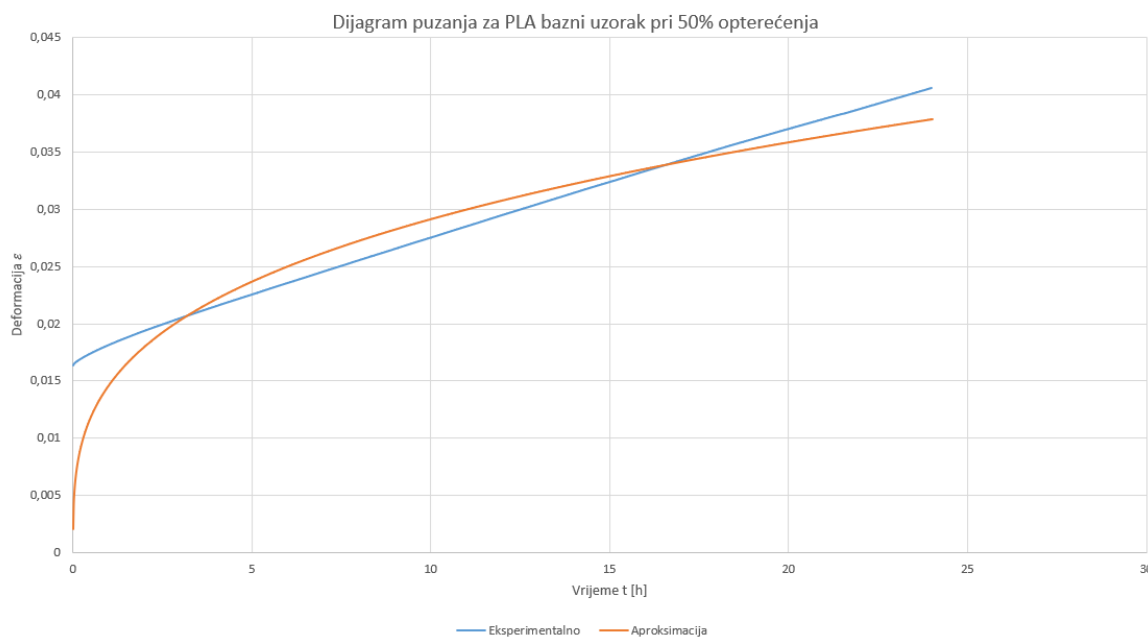
- F_{max} maksimalna sila kojoj su izloženi uzorci te sila koja također odgovara 50 % intenziteta maksimalne vlačne sile dobivene vlačnim testom za danu vrstu uzorka
- σ_{max} maksimalno naprezanje u uzorku tijekom testa puzanja
- ΔL maksimalno produljenje uzorka koje također odgovara maksimalnom pomaku čeljusti kidalice

Za vrijeme trajanja testa, kidalica bilježi pomak čeljusti i proteklo vrijeme iz kojih je moguće dobiti dijagrame puzanja. Dijagram puzanja sastoji se od tri stadija kako je prikazano na slici 4.36. U prvom stadiju pri početku testiranja dolazi do elastične deformacije ili produljenja ε_0 , nakon čega se produljenje ε stabilizira i ostaje konstantno tijekom drugog stadija. Kada ispitni uzorak uđe u treći stadij, produljenje iz konstantnog prelazi u eksponencijalni rast do loma samoga uzorka.

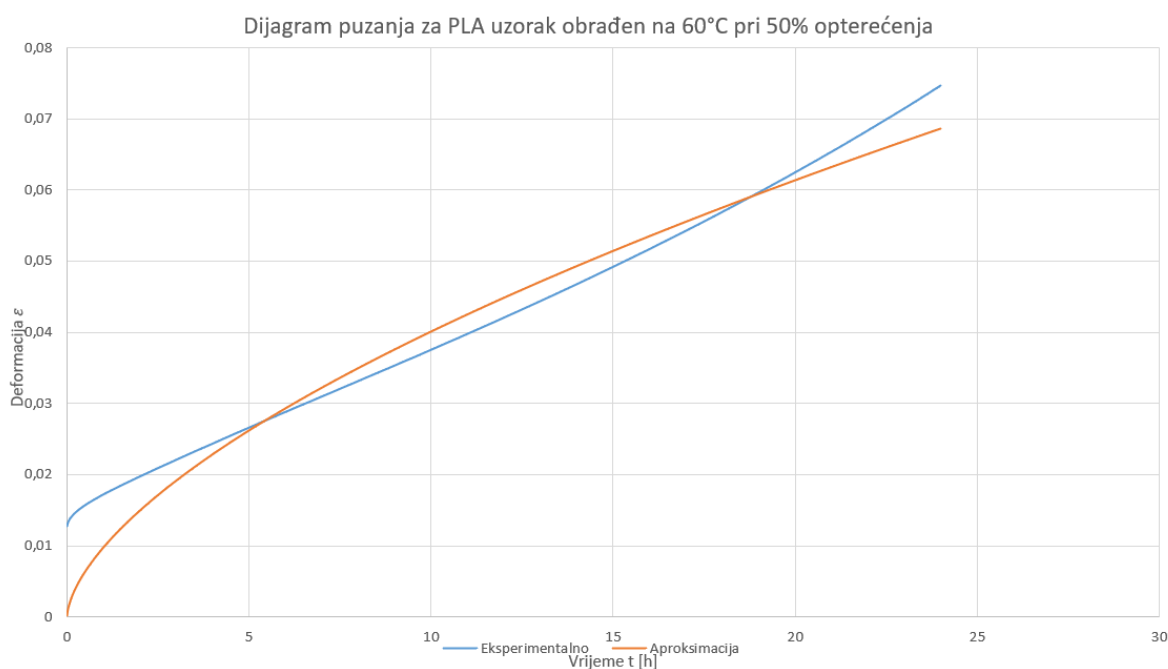
Dijagrami puzanja dobiveni testiranjem tri uzorka PLA plastike (bazni uzorak, uzorak termički obrađen na 60 °C i uzorak termički obrađen na 100 °C) prikazani su na slikama 4.37, 4.38 te 4.39.



Slika 4.36. Dijagram puzanja s označenim stadijima puzanja [11]



Slika 4.37. Dijagram puzanja za bazni uzorak PLA pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



Slika 4.38. Dijagram puzanja za PLA uzorak obrađen na 60 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h

Osim grafova, kidalica zapisuje rezultate testiranja tablično (slika 4.11.). Iz tih rezultata se izračunava naprezanje prema jednadžbi 4.2 koje je u slučaju testa puzanja konstantno, i deformacija prema jednadžbi 4.3. Pomoću ovih parametara moguće je postaviti jednadžbu puzanja u obliku Bailey – Nortonovog zakona puzanja:

$$\varepsilon_c = a \times \sigma^b \times t^d \quad (4.16)$$

Pri čemu je:

- ε_c – brzina deformacije puzanja
- a – konstanta materijala
- σ – primijenjeno naprezanje
- b – eksponent naprezanja
- t – vrijeme testiranja
- d – eksponent vremena koji u sebi sadrži energiju aktivacije puzanja i temperaturu

Bailey - Nortonov zakon puzanja je konstitutivna jednadžba koja opisuje vremenski ovisnu deformaciju materijala pod konstantnim opterećenjem ili naprezanjem. Ovaj zakon se koristi

za razumijevanje i predviđanje ponašanja različitih materijala poput metala i polimera koji pokazuju značajno puzanje.

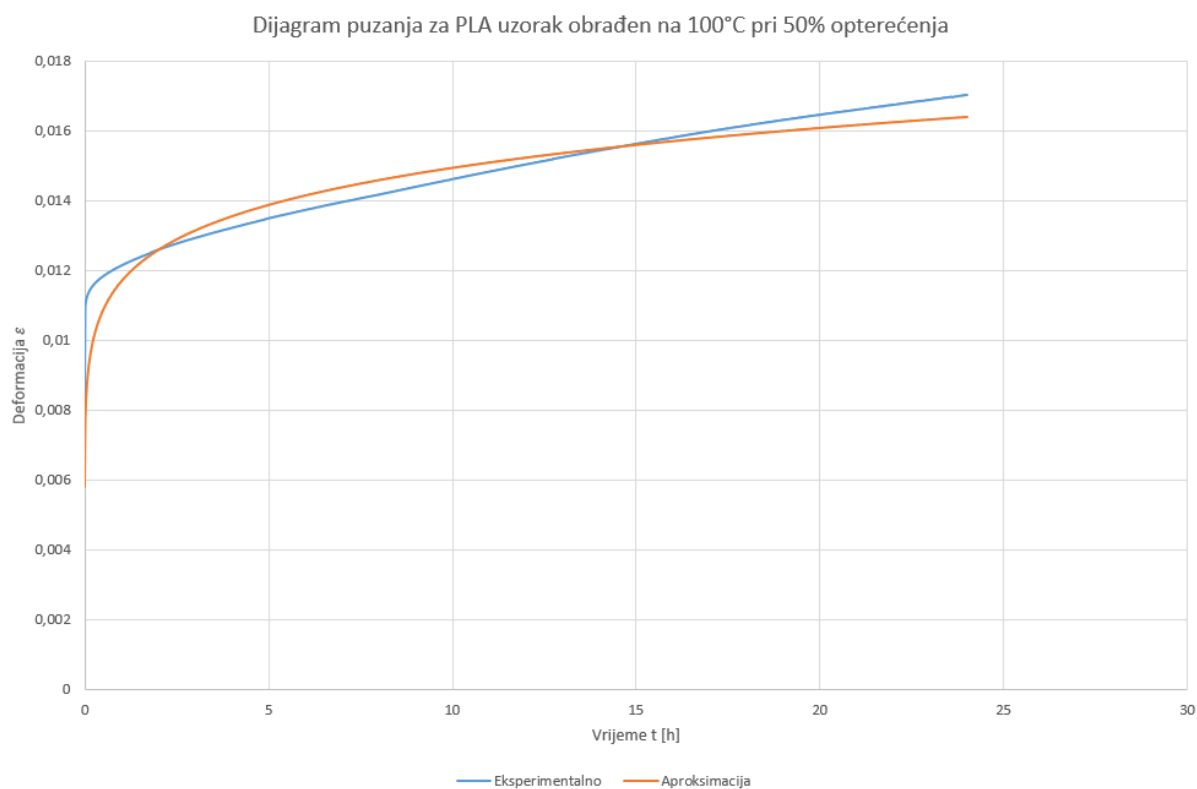
Puzanje se može definirati kao proces gdje materijal pod stalnim opterećenjem ili naprezanjem s vremenom postupno deformira. Bailey - Nortonov zakon opisuje ovu deformaciju koristeći nekoliko ključnih parametara: brzinu deformacije puzanja ϵ_c , konstantu materijala a , primijenjeno naprezanje σ , eksponent naprezanja b , energiju aktivacije i i temperaturu sadržane u koeficijentu d . Brzina deformacije ϵ_c puzanja je brzina kojom se materijal mijenja tijekom vremena, a konstanta materijala a ovisi o svojstvima i mikrostrukтури samog materijala.

Eksponent naprezanja b je važan jer pokazuje koliko je brzina puzanja osjetljiva na promjene u naprezanju. Veće vrijednosti ovog eksponenta ukazuju na brže povećanje brzine puzanja s rastućim naprezanjem. Energija aktivacije predstavlja energetska barijeru koju atomi unutar materijala moraju savladati da bi došlo do puzanja. Temperatura također igra ključnu ulogu, jer se s njenim povećanjem brzina puzanja eksponencijalno povećava.

Koeficijenti a , b i d iz Bailey – Nortonovog zakona za potrebe ovog rada dobiveni su eksperimentalno. Za dobivanje ovih parametara korišten Microsoft Excel. Iz prethodno izračunatih vrijednosti naprezanja i deformacije postavljena je jednačba Bailey - Nortonovog zakona puzanja, a inicijalni parametri a , b i d su pretpostavljeni iskustveno.

U idućem koraku izračunata je kvadratna suma reziduala, odnosno razlike između eksperimentalno dobivene deformacije i deformacije dobivene iz Bailey - Nortonovog zakona. Kvadratna suma reziduala se koristi kao cilj optimizacijske metode Excel-ovog rješavača. Naime, nakon što se pretpostave vrijednosti parametara a , b i d , na grafu se crtaju jedna krivulja puzanja od eksperimentalno dobivenih podataka i jedna krivulja puzanja modelirana prema Bailey - Nortonovom zakonu. Cilj ove optimizacije jest minimizirati razliku između eksperimentalno dobivene krivulje puzanja i one dobivene pomoću Bailey - Nortonove jednačbe.

Kako bi se to postiglo, u Excel-ovom rješavaču se vrijednost kvadratne sume reziduala postavlja kao cilj minimizacijske funkcije, dok se za varijable daju vrijednosti parametara a , b i d .



Slika 4.39. Dijagram puzanja za PLA uzorak obrađen na 100 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h

Excel-ov rješavač zatim iteracijski varira pretpostavljene vrijednosti parametara a , b i d dok se kvadratna suma reziduala ne minimizira, odnosno dok se eksperimentalna i aproksimirana krivulja ne poklope na najbolji mogući, ali izvedivi način.

Tablica 4.12. Vrijednosti a , b i d parametara puzanja za PLA pri 50 % maksimalnog opterećenja na 24h

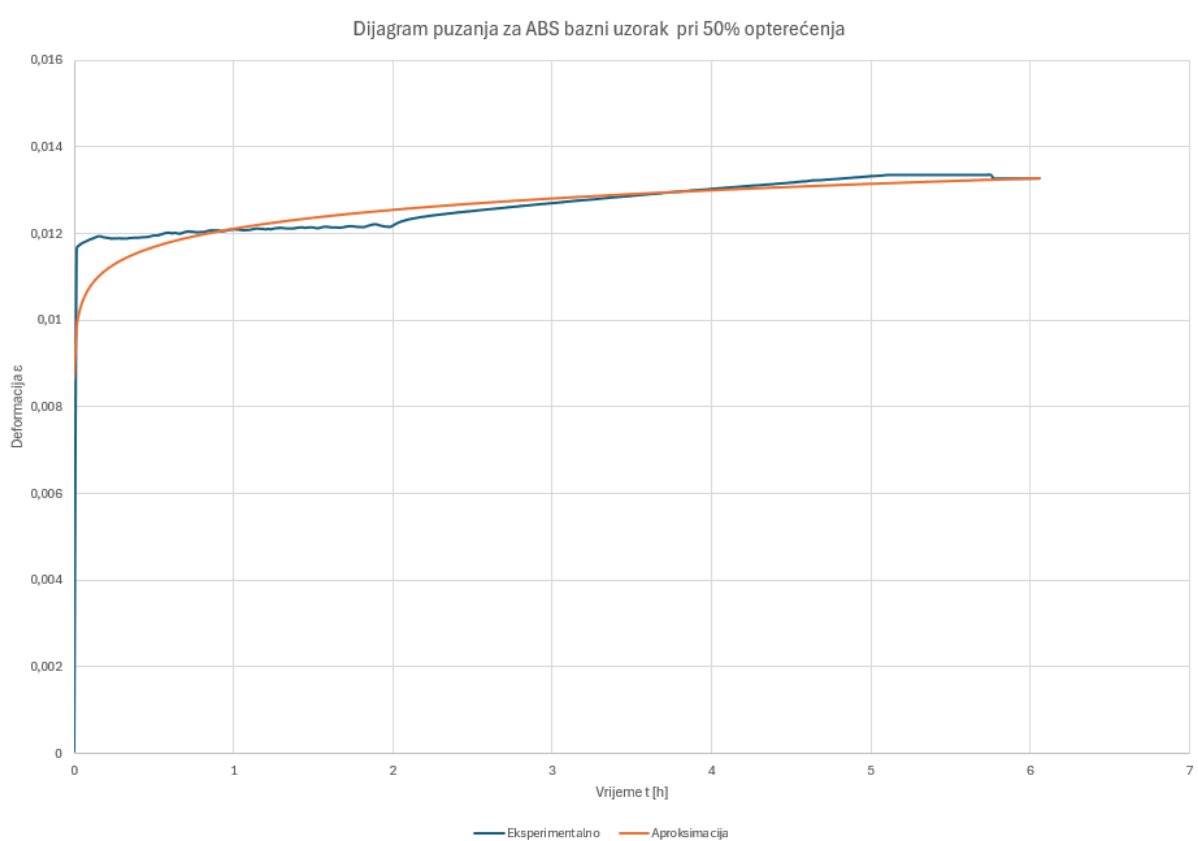
PLA 50 %	a	b	d
Bazni uzorak	0,00014	1,43121	0,29919
60°C	$1,63 \times 10^{-5}$	1,948393	0,613912
100°C	0,00013	1,36045	0,10646

Vrijednosti a , b i d parametara puzanja za ABS pri 50 % maksimalnog opterećenja dobivene su na isti način te su prikazane u tablici 4.13.

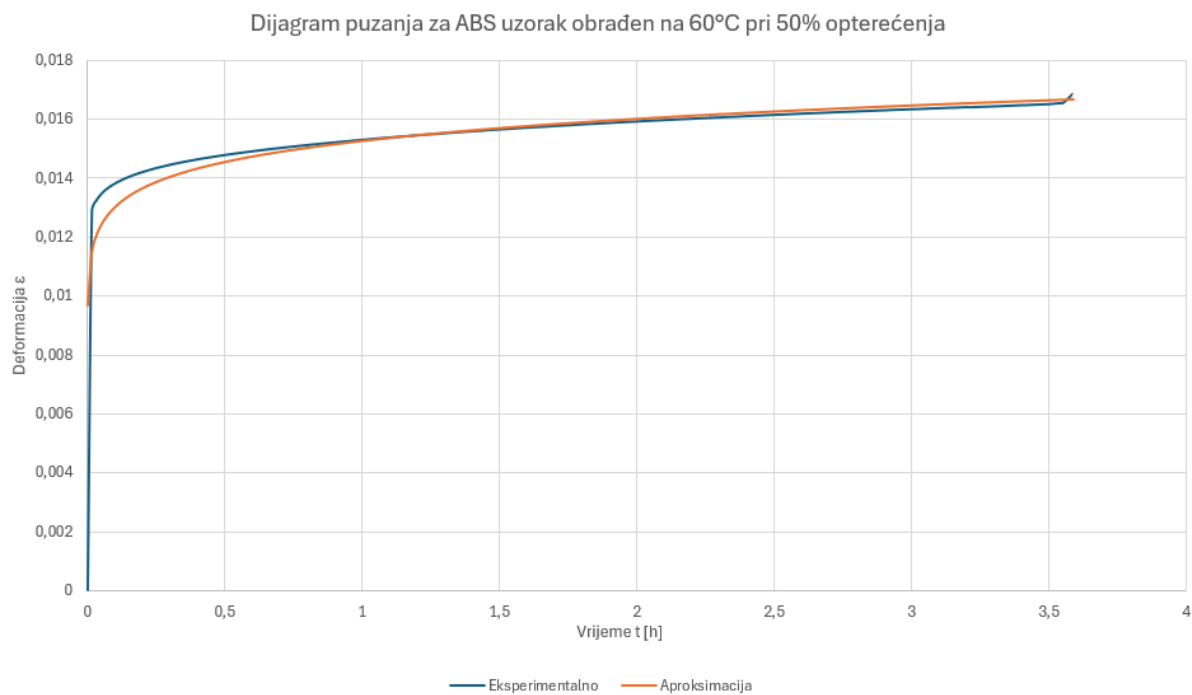
Tablica 4.13. Vrijednosti a, b i d parametara puzanja za ABS pri 50 % maksimalnog opterećenja na 24h

ABS 50 %	a	b	d
Bazni uzorak	0,00037	1,2561	0,05119
60°C	0,00012	1,74007	0,06938
100°C	0,00038	1,35787	0,08838

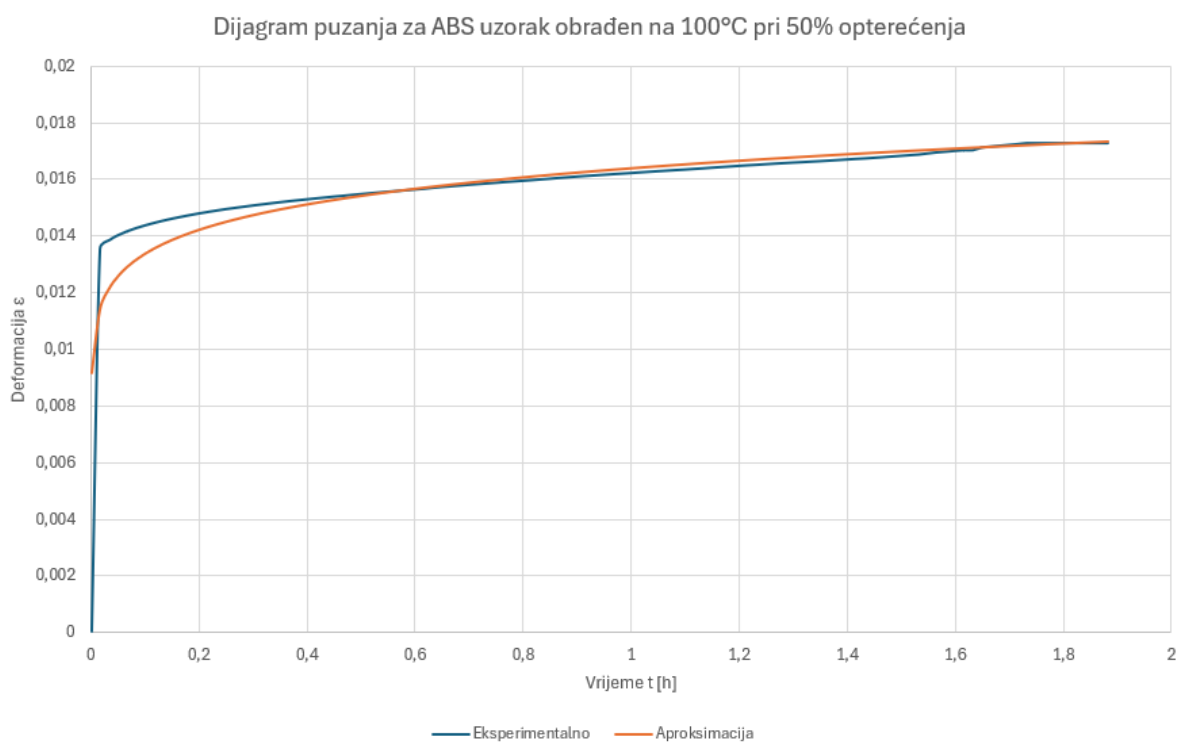
Iz ovih vrijednosti parametara puzanja dobiveni su aproksimirani dijagrami puzanja, koji su zajedno s onima eksperimentalno dobivenima prikazani na slikama 4.40, 4.41 i 4.42.



Slika 4.40. Dijagram puzanja za bazni uzorak ABS pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



Slika 4.41. Dijagram puzanja za ABS uzorak obrađen na 60 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



Slika 4.42. Dijagram puzanja za ABS uzorak obrađen na 100 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h

5. NUMERIČKA ANALIZA

Kao alat za numeričku analizu koristiti će se FEMAP i NX Nastran, koji su softverski alati korišteni u inženjeringu za analizu konačnih elemenata (MKE) i simulacije. Uobičajeno se koriste u industrijama poput zrakoplovstva, automobilske industrije i strojarstva za projektiranje i analizu proizvoda.

FEMAP (Finite Element Modeling and Postprocessing) je alat za pred- i post-procesiranje za metodu konačnih elemenata (MKE). Razvio ga je Siemens Digital Industries Software, a sam FEMAP pruža snažno sučelje za stvaranje, uređivanje i evaluaciju modela konačnih elemenata složenih inženjerskih struktura i sustava. Ovaj program omogućava inženjerima stvaranje detaljnih modela struktura, uključujući geometrije, materijale i granične uvjete. Također, nudi napredne mogućnosti omrežavanja, osiguravajući da model konačnih elemenata točno predstavlja geometriju i pravilno se ponaša tijekom simulacije. Korisnici mogu postaviti različite tipove analiza, kao što su statičke, dinamičke, toplinske i nelinearne analize.

Nakon samog rješavanja problema postoji mogućnost vizualizacije rezultata analize, uključujući naprezanje, deformaciju i druge bitne parametre.

NX Nastran je alat za rješavanje problema konačnih elemenata također razvijen od strane Siemens. Poznat je po svojoj robusnosti, točnosti i učinkovitosti u rješavanju složenih inženjerskih problema. Podržava širok raspon tipova analiza, uključujući linearne i nelinearne statičke analize, dinamičke analize, analize izvijanja i toplinske analize. Ovaj program je optimiziran za visoke performanse, sposoban za rješavanje simulacija velikih razmjera s milijunima stupnjeva slobode.

Ova dva alata se najčešće koriste zajedno pri čemu se FEMAP koristi za stvaranje i pripremu modela, koji se zatim rješavaju pomoću NX Nastran-a. Rezultati se nakon toga vraćaju u FEMAP za post-procesiranje i vizualizaciju.

4.1. Postupak numeričke analize u FEMAP-u

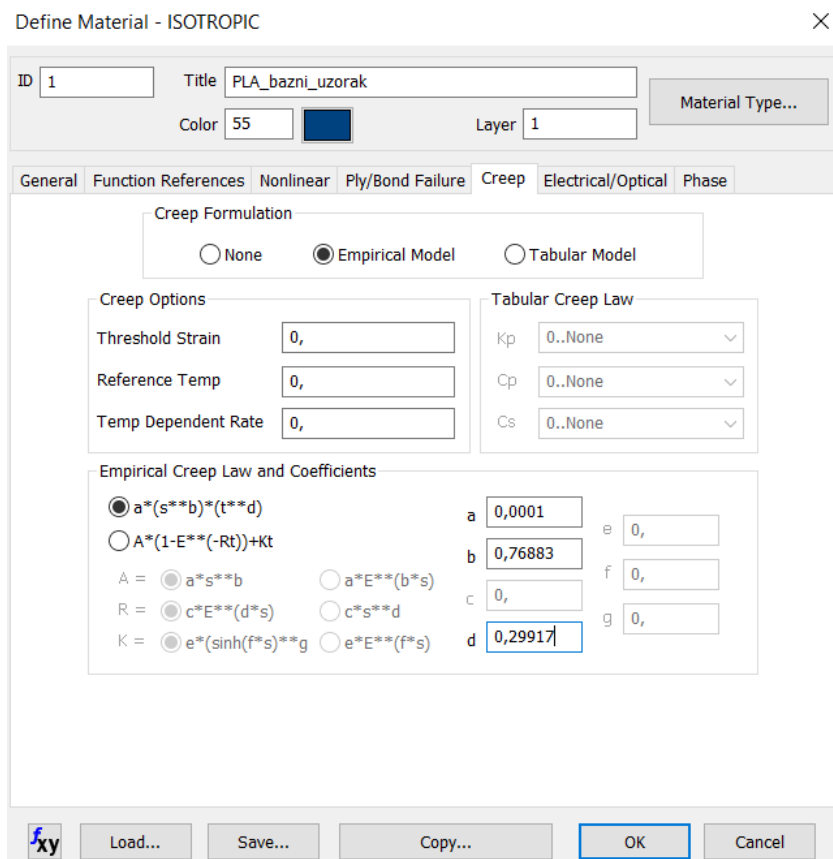
Kao prvi korak numeričke analize, u FEMAP je potrebno uvesti geometriju uzorka u `.x_t` formatu datoteke. Pri učitavanju geometrije potrebno je postaviti željeni „Geometry scale factor“ koji je u ovome slučaju jednak jedan, što znači da nije potrebno skaliranje modela epruvete.

Nakon što je geometrija modela uvezena definira se materijal uzorka. Definiraju se osnovna svojstva materijala kao što su Youngov modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, i gustoća, kako je prikazano na slici 5.1. U ovome se slučaju osim osnovnih svojstava definira i Bailey - Nortonov zakon puzanja, odnosno a, b i d koeficijenti prethodno dani u tablicama 4.12 a PLA te 4.13 za ABS (slika 5.2).

Slika 5.1. Osnovne postavke materijala

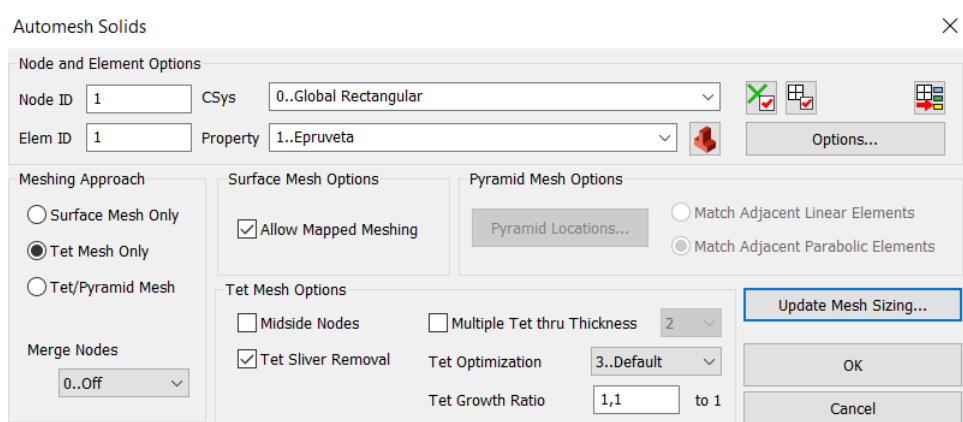
Slijedeći korak je definiranje svojstava elemenata na način da se odabere *model > property > Elem/Property type > Solid*, te željeni materijal (npr. PLA bazni uzorak).

Nakon definiranja svojstava (*eng. property*) potrebno je omrežiti model. To se radi na način da se u izborniku „Mesh“ odabere *Mesh > Mesh control > Size along curve*, pri čemu se otvara izbornik u kojemu se odabiru krivulje koje želimo omrežiti. Kada odaberemo krivulje, otvara se novi izbornik u kojem postavljamo broj elemenata po duljini krivulje te na taj način definiramo gustoću mreže na tom djelu geometrije.



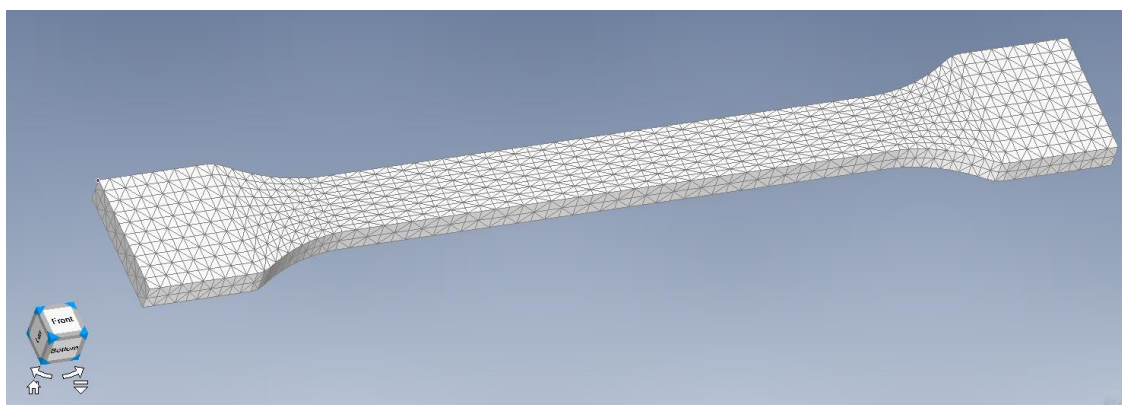
Slika 5.2. Postavke jednađbe puzanja za materijal

Idući korak u omrežavanju modela je *Mesh > Geometry > Solids*, pri čemu se otvara izbornik sa slike 5.3 u kojemu se odabire prethodno definirano svojstvo elemenata. Odabire se tetraedarska mreža pomoću opcije *Tet Mesh Only* te se isključuje opcija *Midside Nodes*.



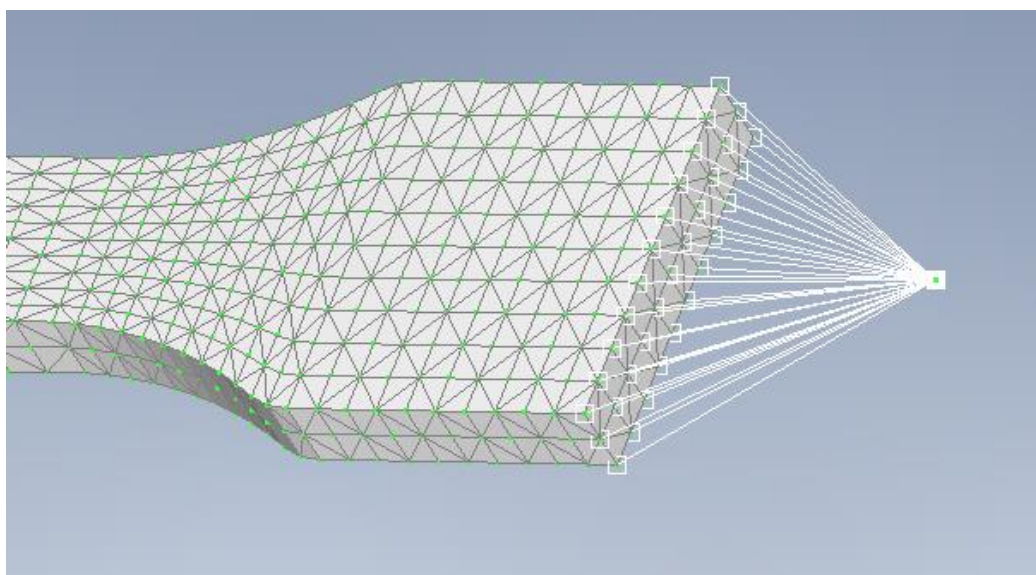
Slika 5.3. Postavke mreže modela

Ovim postupkom se dobiva omreženi model sa oko 4000 elemenata.



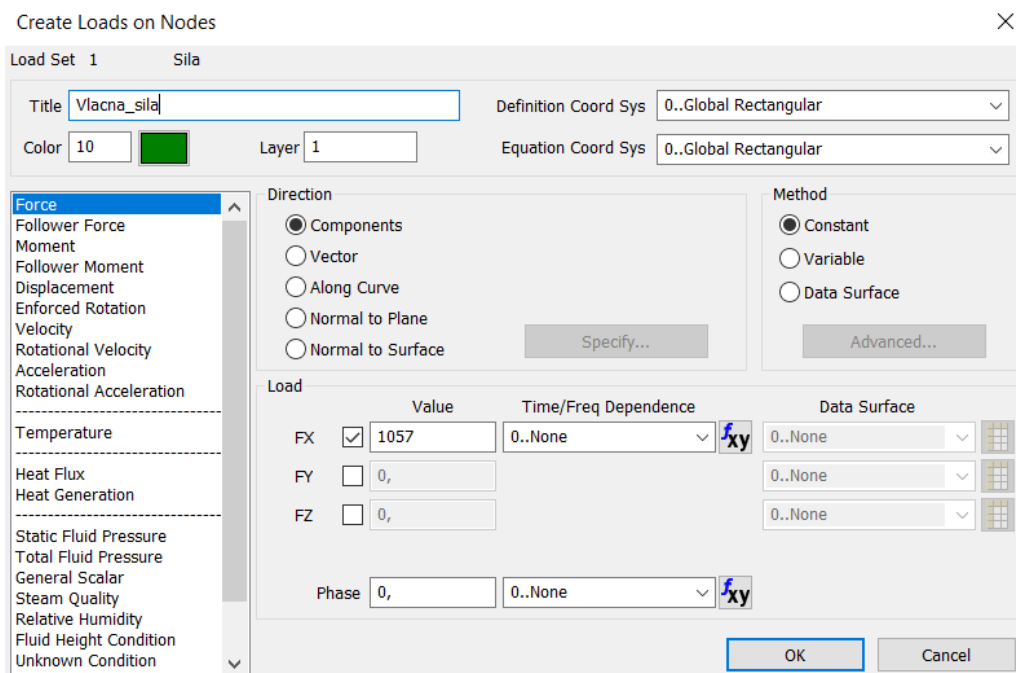
Slika 5.4. Prikaz omreženog modela

Opterećenje se dodaje na način da se u programu odabere *Model > Load > Create/Manage Set > New Load Set*. Potrebno je definirati kruti element koji se sastoji od skupa ovisnih i neovisnih čvorova. Kako bi to bilo moguće kreira se neovisni (*eng. independent*) čvor na koordinatama koje odgovaraju našem modelu $(0.165, 0.002, -0.01)[m]$ pomoću naredbe *Model > Node*. Naredbom *Model > Element* otvara se prozor u kojemu pod *Type* odabiremo *Rigid* te kao neovisni (*eng. independent*) čvor odaberemo novo kreirani čvor, a kao ovisne (*eng. dependant*) čvorove odaberemo sve čvorove na kraju epruvete.

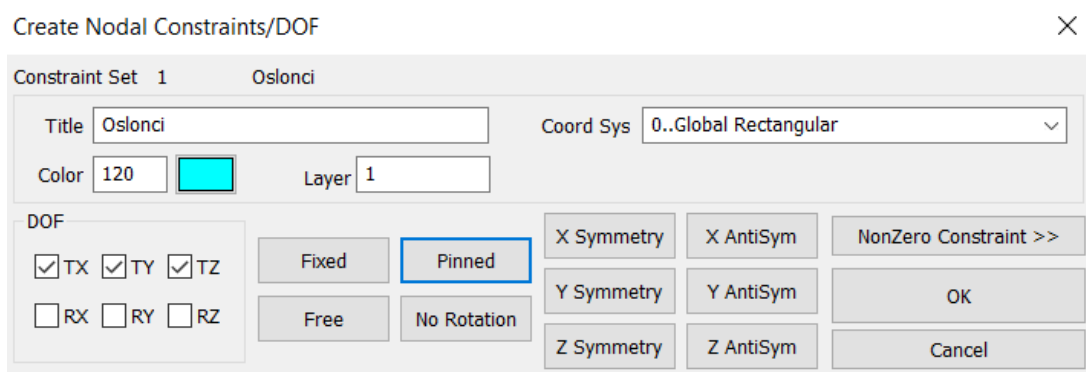


Slika 5.5. Prikaz krutog elementa i njegovih čvorova

Kada imamo definiran kruti element moguće je postaviti opterećenje u obliku vlačne sile u smjeru osi X na način da se odabere *Model > Load > Nodal*, pri čemu se otvara prozor u kojemu odabiremo čvor na kojeg postavljamo silu te joj definiramo smjer i intenzitet kako je prikazano na slici 5.6. Intenziteti sila koje se koriste dani su u tablicama 4.10 za PLA te 4.11 za ABS.



Slika 5.6. Postavljanje opterećenja

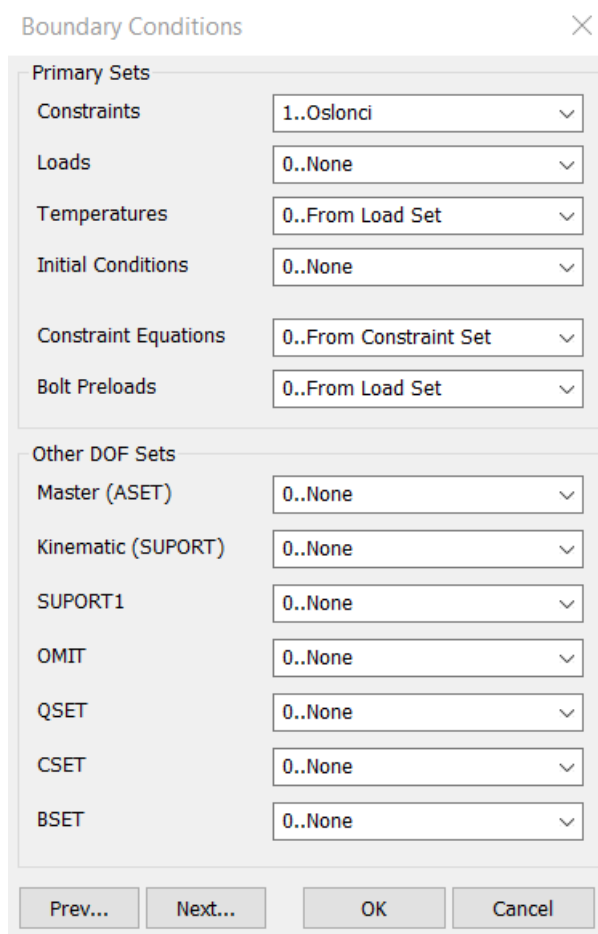


Slika 5.6. Postavljanje rubnih uvjeta

To je moguće napraviti na način da se odabere *Model > Constraints > Create/Manage set > New constraint set*. Odabirom *Model > Constraints > Nodal*, odabirom dijela

epruvete bliže ishodištu koordinatnog sustava otvara se prozor u kojemu se odabiru stupnjevi slobode gibanja tijela. Na taj se način modeliraju čeljusti kidalice koje fiksiraju početak i kraj epruvete. U ovom se slučaju onemogućuju translacije duž osi, dok su rotacije dozvoljene, ali se pri ovim postavkama modela neće pojaviti.

Nakon što je model postavljen potrebno je definirati postavke analize. Pod *Model > Analysis > New* odabire se nova analiza te se pod *Analysis Type* odabire *Nonlinear Static* ili nelinearna statička analiza.



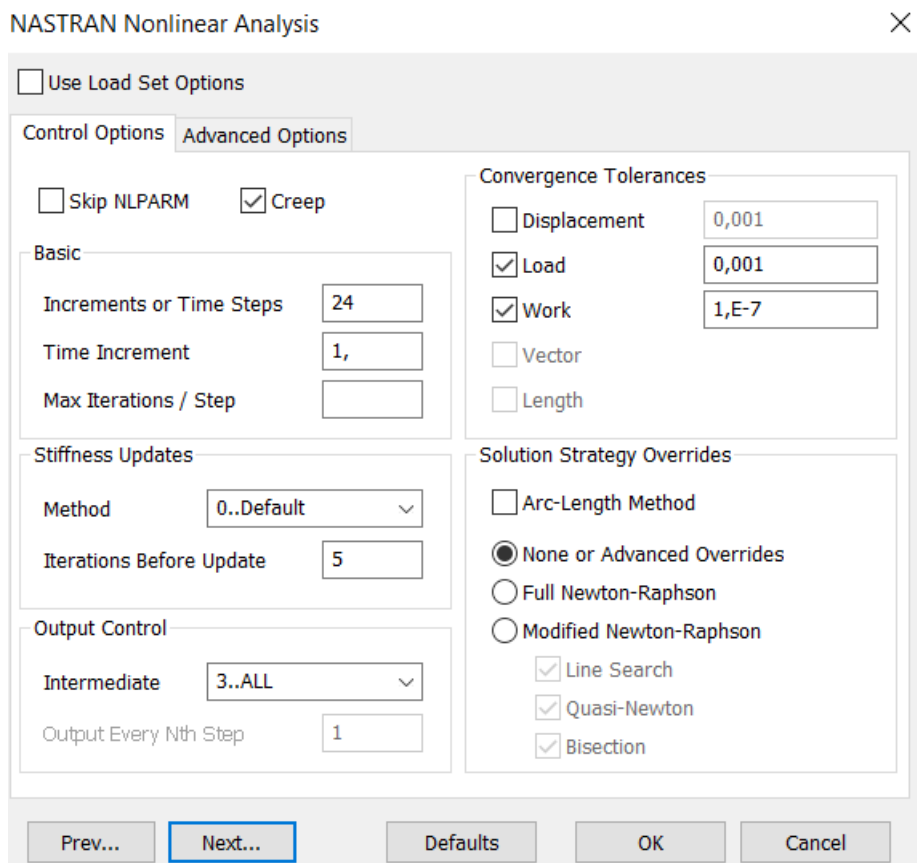
Slika 5.7. Definiranje rubnih uvjeta unutar analize

Pod *Boundary Conditions* za *Constraints* odaberemo oslonce koje smo prethodno definirali, a za opterećenja (*Loads*) odaberemo *None*. Kako bi mogli pravilno modelirati puzanje potrebno je prvo napraviti statičku analizu modela, a zatim analizu puzanja.

To radimo na način da u FEMAP-u napravimo dva slučaja (*Case-a*).

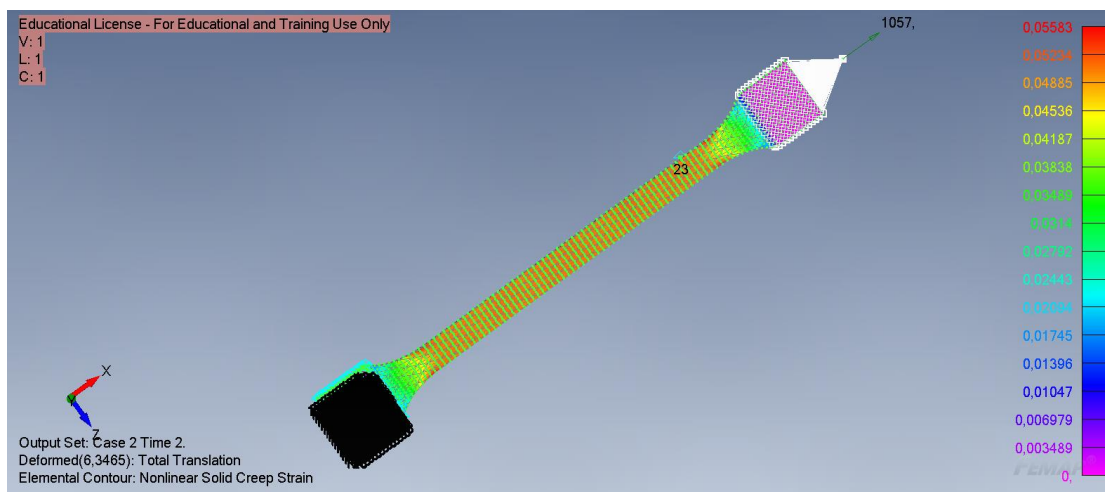
U slučaju statičke analize (*Case 1*) podešavamo samo rubne uvjete (*Boundary Conditions*), tako da pod *Constraints* odabiremo *None* (jer smo ih definirali za razini cijele analize) te u imeniku opterećenja (*Loads*) odabiremo prethodno definirano opterećenje za statički slučaj. Važno je napomenuti da su opterećenje za statički slučaj i puzanje jednaki, ali ih je potrebno razdvojiti kako bi se mogla postaviti analiza.

U drugome slučaju (*Case 2*), odnosno u slučaju analize puzanja potrebno je u izborniku *Control Options* postaviti analizu na *Creep* te unijeti vrijednosti za *Time Steps* i *Time Increment*, pri čemu *Time Increment* označava vremenski korak analiza, a *Time Steps* označava broj koraka. Također, pod *Output Control* odabiremo *3..ALL*, kako bi se tijekom izračuna zabilježile vrijednosti deformacije za svaki korak koje su potrebne za naknadnu obradu podataka.



Slika 5.8. Definiranje uvjeta puzanja

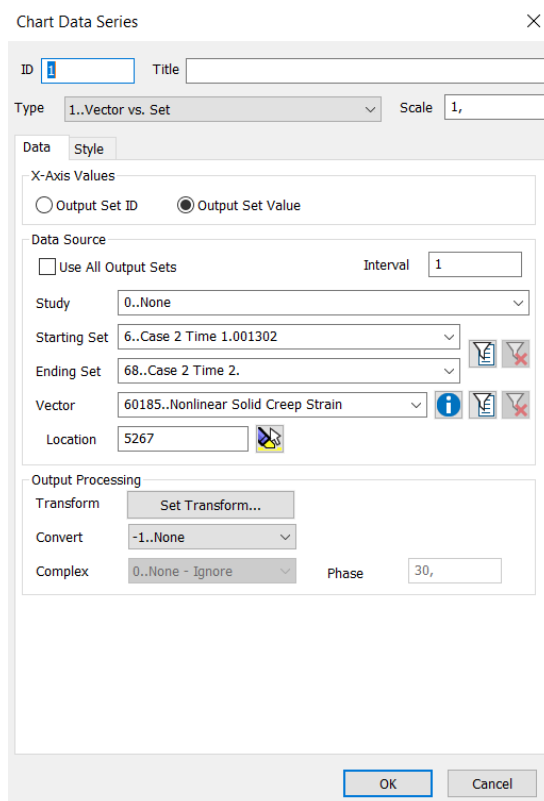
Kada je analiza postavljena odabiremo File > Analize kako bi je pokrenuli. Po završetku analize odabiremo prikladan način za vizualizaciju rezultata u obliku obojanih kontura, koje u ovome slučaju predstavljaju vrijednosti deformacija nastalih zbog puzanja (slika 5.9).



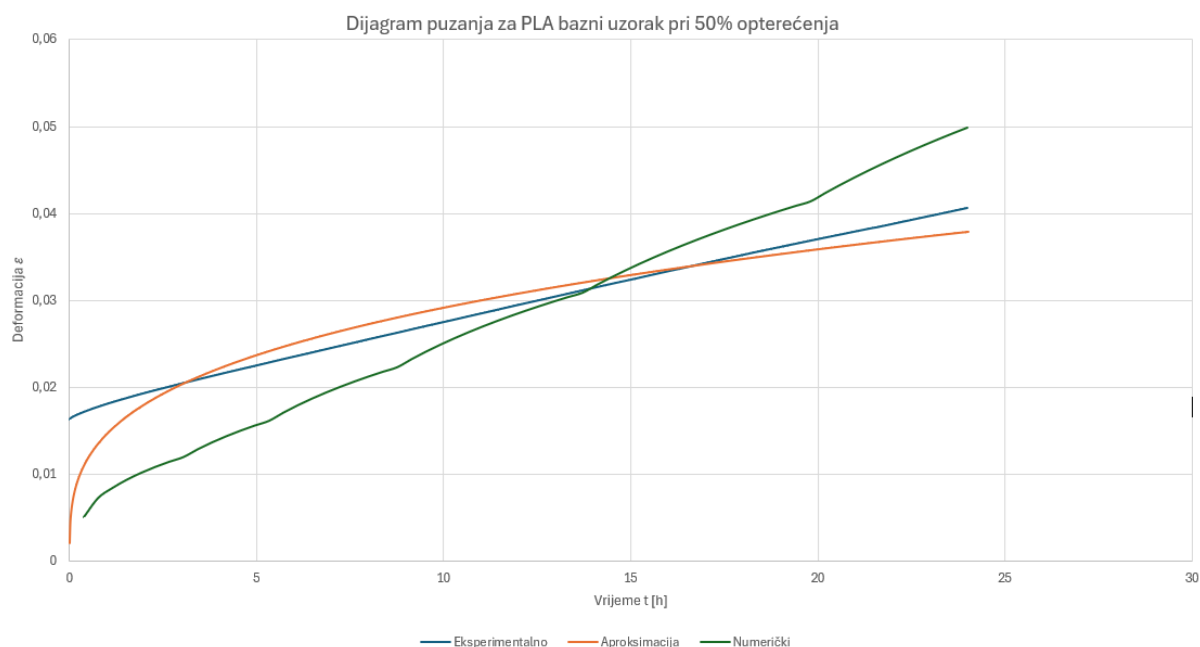
Slika 5.9. Vizualizacija rezultata analize puzanja

Za obradu dobivenih podataka odaberemo *Tools > Charting > Data Series Manager > New Data Series* te pod *Type* odaberemo *1..Vector vs. Set*. Pod *X-Axis Values* odaberemo *Output Set Value*. U izborniku *Data Source* odaberemo slučajeve koje želimo prikazati te pod *Location* označimo ili upišemo broj elementa za koji tražimo podatke kao je prikazano na slici 5.10.

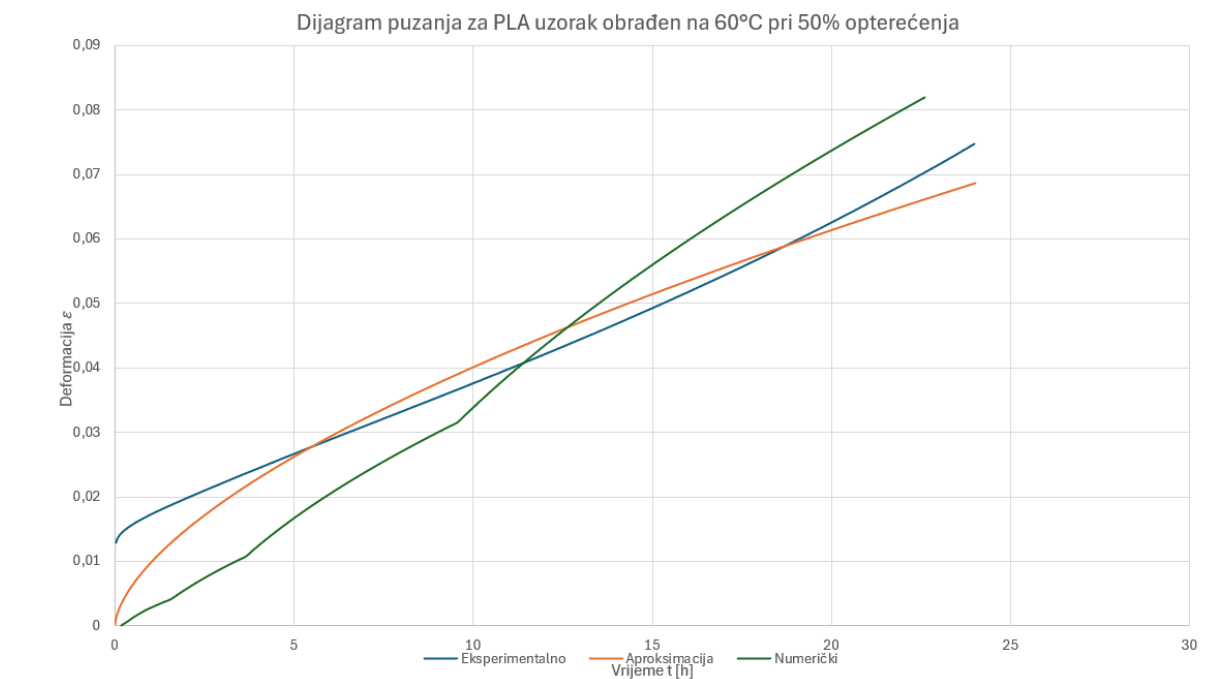
Dobivene podatke je moguće izvesti u Excel za daljnju obradu. U Excel-u su uspoređeni podaci dobiveni eksperimentalnim putem, aproksimirani pomoću Bailey - Nortonovog zakona te podaci dobiveni numerički za PLA kao i za ABS materijale.



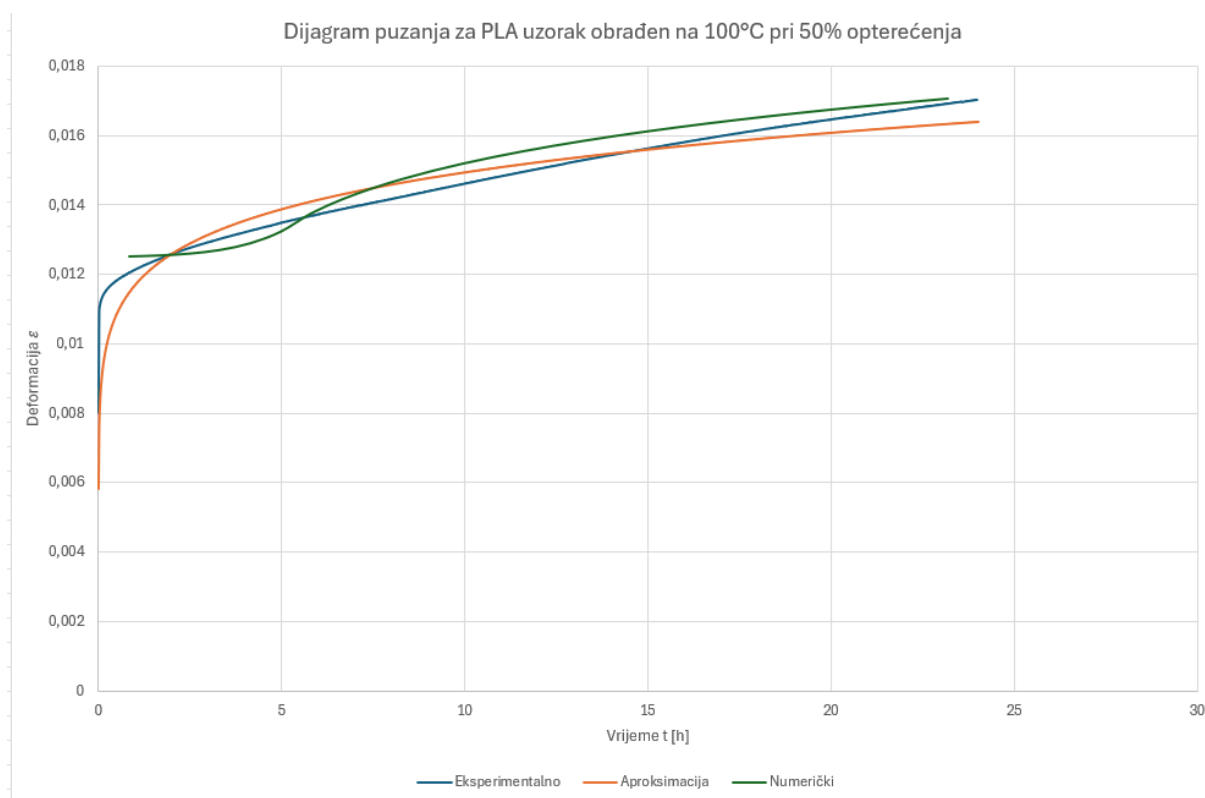
Slika 5.10. Postavke podataka za izradu grafova u FEMAP-u



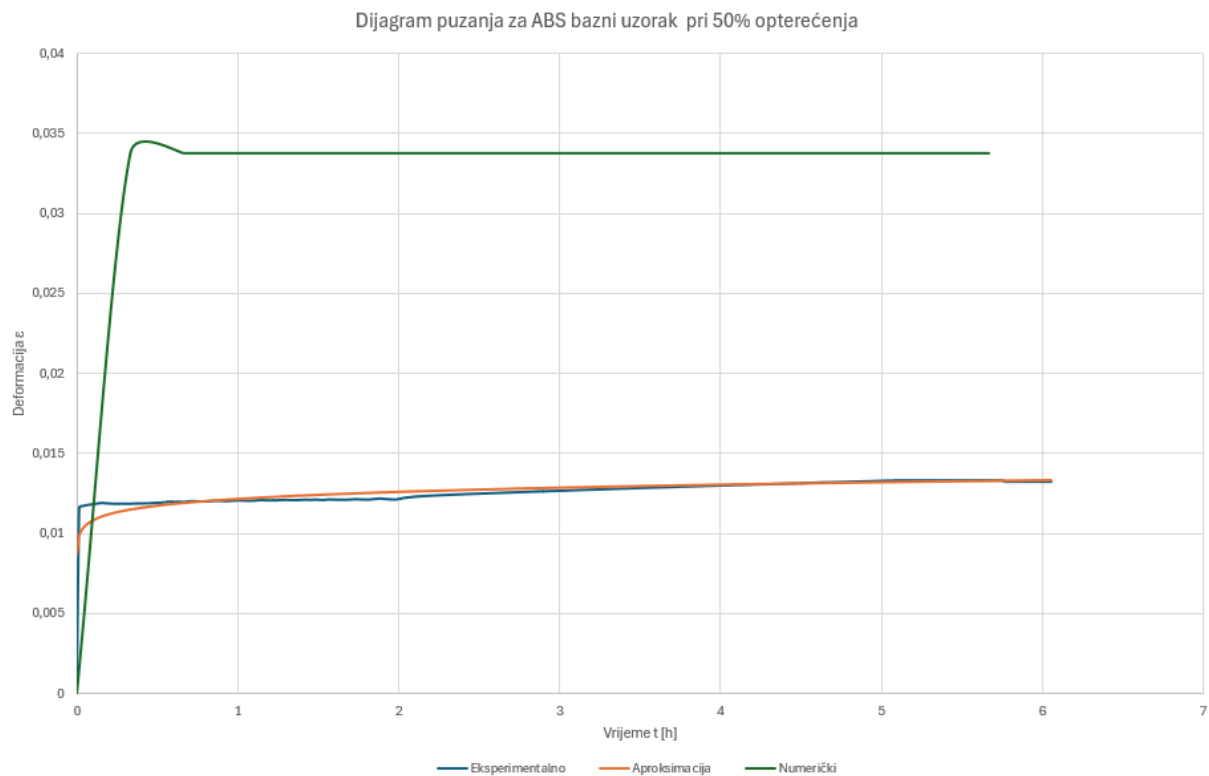
Slika 5.11. Dijagram puzanja za bazni uzorak PLA pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



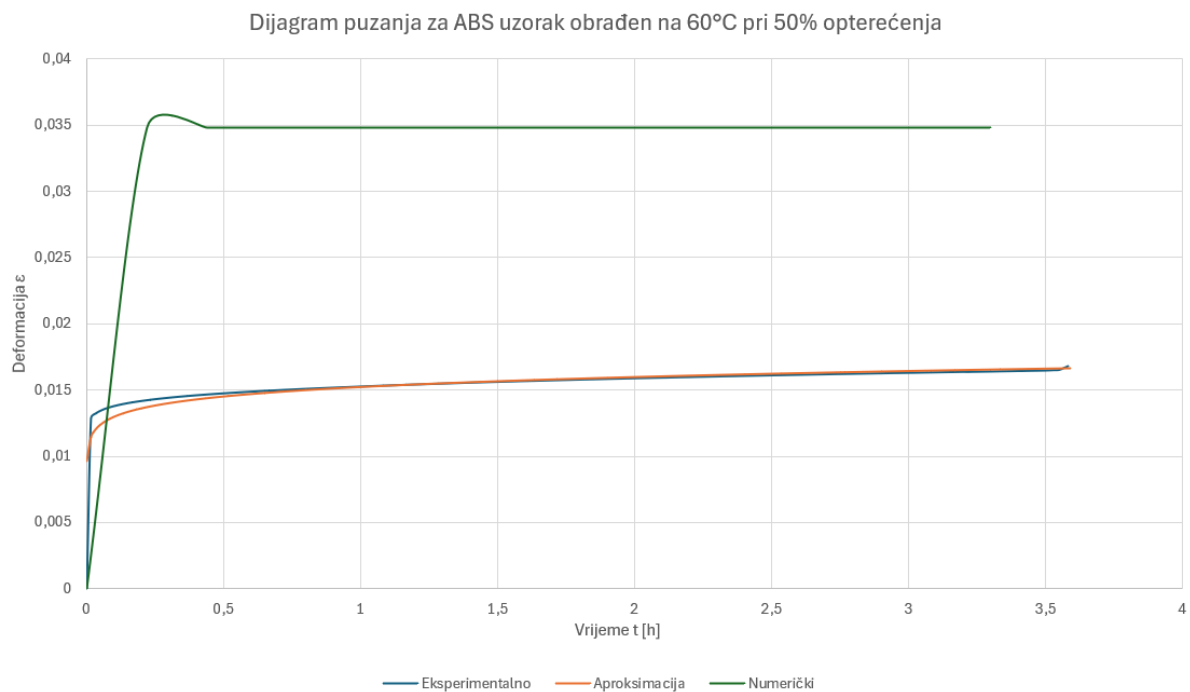
Slika 5.12. Dijagram puzanja za PLA uzorak obrađen na 60 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



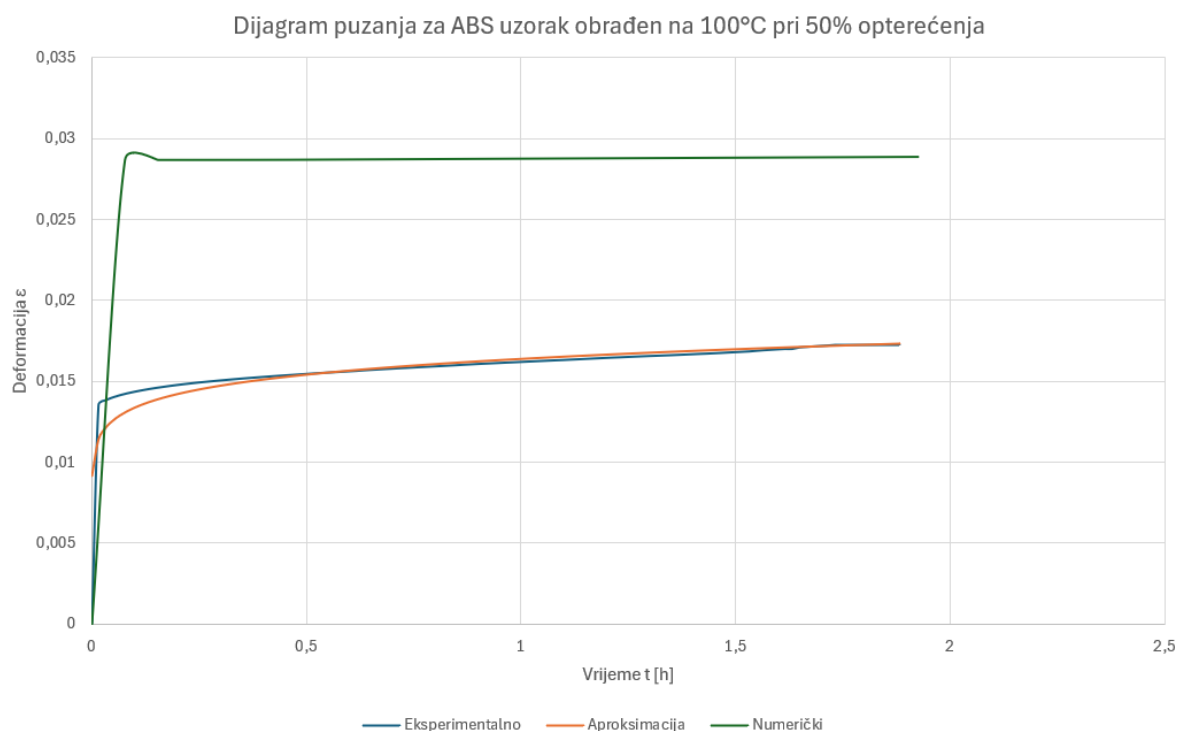
Slika 5.13. Dijagram puzanja za PLA uzorak obrađen na 100 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



Slika 5.14. Dijagram puzanja za bazni uzorak ABS pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



Slika 5.15. Dijagram puzanja za ABS uzorak obrađen na 60 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h



Slika 5.16. Dijagram puzanja za ABS uzorak obrađen na 100 °C pri 50 % maksimalnog opterećenja u trajanju od 24h

Iz dijagrama za PLA na slikama 5.11, 5.12 i 5.13 vidljivo je da se dobivene vrijednosti deformacija poklapaju u velikoj mjeri. Iz podataka danih u tablici 5.1. moguće je izračunati odstupanja između eksperimentalno i numerički dobivenih deformacija koja iznose oko 0,5%. Iz ovoga možemo zaključiti da su podatci za PLA materijal dobro modelirani te da je uz Bailey - Nortonove jednadžbe s pripadajućim koeficijentima dane u tablici 5.2 moguće računati puzanje ovoga materijala i na vremenske periode duže od 24 sata.

Dijagrami za ABS materijal na slikama 5.14, 5.15 i 5.16 prikazuju odstupanje između numeričkih i eksperimentalnih podataka od oko 1,5% vrijednosti deformacije. ABS uzorci su na testu puzanja izdržali između dva i šest sati. Iz dobivenih podataka je moguće zaključiti kako ABS materijal nije otporan na puzanje pri ovim vrijednostima naprezanja te koeficijenti prikazani u tablici 5.1 te jednadžbe prikazane u tablici 5.2 za ABS materijal nisu reprezentativni za računanje puzanja na duže vremenske periode. Kako bi se predvidjelo ponašanje materijala pri duljim periodima opterećenja potrebna su daljnja istraživanja.

Tablica 5.1. Vrijednosti deformacije u slučaju eksperimentalnog i numeričkog ispitivanja puzanja za PLA i ABS materijale pri 50 % maksimalnog opterećenja na 24h

	Deformacija puzanja ϵ		
	Eksperimentalno	Aproksimirano	Numerički
PLA bazni uzorak	0,04064	0,0379	0,04927
PLA 60°C	0,074701	0,068678	0,09478
PLA 100°C	0,01701	0,01641	0,02203
ABS bazni uzorak	0,01327	0,01329	0,0368
ABS 60°C	0,016839	0,016675	0,03775
ABS 100°C	0,017282	0,017343	0,03306

Tablica 5.1. Baily-Nortonove jednadžbe puzanja za PLA i ABS materijale

	Bailey - Nortonov zakon puzanja
PLA bazni uzorak	$\epsilon_c = 0,00014 \times \sigma^{1,43121} \times t^{0,29919}$
PLA 60°C	$\epsilon_c = 1,63 \times 10^{-5} \times \sigma^{1,948393} \times t^{0,613912}$
PLA 100°C	$\epsilon_c = 0,00013 \times \sigma^{1,36045} \times t^{0,10646}$
ABS bazni uzorak	$\epsilon_c = 0,00037 \times \sigma^{1,2561} \times t^{0,05119}$
ABS 60°C	$\epsilon_c = 0,00012 \times \sigma^{1,74007} \times t^{0,06938}$
ABS 100°C	$\epsilon_c = 0,00038 \times \sigma^{1,35787} \times t^{0,08838}$

6. ZAKLJUČAK

U ovome radu opisuje se eksperimentalna i numerička analiza 3D tiskanih uzoraka iz dvije vrste plastike: PLA i ABS. Tiskani uzorci su termički obrađeni na 60°C i 100°C te nakon toga podvrgnuti vlačnom testu kako bi se dobilo maksimalno naprezanje. Uz poznato maksimalno naprezanje uzorci su podvrgnuti testu nisko-cikličkog zamora na tisuću ciklusa pri 75% i 50% maksimalnog opterećenja. Pri 75% maksimalnog opterećenja uzorci nisu izdržali svih tisuću ciklusa, pa je kao mjera naprezanja za kratkotrajni test puzanja odabrano naprezanje jednako polovici maksimalnog (50%).

Rezultati testa kratkotrajnog puzanja od 24 sata dani su u obliku eksperimentalno dobivenih koeficijenata Bailey - Nortonovog zakona. Ti su koeficijenti primijenjeni u numeričkoj analizi kako bi se računski modeliralo puzanje. Preklapanjem eksperimentalnih i numeričkih podataka uspostavljene su jednadžbe puzanja za ispitivane materijale, koje dalje mogu biti korištene za predviđanje razvoja puzanja numeričkim putem bez potrebe za eksperimentalnom analizom.

Zaključno, 3D tiskani materijali predstavljaju značajan napredak u proizvodnji i znanosti o materijalima, nudeći neusporedivu fleksibilnost, prilagodbu i učinkovitost. Kako tehnologija nastavlja napredovati, raznolikost materijala dostupnih za 3D ispis - od polimera i metala do keramike i bio-materijala proširuje mogućnosti za inovativne primjene. Napreci u svojstvima materijala i tehnikama ispisa omogućuju proizvodnju jačih, lakših i izdržljivijih komponenti, pomičući granice onoga što se može postići. Međutim, izazovi poput osiguravanja konzistentnosti materijala, poboljšanja mehaničkih svojstava i skaliranja proizvodnje još uvijek nisu prevaziđeni. Neprekidna istraživanja i razvoj ključni su za prevladavanje ovih prepreka i otključavanje punog potencijala tehnologije 3D ispisa, koja će nastaviti oblikovati način na koji dizajniramo, proizvodimo i koristimo predmete u svakodnevnom životu i industriji.

7. LITERATURA

- [1] „3D printing methods“, s Interneta: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>, 3. travnja 2024.
- [2] „FDM 3D printing“, s Interneta: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>, 8. travnja 2024.
- [3] „Vat polymerization“, s Interneta: <https://www.whiteclouds.com/3dpedia/vat-polymerization/>, 8. travnja 2024.
- [4] „DLP 3D printing“, s Interneta: <https://www.pcbway.com/rapid-prototyping/3D-Printing/3D-Printing-DLP.html>, 13. travnja 2024.
- [5] „FEM mesh“, s Interneta:, https://wiki.freecad.org/File:FEM_Mesh.png, 31. svibnja 2024.
- [6] „Global stiffness matrix“, s Interneta: <https://efficientengineer.com/finite-element-method/>, 3. lipnja 2024.
- [7] Brcic, M.; Brnic, J.; Vrtovsnik, D.: Experimental Fatigue Analysis of Heat-treated 3D Printed PLA Specimens
- [8] Gellermann, W.; Seidler, S.: „Polymer Testing“, Hanser publishers, Munich, 2013.
- [9] „S-N curve“, s Interneta: <https://blog.federnshop.com/en/fatigue-strength/>, 19. svibnja 2024.
- [10] „Fatigue test“, s Interneta:, <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/fatigue-test/s-n-curve-woehler-curve/>, 20. svibnja 2024.
- [11] „Dijagram puzanja“, s Interneta:, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Puzanje>, 30. svibnja 2024.
- [12] „Femap“, s Interneta: <https://en.wikipedia.org/wiki/Femap>, 16. lipnja 2024.

8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLESKOM JEZIKU

U ovome je radu opisan postupak eksperimentalne i numeričke analize termički obrađenih 3D tiskanih uzoraka metodom konačnih elemenata. Tehnologijom 3D ispisa ispisan su tri seta testnih uzoraka iz PLA i ABS materijala. Prvi set je korišten kao referentni uzorak, dok su druga dva seta termički obrađena na 60°C i 100°C. U sklopu eksperimentalne analize provedeni su vlačni test, test nisko-cikličkog zamora te test kratkotrajnog puzanja na svakom od tri seta za oba materijala. Podatci dobiveni iz navedenih testova korišteni su za postavljanje jednadžbi puzanja za svaki set uzoraka. Numerička analiza provedena u programu FEMAP temeljena je na eksperimentalno dobivenim jednadžbama puzanja, a provedena je kako bi se potvrdila točnost eksperimentalnih podataka te po potrebi moglo predvidjeti ponašanje materijala pri dužim periodima opterećenja.

Ključne riječi: 3D tiskanje, naprezanje, deformacija, zamor, puzanje, PLA, ABS, termička obrada, metoda konačnih elemenata, numerička analiza.

This paper describes, the process of experimental and numerical analysis of heat treated 3D printed samples using the finite element method. Three sets of test samples made from PLA and ABS materials were printed using 3D printing technology. The first set was used as a reference sample, while the other two sets were heat treated at 60°C and 100°C. As part of the experimental analysis, tensile tests, low-cycle fatigue tests, and short-term creep tests were conducted on each of the three sets for both materials. The data obtained from these tests were used to establish creep equations for each set of samples. The numerical analysis carried out in the FEMAP software was based on the experimentally obtained creep equations and was conducted to confirm the accuracy of the experimental data and to predict the behavior of the materials under longer loading periods if necessary.

Key words: 3D printing, stress, strain, fatigue, creep, PLA, ABS, heat treatment, finite element method, numerical analysis.